



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И ДИЗАЙНА



ВЫСШАЯ ШКОЛА  
ТЕХНОЛОГИИ  
И ЭНЕРГЕТИКИ  
(ВШТЭ)

# ТЕХНОЛОГИЯ *и* ЭНЕРГЕТИКА

01 (01) 2026

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

THE SCIENTIFIC JOURNAL

*Издается с 2026 года | Published since 2026*

TECHNOLOGY  
*and*  
ENERGY

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2026

**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

Редактор Еремина М. А.  
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 2014 года (до 2025 г. выходил под названием «Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна»). 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;
- 2.4.5 Энергетические системы и комплексы;
- 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника.

**Адрес редакции:** 191186, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., д. 18.

**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 26.03.2026. Формат 62×94 1/8. Бумага кн.-журн. Усл.-печ. л. 16,28.

Цена: Бесплатно.

12+

Тираж 100 экз. Заказ № 78

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026





# 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

## **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 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

## **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

## **Дягилева Алла Борисовна**

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

## **Зильберглейт Марк Аронович**

доктор химических наук, профессор кафедры ТНВ и ОХТ Белорусского государственного технологического университета

## **Колибаба Ольга Борисовна**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения Ивановского государственного энергетического университета имени В. И. Ленина

## **Яковлев Павел Викторович**

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

## **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)

## **Куколев Максим Игоревич**

доктор технических наук, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

## **Куров Виктор Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов химической технологии, заместитель директора ВШТЭ по научной работе

## **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 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет 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 инженерной графики и автоматизированного проектирования ВШТЭ

## **Сафин Рушан Гареевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

## **Смирнова Екатерина Григорьевна**

доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии бумаги и картона ВШТЭ



# СОДЕРЖАНИЕ

**СОВРЕМЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ  
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ДРЕВЕСИНЫ**

- 7** Об издателе. ВШТЭ, или Высшая школа технологии и энергетики
- 8** Портнягина Е. А., Мидуков Н. П., Худницкий Д. В.  
Графическая обработка элемента 3D-микроструктуры в программе Blender

- 19** Ремизова И. В., Милехина В. Д.  
Разработка экспертной системы для оптимизации режима сушки пиломатериалов с целью минимизации брака в среде CLIPS

- 28** Федяев А. А., Семенов Я. Я.  
Выявление внутренних скрытых дефектов в клееных древесных материалах на основе ультразвука

- 36** Федяева Н. Ю., Пырин С. Я., Коваленко П. К.  
Оценка энергоэффективности ограждающих конструкций стен деревянных домов из цельной древесины

**ВЗГЛЯД ЭКОНОМИСТА**

- 43** Трейман М. Г., Еремина М. А.  
Влияние национальной инновационной системы России на экономику Северо-Западного региона в современных экономических реалиях

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ  
ИНЖИНИРИНГ**

- 48** Тарасова Е. Д., Матвеева Я., Дягилева А. Б.  
Интегральная оценка устойчивости ландшафта для определения технологического суверенитета территории

- 58** Карасев Ю. А., Дьяченко В. М., Марков В. А.  
Экологическое обоснование применения гусеничной техники в лесах криолитозоны

- 66** Лысак О. П., Елифанов А. В.  
Исследование свойств основных отходов ЦБК для использования при рекультивации полигонов

**АВТОМАТИЗАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ**

- 73** Диалло А., Ковалёв Д. А., Русинов Л. А.  
Оптимизация состава и расположения датчиков для диагностики нарушений состояния технологических процессов

- 81** Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Петров Ф. Д.  
Автоматизация дозирования и смешивания флокулянта

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

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА  
И ТЕПЛОТЕХНИКА**

- 96** Громова Е. Н.  
Исследование тепломассопереноса в процессе контактно-конвективной сушки картона

- 102** Борткевич О. А., Злобин В. Г., Пеленко В. В., Екимов В. Г.  
Расчет тепловых потерь через скользящие опоры трубопроводов тепловых сетей

- 111** Живасва К. Г., Смородин С. Н., Белоусов В. Н.  
Особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла

- 117** Сорокин А. И., Пеленко В. В.  
Моделирование зависимости аварийности тепловых сетей от объемов ремонтно-восстановительных работ и обоснование безубыточного финансирования

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

- 124** Дронов В. О.  
Концепция применения суперконденсаторов в лифтовых установках для повышения энергоэффективности

# CONTENT

|                                                                              |            |                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>MODERN TECHNOLOGIES<br/>OF WOOD PROCESSING<br/>AND USE</b>                | <b>7</b>   | About the publisher. HSTE, or Higher School of Technology and Energy                                                                                                    |
|                                                                              | <b>8</b>   | Portnyagina E. A., Midukov N. P., Khudnitsky D. V.<br>Graphical processing of a 3D microstructure element in Blender software                                           |
|                                                                              | <b>19</b>  | Remizova I. V., Milekhina V. D.<br>Designing a CLIPS-based expert system to optimize sawn timber drying schedules and minimize waste                                    |
|                                                                              | <b>28</b>  | Fedyaev A. A., Semenov Ya. Ya.<br>Ultrasonic detection of internal hidden defects in glued laminated timber                                                             |
|                                                                              | <b>36</b>  | Fedyaeva N. Yu., Pyrin S. Ya., Kovalenko P. K.<br>Assessment of the energy efficiency of wall envelope structures in solid timber houses                                |
| <b>THE ECONOMIST'S VIEW</b>                                                  | <b>43</b>  | Treyman M. G., Eremina M. A.<br>Russia's National Innovation System and its impact on the Northwestern Region's economy in the current economic context                 |
| <b>ENVIRONMENTAL<br/>ENGINEERING</b>                                         | <b>48</b>  | Tarasova E. D., Matveeva Ya., Dyagileva A. B.<br>Integrated assessment of landscape resilience for determining the technological sovereignty of a territory             |
|                                                                              | <b>58</b>  | Karasev Yu. A., Dyachenko V. M., Markov V. A.<br>Environmental justification for employing tracked machinery in cryolithozone forests                                   |
|                                                                              | <b>66</b>  | Lysak O. P., Epifanov A. V.<br>Investigation of pulp and paper industry waste characteristics for landfill site rehabilitation                                          |
| <b>AUTOMATION<br/>OF TECHNOLOGICAL<br/>PROCESSES<br/>AND CONTROL SYSTEMS</b> | <b>73</b>  | Kovalev D. A., Diallo A., Rusinov L. A.<br>Optimization of the sensor selection and placement for process fault diagnosis                                               |
|                                                                              | <b>81</b>  | Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Petrov F. D.<br>Automation of flocculant dosing and mixing                                                                           |
| <b>THERMAL POWER<br/>ENGINEERING<br/>AND HEAT ENGINEERING</b>                | <b>90</b>  | Production HR Support: «Krona» Institute and HSTE partners                                                                                                              |
|                                                                              | <b>96</b>  | Gromova E. N.<br>Study of heat and mass transfer in the process of contact-convective drying of cardboard                                                               |
|                                                                              | <b>102</b> | Bortkevich O. A., Zlobin V. G., Pelenko V. V., Ekimov V. G.<br>Calculation of heat loss through sliding supports of heating network pipelines                           |
|                                                                              | <b>111</b> | Zhivaeva K. G., Smorodin S. N., Belousov V. N.<br>Features of the thermal design of a soda recovery boiler furnace                                                      |
| <b>ELECTRIC POWER<br/>AND ELECTRICAL<br/>ENGINEERING</b>                     | <b>117</b> | Sorokin A. I., Pelenko V. V.<br>Modeling the dependence of heating network failure rates on repair and restoration work volumes and substantiating break-even financing |
|                                                                              | <b>124</b> | Dronov V. O.<br>The concept of utilizing supercapacitors in elevator systems to improve energy efficiency                                                               |

# УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ, КОЛЛЕГИ, ПАРТНЁРЫ И ДРУЗЬЯ!



От имени коллектива Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна и от себя лично приветствую вас на страницах нового научного журнала «Технология и энергетика».

Этот год для нас особенный — Высшая школа технологии и энергетики отмечает 95-летний юбилей. Рождённая в 1931 году, пройдя путь от университета растительных полимеров до современного технологического и энергетического центра, Высшая школа технологии и энергетики сохраняет верность своей исторической миссии: быть кузницей кадров и генератором идей для ключевых отраслей экономики России.

Наш юбилей — это повод оглянуться на пройденный путь. Нам есть чем гордиться! Высшая школа технологии и энергетики за почти столетнюю историю стала неотъемлемой частью промышленного и научного потенциала страны. Её становление было продиктовано стратегическими государственными задачами: в 1941 году для нужд оборонной промышленности был создан факультет целлюлозно-бумажного производства, а в 1959 году — теплоэнергетический факультет, что сформировало уникальную биполярную структуру вуза. Для ключевых отраслей

Высшая школа технологии и энергетики готовила кадры, среди которых — Герои Социалистического Труда, руководители крупнейших комбинатов и современные лидеры лесопромышленного холдинга «Илим».

Сегодня Высшая школа технологии и энергетики — это живой, динамичный организм, где тесно переплетены научная мысль, образование и реальный сектор экономики. Наш научный авторитет подтверждают два диссертационных совета, а востребованность разработок — стратегические партнёрства с лидерами промышленности. Совместный с Группой «Илим» проект «Лиственница», технологии биорефайнинга, создание нового вида бумаги «Эко/ЭкоА2», разработки в области твёрдого биотоплива третьего поколения, барьерных материалов для авиакосмической и оборонной отраслей — всё это реалии сегодняшнего дня Высшей школы технологии и энергетики.

Объединяющей силой и залогом будущего для нас является ставка на молодёжь. Студенческие команды — постоянные победители престижных чемпионатов «CASE-IN», финалисты ICPC, лидеры в студенческих стартапах и спортивных состязаниях. Четыре института — Технологии, Энергетики и автоматизации, Управления и экономики, Заочного и вечернего обучения — создают уникальную экосистему для подготовки специалистов, готовых формировать технологическую повестку будущего.

В год своего 95-летнего юбилея Высшая школа технологии и энергетики открывает новый научный журнал. Его задача — стать авторитетной площадкой для публикации результатов передовых исследований, дискуссий о трендах в области технологий, энергетики, управления и экономики, а также летописью нашего динамичного развития. Мы приглашаем к сотрудничеству учёных, промышленников, аспирантов и всех заинтересованных специалистов. Пусть этот новый журнал станет достойным отражением нашей общей работы, ярких идей и новых достижений на благо российской науки и промышленности.

С уважением,  
директор Высшей школы технологии и энергетики,  
главный редактор журнала,  
д. т. н., профессор **Павел Владимирович Луканин**



# ОБ ИЗДАТЕЛЕ

Основанная в 1931 году Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД за почти столетнюю историю стала неотъемлемой частью промышленного и научного потенциала страны. Её становление было продиктовано стратегическими государственными задачами: в 1941 году для нужд оборонной промышленности был создан факультет целлюлозно-бумажного производства, а в 1959 году — теплоэнергетический факультет, что сформировало уникальную биполярную структуру вуза. Для ключевых отраслей ВШТЭ готовила кадры, среди которых — Герои Социалистического Труда, руководители крупнейших комбинатов и современные лидеры лесопромышленного холдинга «Илим».

Опираясь на научные школы, ВШТЭ трансформировала свой исторический фундамент в передовую исследовательскую платформу для импортозамещения и разработки новых технологий.

Ученые вуза развивают фундаментальные и прикладные исследования по грантовым программам и в рамках хозяйственных договоров с отраслью. Наглядным примером стратегического партнерства является уникальный проект «Лиственница» с Группой «Илим» (объем финансирования свыше 300 млн руб.), не имеющий мировых аналогов и защищенный 19 патентами.

Именно сотрудничество с ведущими предприятиями служит основой для внедрения инноваций, таких как:

- Биорефайнинг осины, легший в основу нового вида офисной бумаги «Эко/Эко2» (производство — 100 тыс. тонн в 2022 г.).
- Технология твердого биотоплива 3-го поколения (5 патентов РФ).
- Создание уникальных барьерных материалов для авиакосмической, оборонной и других высокотехнологичных отраслей.
- Цифровизация методов анализа композиционных материалов (совместно с Республикой Беларусь).

Особо следует отметить серьезный прогресс в рамках программы «Приоритет 2030». Благодаря модернизации лабораторной базы кафедры ТЦКМ ВШТЭ выходит на новый этап реализации стратегического проекта по производству биоразлагаемой упаковки.

Научный авторитет ВШТЭ подтверждают два действующих диссертационных совета.

ВШТЭ объединила научную мысль, образование и сотрудничество с промышленными партнерами в рамках четырех динамично развивающихся институтов:

**Институт технологии** проводит исследования для ЦБП и смежных отраслей, фокусируясь на передовых задачах биорефайнинга, создании биоразлагаемых материалов и углеродной нейтральности. Успешные проекты с Группой «Илим» и Светогорским ЦБК, а также международный грант с Республикой Беларусь по анализу композитов — наглядное подтверждение востребованности его научных разработок.

**Институт энергетики и автоматизации** исторически сложился и утвердился в последние годы как признанный центр инженерного образования. Абсолютная победа в престижном чемпионате «CASE-IN», финалы чемпионата мира по программированию ICPC и стратегическое партнерство с лидерами ТЭК (ТГК-1, ГУП «ТЭК СПб») обеспечивают прямой трансфер знаний и технологий в энергетику страны.

**Институт управления и экономики** создает современную цифровую экосистему для подготовки управленцев, тесно интегрируя учебный процесс с IT-гигантами (1С, Контур, Gaipix) и бизнесом («Пятерочка», Сбербанк). Победы студентов в чемпионатах «CASE-IN» и «Стартап как диплом» демонстрируют способность Института выпускать специалистов, готовых к решению комплексных отраслевых задач.

**Институт заочного и вечернего обучения** динамично развивается: запуск новых образовательных программ позволил увеличить прием 2025–26 гг. до 572 человек. Впервые за последнее десятилетие общий контингент обучающихся ИЗВО превысил важную отметку в 1800 студентов.

Объединяющим принципом ВШТЭ является ставка на молодежную науку. Свыше 100 студентов участвуют в каждом крупном проекте, от «Лиственницы» до Инновационной недели с кейсами от ведущих компаний. Команды вуза — постоянные призеры и победители всероссийских инженерных, предпринимательских и спортивных состязаний.

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД — это живой организм, где глубокое отраслевое наследие и традиции инженерной школы служат надежной основой для инноваций. Синтез фундаментального образования, прикладных исследований в кооперации с промышленными партнерами и системной поддержкой студенческих инициатив позволяет вузу не только отвечать на вызовы времени, но и активно формировать технологическую повестку будущего России.



Оригинальное практическое исследование  
УДК 620.172.2  
DOI 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_8-18

# ГРАФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕМЕНТА 3D-МИКРОСТРУКТУРЫ В ПРОГРАММЕ BLENDER

Елизавета Артёмовна Портнягина, Николай Петрович Мидуков,  
Дмитрий Владиславович Худницкий

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

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

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

## АННОТАЦИЯ

Статья посвящена визуализации полученной микроструктуры картона в 3D-формате. Для этого использовались функции выдавливания по поверхностям в графических редакторах согласно запатентованному ранее методу. Области, которые являлись базой для создания 3D-модели фрагмента микроструктуры, были получены на основе изображений поперечного среза плоского слоя гофрокартона. Результатом графической обработки изображений областей среза стала твердотельная модель фрагмента микроструктуры, которая была экспортирована в формат STL. Результатом исследований стала графическая обработка STL модели в программе Blender для визуализации в VR-режиме. С этой целью были использованы дополнительные ресурсы программы Blender, в частности, была загружена ресурсная библиотека «аддон Blenderkit», что позволило подобрать необходимую текстуру 3D-модели микроструктуры для лучшего восприятия в VR-режиме. 3D-модель микроструктуры состоит из волокон, которые соединяются между собой, контактируя поверхностями. Для того чтобы определить наличие контактирующих поверхностей между двумя соседними волокнами в программе Blender, был выбран режим «рентгена», при котором объекты становятся прозрачными, но при этом визуализируются их контуры. Установленный масштаб, который был ранее определен по размерной шкале изображений срезов, полученных сканирующим электронным микроскопом, позволяет ориентироваться в размерах волокнистого материала и проводить корректные сравнительные измерения. Представленное исследование открывает новые знания о структуре и свойствах волокнистого композиционного материала, а настроенный VR-режим позволил оказаться «внутри» бумаги с использованием очков виртуальной реальности, обеспечивая возможность пространственного исследования микроскопических особенностей, недоступных при традиционных методах анализа.

**Ключевые слова:** микроструктура бумаги и картона, графическая обработка, волокна, свойства бумаги и картона, волокнистый целлюлозно-содержащий композиционный материал

**Для цитирования:** Портнягина Е. А., Мидуков Н. П., Худницкий Д. В. Графическая обработка элемента 3D-микроструктуры в программе Blender // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 8–18. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_8-18

## GRAPHICAL PROCESSING OF A 3D MICROSTRUCTURE ELEMENT IN BLENDER SOFTWARE

Elizaveta Artyomovna Portnyagina, Nikolai Petrovich Midukov,  
Dmitry Vladislavovich Khudnitsky

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

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

## ABSTRACT

This article focuses on the 3D visualization of the previously obtained cardboard microstructure. For this purpose, surface extrusion tools in graphics editors were used, following a previously patented method. The source data for



the 3D microstructure fragment model was obtained from cross-sectional images of the corrugated board liner. Following the graphical processing of slice images, a solid model of the microstructure fragment was generated and exported to the STL format. The research resulted in the graphical processing of the STL model in Blender to enable its visualization in virtual reality (VR). To achieve this, the Blenderkit add-on resource library was employed, allowing us to find a suitable texture for the 3D microstructure model to improve its visualization in virtual reality. The 3D model of the microstructure consists of fibers that interconnect through surface contact. In order to identify contacting surfaces between neighboring fibers in Blender, we enabled the X-Ray view mode. This mode makes objects transparent but keeps their outlines visible. The scale, calibrated using the scale bar from SEM slice images, provides a reference for the fiber material's dimensions and allows for correct comparative measurements. This study provides new insights into the structure and properties of a fibrous composite material. The configured VR mode enabled users to be «inside» the paper using virtual reality headsets, allowing for the spatial exploration of microscopic features inaccessible to conventional analysis methods.

**Keywords:** microstructure of paper and cardboard, graphic processing, fibers, properties of paper and cardboard, fibrous cellulose-containing composite material

**For citation:** Portnyagina E. A., Midukov N. P., Khudnitsky D. V. (2026) Graphical processing of a 3d-microstructure element in Blender software, Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 8–18. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_8-18

## ВВЕДЕНИЕ

Волокнистые целлюлозосодержащие композиционные материалы, к которым относятся бумага и картон, являются основой упаковки и печатной продукции. Их эксплуатационные свойства во многом определяются особенностями внутренней микроструктуры, формируемой на уровне отдельных волокон и контактирующих между собой поверхностей. Известно, что механическая прочность бумаги, способность выдерживать изгибающие и растягивающие нагрузки, а также пористость и влагопрочность целлюлозных материалов напрямую связаны с тем, как волокна распределены в объёме, и насколько развиты их межволоконные контакты. Однако изучение пространственного расположения волокон представляет собой сложную исследовательскую задачу, поскольку традиционные методы анализа дают лишь двумерную картину поперечного среза.

Многие научные центры в мире занимаются сегодня вопросами формирования 3D-модели микроструктуры бумаги и картона для прогнозирования и оценки её свойств. По наблюдениям скандинавских и немецких ученых [1, 2] волокна представляют собой правильную форму цилиндра, хотя из микроскопических снимков видно, что волокна имеют форму изогнутых лент.

В период пандемии были представлены результаты 3D-моделирования микроструктуры маски на основе волокнистого материала, которая должна была фильтровать частицы, сопоставимые с размерами вирусов [3]. Подобное представление волокон, конфигурация которых геометрически упрощена, встречается в работах [4, 5]. Результатами этих исследований стали тематические модели для расчёта и прогнозирования прочностных характеристик материалов. В работе [6],

несмотря на представление волокон в виде правильных цилиндров, выделены поверхности контакта, от которых в том числе зависит прочность бумаги и картона. Известно, что в зонах контакта образуются водородные связи, которые во многом определяют механические свойства указанных материалов. Кроме того, научная группа представила 3D-модели микроструктуры с учётом ориентации волокон, что, безусловно, является существенным шагом к отражению реальной микроструктуры в трёхмерном формате [7]. Среди важных достижений в области 3D-моделирования микроструктуры бумаги и картона в России можно выделить работы учёных из Архангельского университета [8]–[12]. Твёрдотельная модель микроструктуры бумаги была воссоздана с помощью программы, которая позволила учесть направления осей волокон, однако реальный размер и геометрия волокон в ней не отражены.

Наиболее близкая к реальной микроструктуре бумаги 3D-модель микроструктуры волокнистого материала была создана австрийскими исследователями (г. Грац) для оценки его воздухопроницаемости при различных условиях прессования [13, 14].

Развитие вычислительных технологий, совершенствование сканирующей электронной микроскопии, появление специализированного программного обеспечения открывают путь к более точному анализу структуры волокнистых материалов.

Известен метод цифровой сегментации, векторизации изображения микроструктуры бумаги при помощи программы Adobe Illustrator [15] и последующей 3D-реконструкции на основе векторизованных областей. На основании микроснимков поперечных срезов можно выделить отдельные

области, соответствующие волокнам, и сформировать STL-модели с помощью функции «выдавливание по сечениям» [16]. Полученные 3D-модели позволяют визуально оценить характер распределения волокон, пористость и наличие межволоконных контактов. Использование программы Blender и специализированных аддонов обеспечивает настройку материалов, масштабирование, прозрачность и визуализацию в режиме VR, что выводит восприятие микроструктуры бумаги и картона на новый уровень. В работе отмечено, что ранее была получена твердая трёхмерная модель фрагмента микроструктуры бумаги, экспортированная в формате STL, однако для корректного восприятия она нуждается в дополнительной графической обработке средствами Blender [17].

Визуализация волокон в пространстве позволяет не только формировать представление о структуре

листа, но и демонстрировать будущим инженерам, исследователям и студентам принципы межволоконного взаимодействия бумаги и картона. Благодаря внедрению VR-режима появляется возможность буквально «оказаться внутри бумаги» и наблюдать процессы формирования материала на микроуровне, что является одним из ключевых преимуществ подобного подхода.

Таким образом, необходимость комплексного изучения микроструктуры бумаги и картона, а также разработка визуальных методов её отображения в трёхмерном пространстве является актуальной задачей и соответствует современным направлениям развития отрасли. Проведённые исследования позволяют не только создавать реалистичные 3D-модели волокнистого материала, но и повышают понимание взаимосвязи структуры и эксплуатационных свойств целлюлозных композиционных материалов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является фрагмент микроструктуры плоского слоя гофрокартона, состоящего из двух слоёв, один из которых покровный. Покровный слой представляет собой целлюлозный композиционный материал, содержащий волокна сульфатной белёной хвойной и лиственной целлюлозы, а также химико-термомеханической массы. Значительная часть волокон проходит вторичную переработку, вследствие чего материал относится к категории макулатурных и соответствует марке МС-7.

Для экспериментальной части исследования был использован гофрокартон, произведённый на фабрике АО «Каравасво» (Московская область, Ногинский район, дер. Каравасво). Масса квадратного метра данного картона составляла 120 г/м<sup>2</sup>. Указанный материал применялся как плоский слой для гофрокартона с белым покровным слоем, что предопределяло требования к качеству его поверхности и к структуре.

Для изучения внутреннего строения материала был подготовлен поперечный срез фрагмента волокнистого композиционного материала. Образец был получен по запатентованному методу, основанному на поэтапной механической полировке и фиксации структуры. Такой подход позволяет избежать разрушения волокон и сохранить реальную геометрию микроструктуры. Визуализация микроструктуры поперечного среза осуществлялась ранее в Центре коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт» — КМ «Прометей» с использованием сканирующего электронного микроскопа [16]. Указанное оборудование обеспечивает получение высокодетализированных изображений

с возможностью регистрации геометрии отдельных волокон и пор, что было продемонстрировано в предыдущих исследованиях авторов.

На основе ранее полученных электронно-микроскопических изображений была сформирована трёхмерная модель фрагмента микроструктуры картона. Процесс 3D-моделирования включал выделение областей, соответствующих волокнам на микроснимке, и их последующее преобразование методом выдавливания по поверхностям. Формирование 3D-модели осуществлялось в соответствии с методикой, представленной в запатентованной разработке [16], что обеспечивает воспроизводимость процедуры и корректность геометрии микроструктуры. Итоговый фрагмент 3D-микроструктуры был экспортирован в формат STL для последующей графической обработки и визуализации в профессиональном графическом редакторе.

Полученная модель содержит информацию о расположении волокон, характере их сопряжения, степени уплотнения и о наличии мезо- и микропустот, что позволяет комплексно оценивать физическую структуру покровного слоя картона и исследовать взаимосвязь геометрических параметров с механическими свойствами материала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные ранее в работах изображения микроструктуры поперечного среза были использованы для формирования трёхмерной модели волокон покровного слоя картона. По своей геометрии волокна бумаги и картона представляют собой вытянутые плоские ленты, которые



соприкасаются между собой и формируют сложную, пространственно развитую волокнистую сеть. В более ранних исследованиях авторами была сформирована база микроснимков, полученных в результате последовательной полировки зафиксированных образцов, что обеспечило высокое качество визуализации внутренней структуры волокон.

Исследования проводились в рамках совместного научного проекта Санкт-Петербурга и Республики Беларусь<sup>1</sup>. Одним из ключевых результатов данного проекта стала трёхмерная модель микроструктуры волокнистого материала, представлявшая собой твердотельную реконструкцию фрагмента внутреннего слоя картона. После построения 3D-геометрии модель была экспортирована в программный векторный формат и сохранена в формате STL, что позволило использовать её для дальнейшей графической обработки и визуализации в профессиональном редакторе.

Загруженная в программу Blender модель оказалась трудной для визуального восприятия в исходном виде, поскольку представляла собой сложную совокупность пересекающихся элементов без выделенных контуров и визуальных акцентов. Поэтому для корректного анализа микроструктуры потребовались дополнительные графические преобразования, включая настройку цвета и прозрачности волокнистого материала, толщины линий и геометрических параметров отображения. Эти действия позволили улучшить визуальное восприятие микроструктуры и повысить понимание процессов взаимодействия между отдельными волокнами.

На рисунке 1 представлен фрагмент микроструктуры покровного слоя гофрокартона, загруженный в программу Blender в формате STL, до выполнения этапов графической обработки.

Для повышения качества визуализации микроструктуры и формирования реалистичного графического представления поверхности волокон в программу Blender был дополнительно загружен специализированный аддон (дополнительный программный модуль) BlenderKit, содержащий библиотеку материалов и текстур. Его установка осуществлялась из локального каталога с последующей активацией в разделе «Add-ons», что обеспечило доступ к расширенному набору материалов, в том числе к текстурам, позволяющим имитировать поверхность волокнистого картона. На рисунке 2 представлено окно настроек программы Blender с подтверждением установки и активации аддона.

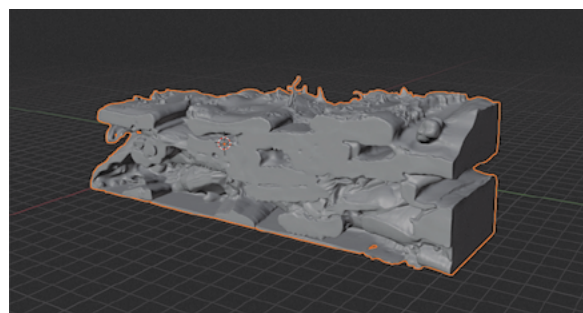


Рисунок 1. 3D-модель микроструктуры фрагмента покровного слоя гофрокартона

Figure 1. 3D model of the microstructure of a corrugated cardboard top liner fragment

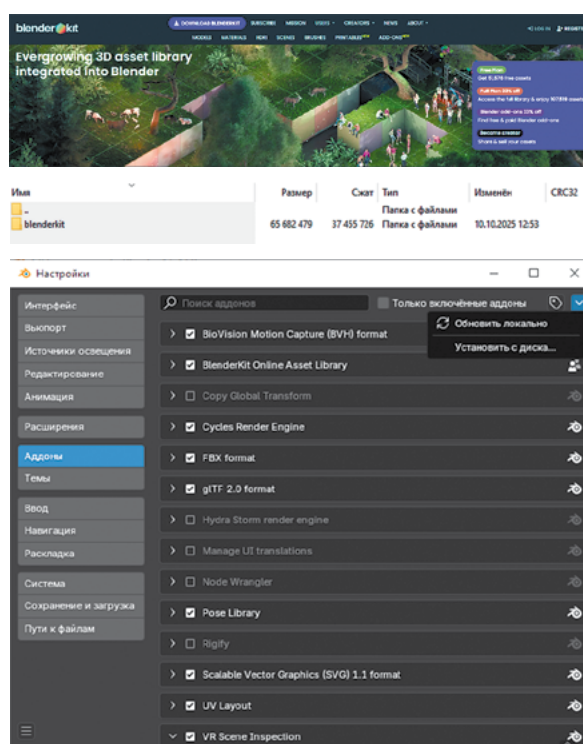
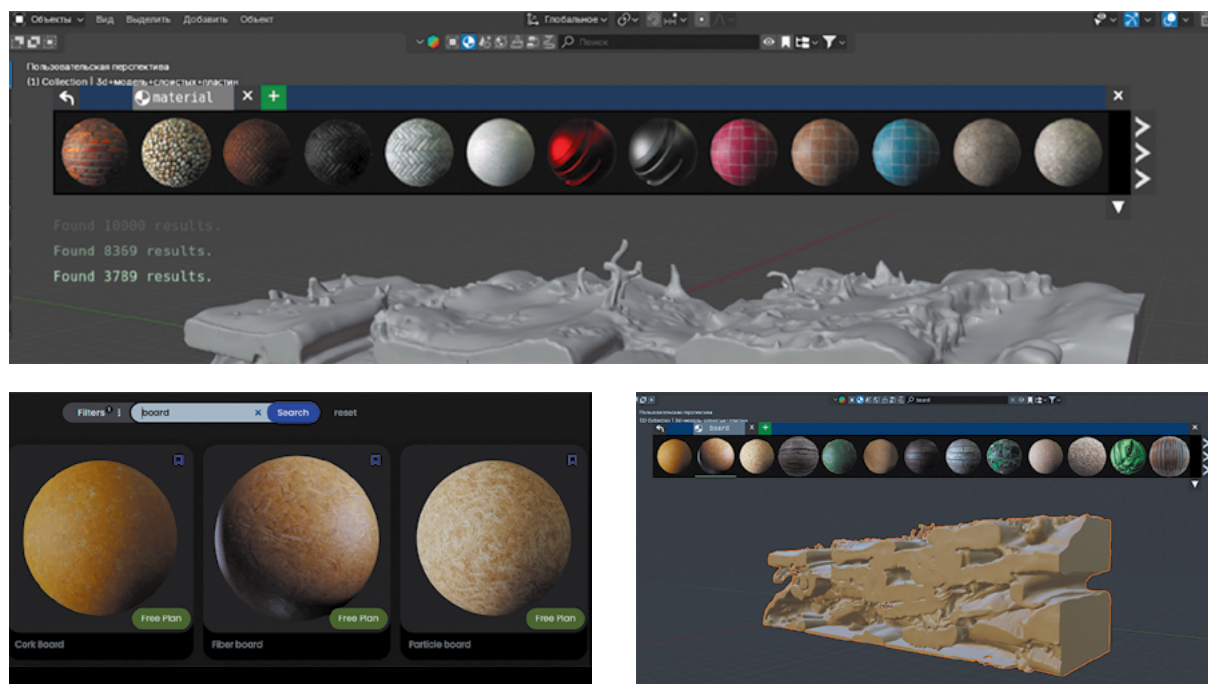


Рисунок 2. Окно настроек скачанного аддона Blender

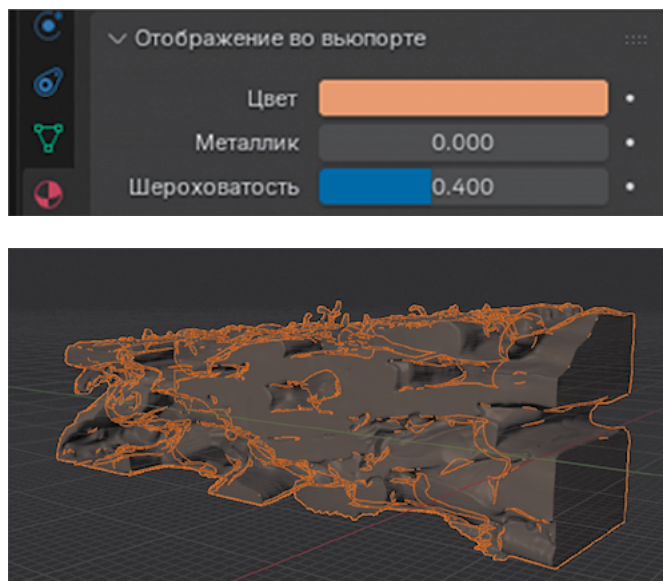
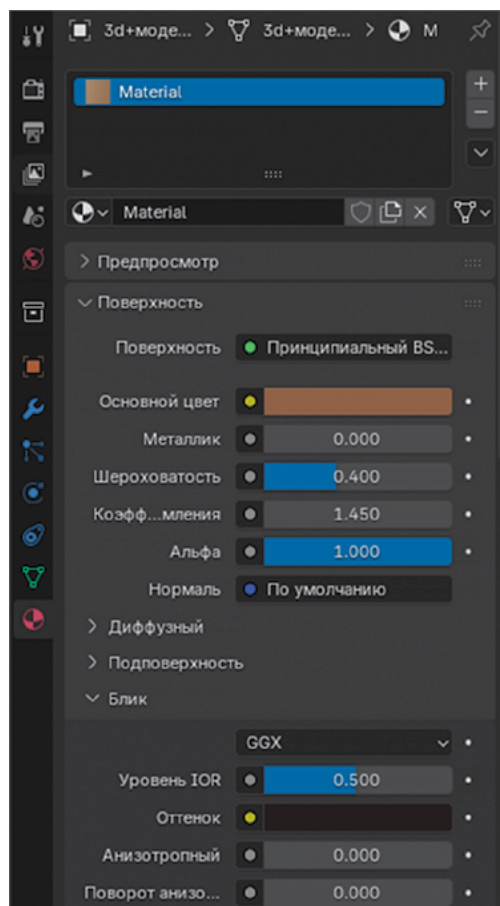
Figure 2. Settings window for the downloaded Blender add-on

После активации аддона BlenderKit был выполнен подбор графических материалов, визуально соответствующих структуре волокнистого композиционного материала. В библиотеке аддона представлены различные текстуры поверхностей целлюлозных, древесных и композиционных материалов, из которых была выбрана текстура, визуально наиболее приближённая к поверхности картона. Поиск текстуры осуществлялся

<sup>1</sup> Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь, на тему: «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалах».



**Рисунок 3.** Трёхмерная модель микроструктуры покровного слоя картона после применения выбранного текстурного материала  
**Figure 3.** A 3D model of the cardboard top layer microstructure after applying the selected texture material



**Рисунок 4.** Визуализация граней волокон в целлюлозном композиционном материале в программе Blender

**Figure 4.** Visualization of fiber edges in a cellulose composite material using Blender

по ключевым словам, характеризующим древесноволокнистые материалы (например *board*, *fiber*, *paper*), что позволило выделить подходящие варианты для дальнейшей визуализации.

На рисунке 3 приведён интерфейс выбора материалов в аддоне BlenderKit, а также варианты доступных текстур, соответствующих волокнистым плитным материалам (*fiber board*, *particle board* и др.). В нижней части рисунка представлена трёхмерная модель микроструктуры покровного слоя картона после применения выбранного текстурного материала. Наложение текстуры позволило существенно улучшить визуальную интерпретируемость структуры модели и повысить наглядность межволоконного взаимодействия.

Волокнистый целлюлозный композиционный материал представляет собой совокупность переплетённых между собой волокон, образующих устойчивую пространственную структуру. В процессе формирования материала между соседними волокнами возникают области контакта, по поверхности которых вероятнее всего формируются водородные связи, а также силы механического сцепления. Чем больше площадь таких областей контактов, тем выше прочностные и эксплуатационные характеристики конечного материала.

Визуализация микроструктуры бумаги и картона позволяет сформировать целостное представление о характере межволоконного взаимодействия. В программе Blender для этой цели предусмотрен специальный режим предварительного просмотра материалов, включающий отображение контуров и граней трёхмерной модели. В дополнение ко всему Blender позволяет настроить прозрачность исследуемого объекта, что облегчает восприятие внутренней структуры и пространственных взаимосвязей между волокнами [17].

На рисунке 4 представлен пример визуализации граней волокон в трёхмерной модели микроструктуры. Подобное графическое отображение позволяет визуально оценить контактирование волокон друг с другом, а также определить участки с недостаточным прилеганием поверхностей волокон. Такой подход особенно полезен при анализе структуры материала студентами и исследователями, поскольку позволяет сформировать корректное представление о процессах, проходящих внутри слоя, недоступных при двухмерном наблюдении.

Очевидно, что более развитые межволоконные контакты способствуют увеличению механической прочности картона. Кроме того, визуальный анализ позволяет выявить распределение пор в структуре материала, оценить их размеры и конфигурацию, что имеет важное значение для таких свойств, как воздухопроницаемость, впитываемость и др.

Для повышения наглядности микроструктуры волокнистого композиционного материала в программе Blender была выполнена настройка параметров визуализации модели в режиме просмотра. В частности, были изменены характеристики отображения материалов, такие как цвет, «коэффициент металличности» и шероховатость поверхности. Данные параметры позволяют акцентировать внимание на ключевых структурных элементах модели, выделить отдельные волокна и облегчить визуальное различение контактов между ними.

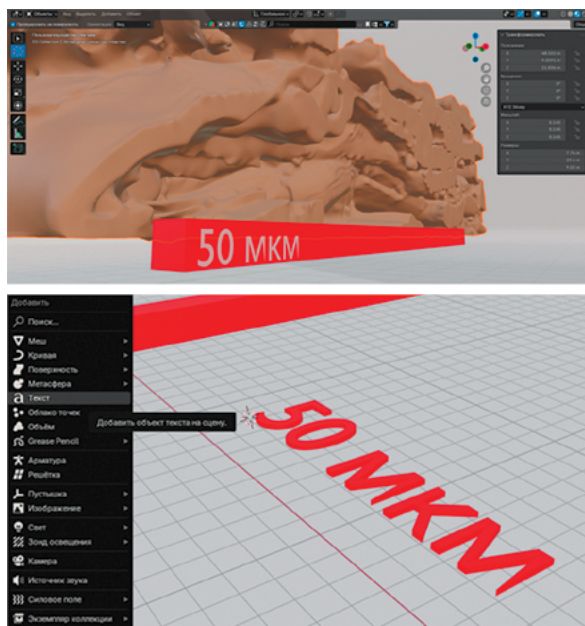
Внесённые изменения способствовали улучшению визуального восприятия пространственной формы волокон, что особенно важно на этапе предварительного анализа структурных особенностей материала.

Настройка цвета и текстуры позволили усилить визуальный контраст между твердотельными элементами микроструктуры, облегчая выявление дефектов, разрывов, пор и участков неплотного контакта близлежащих волокон. Таким образом, корректировка параметров отображения являлась необходимым этапом подготовки 3D-модели к дальнейшему анализу [18].

При создании трёхмерной модели на основе изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, важным этапом являлась корректная передача масштаба реального объекта. На каждом микроснимке в нижней части присутствовала масштабная линейка, определяющая размер исследуемой области. Она была использована в качестве основы для моделирования масштабной шкалы в Blender. Такой подход позволил обеспечить соответствие геометрических размеров трёхмерной модели фактическим размерам волокон бумаги и картона.

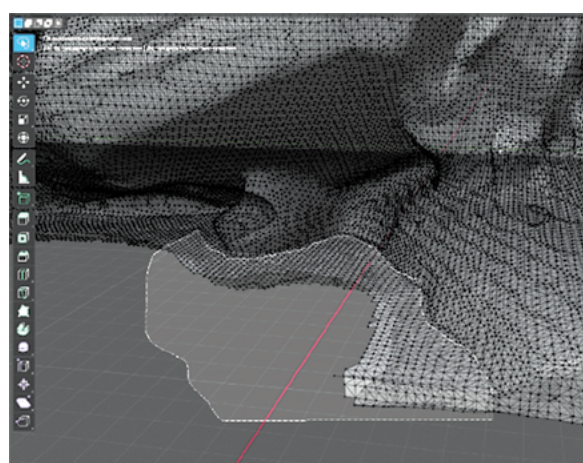
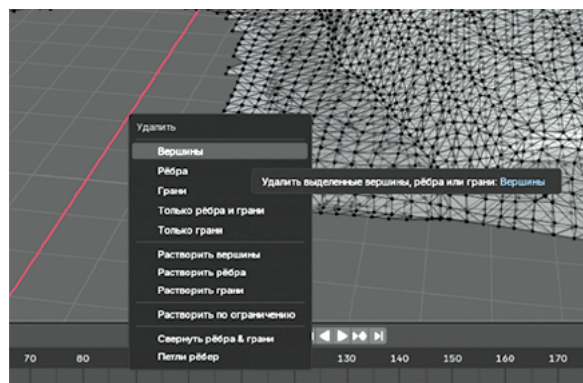
Для формирования масштабного индикатора в Blender были задействованы специальные инструменты добавления геометрических примитивов и текстовых объектов. На основании данных масштабной линейки был создан графический элемент — шкала длиной 50 мкм, окрашенная в контрастный красный цвет для обеспечения высокой видимости на фоне модели микроструктуры. Данный элемент представлен на рисунке 5. Наличие масштабной шкалы позволяет наглядно оценить пространственный объём изучаемого фрагмента микроструктуры покровного слоя гофрокартона.

Кроме того, масштабная линейка была размещена непосредственно в рабочем трёхмерном пространстве модели, в её нижней части, как показано на рисунке 5. Такое расположение наиболее удобно при визуальном анализе, а также при последующих графических преобразованиях и настройках визуализации объекта.



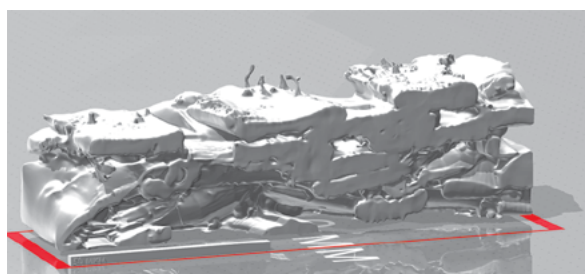
**Рисунок 5.** Масштабирование 3D-модели микроструктуры бумаги и картона

**Figure 5.** Scaling the 3D model of paper and cardboard microstructure



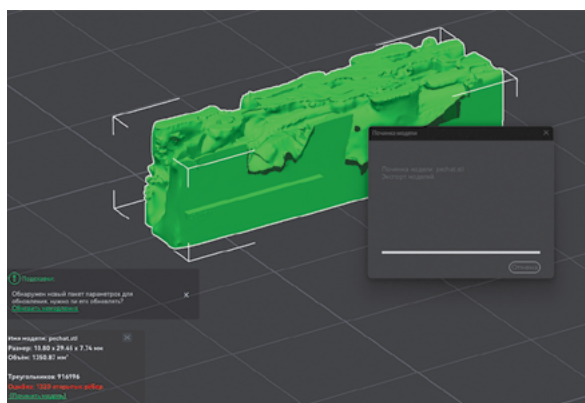
**Рисунок 6.** Удаление избыточных полигонов

**Figure 6.** Deleting excess polygons



**Рисунок 7.** Результат графической обработки фрагмента микроструктуры

**Figure 7.** The result of graphical processing of a microstructure fragment

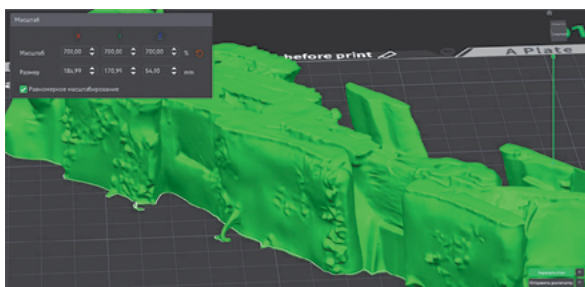


**Рисунок 8.** Процедура «починки» STL-модели фрагмента микроструктуры бумаги

**Figure 8.** Procedure for «repairing» an STL model of a paper microstructure fragment

Отредактированная в Blender STL-модель может содержать ряд геометрических дефектов, среди которых наиболее распространёнными являются локальные отверстия и разрывы в объёме волокнистого материала. Подобные дефекты возникают вследствие удаления отдельных полигонов в процессе корректировки модели и приводят к нарушению её целостности (см. рисунки 6–7). Кроме того, в ходе последующего экспорта STL-файла из Blender возможно изменение масштаба трёхмерной модели, что требует дополнительной проверки и уточнения размеров.

Для устранения выявленных ошибок и подготовки модели к физическому изготовлению была применена специализированная программа CreaLity Print, предназначенная для написания управляющего кода (G-code) и анализа корректности геометрии стереолитографического файла. В рабочую область CreaLity Print была загружена STL-модель, полученная после графической обработки в Blender. Программа позволяет автоматически проверить целостности поверхности, определить наличие разрывов и устранить их. Данная процедура представлена на рисунке 8.



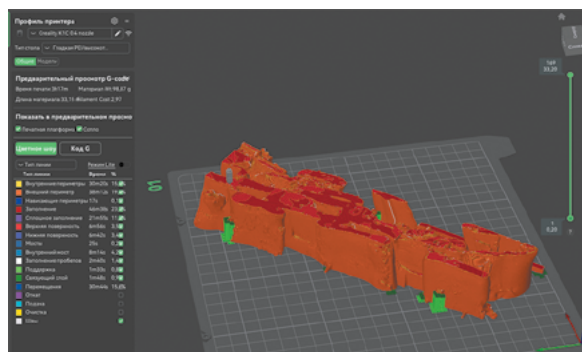
**Рисунок 9.** Увеличение масштаба фрагмента микроструктуры поверхности картона

**Figure 9.** Magnification of a cardboard surface microstructure fragment



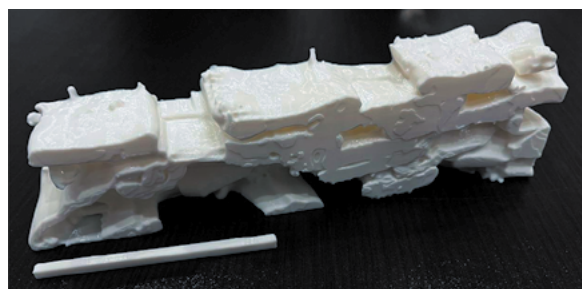
**Рисунок 11.** Процесс изготовления фрагмента микроструктуры картона

**Figure 11.** Manufacturing process of a cardboard microstructure fragment



**Рисунок 10.** Нарезка стола печати на слои

**Figure 10.** Print Bed Slicing



**Рисунок 12.** Готовая 3D-модель фрагмента микроструктуры покровного слоя гофрокартона

**Figure 12.** Completed 3D microstructure model of the corrugated board top liner

После проверки целостности STL-модели в программной среде Creality Print была выполнена подготовка объекта к физическому изготовлению с помощью 3D-принтера. На первом этапе осуществлялось масштабирование трёхмерной модели с сохранением пропорций и последующая корректировка её ориентации в рабочем пространстве. На рисунке 9 показан процесс увеличения размеров модели и её поворота, что позволило более подробно рассмотреть геометрию микроструктуры, оценить практически значимые элементы и убедиться в корректности их воспроизведения перед печатью.

Следующим этапом стала подготовка модели к слоистому изготовлению методом экструзионной (FDM) 3D-печати [19]. В рабочей среде были заданы параметры печати, соответствующие выбранному 3D-принтеру, и активирована функция автоматического формирования поддержек для участков с недостаточной площадью опоры. После этого была выполнена нарезка модели на слои (slicing), что позволило сгенерировать предварительный G-code, содержащий траекторию движения печатающей головки, скорость нанесения материала и параметры заполнения объёма [20]. На рисунке 10 представлен предварительный результат нарезки, включающий визуализацию слоевого построения модели и расчёт ожидаемого времени печати.

Таким образом, оба этапа — масштабирование и ориентация модели, а также формирование поддержек и получение управляющего кода — являются ключевыми этапами подготовки трёхмерной модели микроструктуры к последующему физическому изготовлению методом 3D-печати.

Заключительным этапом работы стала 3D-печать трёхмерной модели микроструктуры на 3D-принтере Creality K1C. После подготовки управляющий G-код был загружен в устройство для послойного изготовления фрагмента микроструктуры из полимерного материала. На рисунке 11 представлен вид рабочей зоны 3D-принтера в процессе формирования модели. В ходе печати происходило последовательное нанесение пластика с заданной толщиной слоя и заполнением внутренних областей, что позволило воспроизвести основные геометрические элементы микроструктуры.

Полученная печатная форма представляет собой увеличенную копию участка микроструктуры покровного слоя гофрокартона, на которой визуальны различимы детали внутреннего строения, включая каналы, области контактов и неровности поверхности [21]–[23]. Реализация физического образца позволяет проводить

дальнейшие исследования не только в цифровой среде, но и на материальном объекте, включая учебные демонстрации, экспериментальные измерения и сравнительный анализ результатов виртуальной и физической реконструкции (см. рисунок 12).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования была выполнена комплексная реконструкция микроструктуры покровного слоя гофрокартона на основе электронно-микроскопических изображений. По полученным микроснимкам была сформирована трёхмерная модель волокнистого композиционного материала, отражающая характер пространственного расположения волокон, контактных поверхностей и пор. Для повышения информативности визуализации в программе Blender были выполнены дополнительные графические процедуры, включающие настройку текстуры материалов, прозрачности, масштабирование, что позволило существенно повысить наглядность модели.

С использованием специализированного программного обеспечения была осуществлена подготовка модели к физическому изготовлению, откорректирована геометрия полигональной 3D-модели, сформированы поддержки и сгенерирован управляющий G-код. Заключительным этапом стал процесс трёхмерной печати фрагмента микроструктуры, что позволило получить образец и провести визуальную оценку реальных геометрических параметров структуры. Итоговый вид полученной физической модели представлен на рисунке 12.

Полученные результаты подтверждают возможность применения современных инструментов 3D-графики для анализа и визуализации структуры волокнистых композиционных материалов. Реализованный подход позволяет моделировать и исследовать внутренние элементы материала, изучать характер межволоконных взаимодействий, а также использовать созданные модели в образовательных и исследовательских целях. Таким образом, работа демонстрирует перспективность сочетания методов электронно-микроскопического анализа, трёхмерного моделирования и аддитивных технологий для изучения структуры бумаги и картона.

## Список литературы

1. Tojaga V., Kulachenko A., Östlund S., Christian T. Modeling multi-fracturing fibers in fiber networks using elastoplastic Timoshenko beam finite elements with embedded strong discontinuities — Formulation and staggered algorithm // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021. No. 384. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.cma. 2021.113 964.
2. Neumann M., Charry E. M., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via  $\mu$ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper // *Microscopy and Microanalysis*. 2021. No. 27. Pp. 1305–1315. DOI: 10.1017/S1431 927 621 012 563.
3. Wenjia Du, Iacoviello W., Du F., Fernandez T., Loureiro R., Brett D. J. L., Shearing P. R. Microstructure analysis and image-based modelling of face masks for COVID-19 virus protection // *Communications materials*. 2021. No. 2. Pp. 69–79. <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00160-z>.
4. Afrookhteh S. S., Jamali J., Shakeric M., Baniassadi M. Stochastic reconstruction of carbon fiber paper gas diffusion layers of PEECs: A comparative study // *Energy Equimen and System*. 2018. No. 1 (6). Pp. 51–59. DOI: 10.22 059/ees. 2018.30 612.
5. Borodulina S., Kulachenko A., Tjahjanto D. D. Constitutive modeling of a paper fiber in cyclic loading applications // *Computational Materials Science*, 2015. No. 110. Pp. 227–240. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci. 2015.08.039>.
6. Wicht D., Schneider M., Böhlke T. Anderson-accelerated polarization schemes for fast Fourier transform-based computational homogenization // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2021. No. 122. Pp. 287–231.
7. Lin B., Bai Y., Xu B.-X. Data-driven microstructure sensitivity study of fibrous paper materials // *Materials and Design*, 2021. No. 197. Pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matdes. 2020.109 193>.
8. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Характеристика структурно-размерных свойств волокон хвойной сульфатной целлюлозы с применением статистического моделирования. // *Хвойные бореальной зоны*. 2016. Том XXXVII. № 5–6. С. 333–337.
9. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Моделирование структуры бумажного листа. // *Лесной журнал*. 2017. № 2/356. С. 160–172 (Изв. высш. учеб. заведений).
10. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Методы анализа волокнистых структур с применением численных методов 3D моделирования. / *Макулатура как основополагающее сырье в развитии производства бумажно-картонной, гофрокартонной продукции. Новые технологии, оборудование, экология на производствах ЦБП: мат. и докл. 14-й Междун. науч.-техн. конфер. 23–24 мая 2013 г. Караваево*. С. 98–104.
11. Лебедев И. В., Казаков Я. В. Алгоритмы создания 3D модели целлюлозного волокна. / В сб. «Использование и разработка инновационных экологически безопасных технологий переработки макулатуры при производстве всего спектра бумажно-картонной продукции»: матер. и докл. 15-й Междун. науч.-техн. конфер. 29–30 мая 2014 г. Караваево. С. 59–67.
12. Kazakov Yakov, Lebedev Ivan, Guriev Timur. 3D-modelling of cellulose fibers. *Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings*, Darmstadt, 2016, pp. 189–192.
13. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Physics informed neural networks reveal valid models for reactive diffusion of volatiles through paper // *Chemical Engineering Science*. 2024. No 285. 12 p.



14. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Transport of Organic Volatiles through Paper: Physics-Informed Neural Networks for Solving Inverse and Forward Problems // *Transport in Porous Media*. 2022. No 1 (145), 589–612 pp.
15. Литвинов М. А., Григорьева П. А., Портнягина Е. А. Разработка алгоритмов для анализа пористости волокнистых целлюлозных материалов на основе обработки изображений микроструктуры // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна*. Серия 4. 2025. № 2. С. 90–92.
16. Патент № 2 795 190 Российская Федерация. Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала Бюл. № 17. Оpubл. 02.05.2023. / Мидуков Н. П., Куров В. С., Литвинов М. А., Зильберглейт М. А. 15 с.
17. Jason van Gumster. Blender Secrets: A Comprehensive Guide to Blender's Hidden Features. Amsterdam: Blender Foundation, 2023. 320 p.
18. Светлолобов А. Ю., Мидуков Н. П., Куров В. С., Колосова М. В. Метод и устройство для подготовки образцов бумаги и картона для визуализации микроструктуры поперечного среза // *Вестник СПбГУПТД*. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. № 3. С. 104–108.
19. Коротцов И. Г., Казанкова А. А. Сравнительный анализ программного средства Blender для 3d-моделирования // *Компьютерные и информационные науки*. 2022. № 4. С. 78–85.
20. Измайлов Д. В., Дрыгин Д. А., Ежова К. В. Анализ дефектов поверхности изделия при 3D-печати по их изображениям с использованием методов машинного обучения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 4. С. 552–559. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-4-552-559>.
21. Богаткин М. А. Особенности FDM 3D-печати: от идеи до готового изделия // *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2021. № 2. С. 45–52.
22. Давиденко А. Ю., Рязанова А. А. G-CODE для 3D-принтеров // *Молодежь и наука: шаг к успеху: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых*. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. Т. 4. С. 56–59.
23. Yibo Liao, Wenhao Li, Ziheng Zhan, Huigao Duan, Peng Liu, Yiqin Chen, Zhaolong Wang. 3D-Printed Complex Microstructures with a Self-Sacrificial Structure Enabled by Grayscale Polymerization and Ultrasonic Treatment // *ACS Omega* 2021 6 (28), 18 281–18 288. DOI: 10.1021/acsomega.1c02177.
2. Neumann M., Charry E. M., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via  $\mu$ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper. // *Microscopy and Microanalysis*. 2021;27:1305–1315. DOI: 10.1017/S1431927621012563.
3. Iacoviello W., Du F., Fernandez T., Loureiro R., Brett D. J. L., Shearing P. R. Microstructure analysis and image-based modelling of face masks for COVID-19 virus protection. // *Communications Materials*. 2021;2:69–79. <https://doi.org/10.1038/s43246-021-00160-z>.
4. Afrookhteh S. S., Jamali J., Shakeric M., Baniassadi M. Stochastic reconstruction of carbon fiber paper gas diffusion layers of PEFCs: A comparative study. // *Energy Equipment and System*. 2018; 1 (6):51–59. DOI: 10.22059/ees.2018.30612.
5. Borodulina S., Kulachenko A., Tjahjanto D. D. Constitutive modeling of a paper fiber in cyclic loading applications. // *Computational Materials Science*. 2015;110:227–240. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.08.039>.
6. Wicht D., Schneider M., Böhlke T. Anderson-accelerated polarization schemes for fast Fourier transform-based computational homogenization. // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2021;122:287–231.
7. Lin B., Bai Y., Xu B. X. Data-driven microstructure sensitivity study of fibrous paper materials. // *Materials and Design*. 2021;197:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109193>.
8. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Characteristics of structural-dimensional properties of coniferous sulfate cellulose fibers using statistical modeling // *Conifers of the Boreal Zone*. 2016;37 (5–6):333–337. (In Russ.)
9. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Modeling the structure of a paper sheet // *Forest Journal*. 2017;2 (356):160–172. (In Russ.)
10. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Methods for analyzing fibrous structures using numerical methods of 3D modeling. In: Waste paper as a fundamental raw material in the development of paper and cardboard, corrugated cardboard production. New technologies, equipment, ecology in the pulp and paper industry: materials and reports of the 14th International Scientific and Technical Conference, May 23–24, 2013. Karavaevo; 2013. p. 98–104. (In Russ.)
11. Lebedev I. V., Kazakov Y. V. Algorithms for creating a 3D model of cellulose fiber. In: Use and development of innovative environmentally friendly technologies for processing waste paper in the production of the entire range of paper and cardboard products: materials and reports of the 15th International Scientific and Technical Conference, May 29–30, 2014. Karavaevo; 2014. p. 59–67. (In Russ.)
12. Kazakov Y., Lebedev I., Guriev T. 3D-modelling of cellulose fibers. In: Progress in Paper Physics Seminar 2016 Conference Proceedings. Darmstadt; 2016. p. 189–192.
13. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Physics informed neural networks reveal valid models for reactive diffusion of volatiles through paper // *Chemical Engineering Science*. 2024;285:1–12.

## References

1. Tojaga V., Kulachenko A., Östlund S., Christian T. Modeling multi-fracturing fibers in fiber networks using elastoplastic Timoshenko beam finite elements with embedded strong discontinuities — Formulation and staggered algorithm. // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021; 384:1–18. DOI: 10.1016/j.cma.2021.113964.



14. Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. Transport of Organic Volatiles through Paper: Physics Informed Neural Networks for Solving Inverse and Forward Problems // *Transport in Porous Media*. 2022;145 (1):589–612.
15. Litvinov M. A., Grigorieva P. A., Portnyagina E. A. Development of algorithms for analyzing the porosity of fibrous cellulose materials based on microstructure image processing // *Bulletin of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Series 4*. 2025;2:90–92. (In Russ.)
16. Midukov N. P., Kurov V. S., Litvinov M. A., Zilbergleit M. A. Method for preparing microstructure for controlling parameters of fibrous cellulose-containing material. Patent RF, no. 2 795 190, 2023. (In Russ.)
17. Van Gumster J. *Blender Secrets: A Comprehensive Guide to Blender's Hidden Features*. Amsterdam: Blender Foundation; 2023.
18. Svetolobov A. Y., Midukov N. P., Kurov V. S., Kolosova M. V. Method and device for preparing paper and cardboard samples for visualization of cross-section microstructure // *Bulletin of SPbSUITD. Series 4: Industrial Technologies*. 2023;3:104–108. (In Russ.)
19. Korotstov I. G., Kazankova A. A. Comparative analysis of Blender software for 3D modeling // *Computer and Information Sciences*. 2022;4:78–85. (In Russ.)
20. Izmailov D. V., Drygin D. A., Ezhova K. V. Analysis of product surface defects during 3D printing based on their images using machine learning methods // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020;20 (4):552–559. (In Russ.)
21. Bogatkin M. A. Features of FDM 3D printing: from idea to finished product // *Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem*. 2021;2:45–52. (In Russ.)
22. Davidenko A. Y., Ryazanova A. A. G-CODE for 3D printers. In: *Youth and Science: Step to Success: collection of scientific articles of the 4th All-Russian Scientific Conference of promising developments of young scientists*. Kursk: South-west State University; 2020. Vol. 4. p. 56–59. (In Russ.)
23. Liao Y., Li W., Zhan Z., Duan H., Liu P., Chen Y., Wang Z. 3D-Printed Complex Microstructures with a Self-Sacrificial Structure Enabled by Grayscale Polymerization and Ultrasonic Treatment // *ACS Omega* 2021; 6 (28), 18 281–18 288. DOI: 10.1021/acsomega.1c02177. DOI: 10.1021/acsomega.1c02177.

## ■ Информация об авторах

**Портнягина Елизавета Артёмовна**, студентка Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198 095; ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN-код: 6338–9305.

**Мидуков Николай Петрович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного

университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198 095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-код 1021–6266.

**Худницкий Дмитрий Владиславович**, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, 198 095; ORCID: 0009-0004-2024-9222, SPIN-код: 3086–9764.

## ■ Information about the authors

**Portnyagina Elizaveta Artyomovna**, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198 095; ORCID: 0009-0003-7018-348X, SPIN- code: 6338–9305.

**Nikolai Petrovich Midukov**, Dr. Sci in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technologies of the Higher School

of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198 095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-code 1021–6266.

**Khudnitsky Dmitry Vladislavovich**, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198 095



# РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ БРАКА В СРЕДЕ CLIPS

Ирина Викторовна Ремизова, Виктория Дмитриевна Милехина

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

© Ремизова И. В., Милехина В. Д., 2026

Автор-корреспондент: И. В. Ремизова, e-mail: hvd.02@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Статья посвящена разработке прототипа экспертной системы, направленной на оптимизацию режимов камерной сушки пиломатериалов хвойных пород с целью снижения уровня брака и повышения качества конечной продукции. Процесс сушки древесины является одним из наиболее энергоемких и критически важных этапов в деревообработке. При этом традиционные методы выбора режимов, основанные на требованиях ГОСТ 19773–84 и субъективном опыте операторов, нередко приводят к появлению дефектов, таких как растрескивание, коробление и потемнение. Основной целью исследования стала разработка прототипа экспертной системы на базе среды CLIPS, позволяющей автоматизировать выбор температурно-влажностных режимов сушки. В ходе работы была создана структура базы знаний, использующая шаблоны (deftemplate) и факты (defacts), которые описывают параметры сушки — температуру, психрометрическую разность и степень насыщенности — в зависимости от вида древесины, толщины пиломатериалов, начальной влажности и необходимого качества продукции (мягкий, нормальный или форсированный режим). Механизм логического вывода, реализованный через правила (defrule), предоставляет системе возможность генерировать индивидуальные рекомендации на основе данных, введенных пользователем. Новизна подхода заключается в интеграции стандартизированных данных и экспертных знаний в единую систему, что позволяет минимизировать влияние человеческого фактора, повысить объяснимость технологического процесса и сократить количество брака. Приведены примеры разработки программного кода для решения поставленной задачи. Результаты исследования демонстрируют перспективность применения экспертных систем для стандартизации и автоматизации процессов сушки древесины, а также возможность дальнейшего масштабирования для включения режимов сушки лиственных пород и интеграции с системами управления сушильными камерами в реальном времени.

**Ключевые слова:** экспертная система, база знаний, сушка пиломатериалов, среда разработки CLIPS, автоматизация процессов сушки

**Для цитирования:** Ремизова И. В., Милехина В. Д. Разработка экспертной системы для оптимизации режима сушки пиломатериалов с целью минимизации брака в среде CLIPS // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 19–27. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_19-27

## DESIGNING A CLIPS-BASED EXPERT SYSTEM TO OPTIMIZE SAWN TIMBER DRYING SCHEDULES AND MINIMIZE WASTE

Irina Viktorovna Remizova, Viktoria Dmitrievna Milekhina

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

Corresponding author: I. V. Remizova, e-mail: hvd.02@mail.ru

## ABSTRACT

This paper presents the development of an expert system prototype designed to optimize the chamber drying schedules for softwood sawn timber, aiming to reduce waste and improve final product quality. The wood drying process is one of the most energy-intensive and critical stages in wood processing. At the same time, conventional approaches



to setting drying regimes, which rely on the GOST 19773–84 standard and operators' subjective judgment, frequently result in defects like cracking, warping, and darkening. The main goal of the study was to create a CLIPS-based expert system prototype capable of automating the choice of temperature-humidity drying schedules. During the development, the knowledge base structure was implemented using CLIPS templates (deftemplate) and fact lists (deffacts). This structure encodes the drying parameters (temperature, psychrometric difference, and saturation degree) as functions of the wood type, sawn timber thickness, initial moisture, and the target product quality, which corresponds to a soft, normal, or intensified drying parameters. The logical inference mechanism, realized through production rules (defrule), enables the system to generate tailored recommendations from the data supplied by the user. The novelty of the approach lies in the integration of standardized data and expert knowledge into a unified system. This integration minimizes the influence of the human factor, enhances the explainability of the technological process, and reduces the defect rate. Examples of the source code implementation for solving the given task are presented. The results indicate the feasibility of expert systems to standardize and automate wood drying, with potential for scaling to hardwoods and real-time chamber control integration.

**Keywords:** expert system, database, sawn timber drying, CLIPS development environment, drying process automation

**For citation:** Remizova I. V., Milekhina V. D. (2026) Development of an expert system for optimizing the drying mode of sawn timber in order to minimize defects in the CLIPS environment, Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 19–27. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_19-27

## ВВЕДЕНИЕ

Цель данного исследования — разработка прототипа экспертной системы на базе среды CLIPS для автоматизированного выбора оптимальных температурно-влажностных режимов сушки пиломатериалов хвойных пород, обеспечивающей снижение брака, повышение качества продукции и минимизацию влияния человеческого фактора на технологический процесс.

В рамках исследования поставлены **задачи**: формализации знаний на основании технической литературы и сведений ГОСТ для создания базы знаний экспертной системы. Разработка базы знаний и базы данных, в том числе создание шаблонов и фактов в среде CLIPS, отражающих параметры режимов сушки (температура, степень насыщенности,

психрометрическая разность) для различных категорий древесины и толщины пиломатериалов. Реализация механизма логического вывода посредством написания правил для генерации рекомендаций по режимам сушки на основе входных данных пользователя. Проверка работоспособности прототипа и оценка эффективности системы по критериям снижения субъективного фактора, повышения объяснимости и сокращения брака.

**Предметом исследования** является процесс камерной сушки пиломатериалов хвойных пород (сосна, ель, пихта, кедр) с акцентом на формализацию и автоматизацию выбора температурно-влажностных режимов на основе требований ГОСТ и экспертных знаний.

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Сушка древесины — один из наиболее энергоёмких и критичных этапов деревообработки, где высок риск возникновения дефектов (растрескивание, коробление, потемнение). Существующие методы подбора режимов сушки (опыт операторов, стандартные таблицы ГОСТ) неадаптивны, зависят от человеческого фактора и не обеспечивают единой формализованной системы. Разработка экспертной системы позволит стандартизировать процесс сушки, снизить количество брака, повысить качество готовой продукции, минимизировать материальные потери.

## НОВИЗНА

Для задачи сушки пиломатериалов предложено использовать экспертную систему на базе CLIPS, обеспечивающую формализацию и автоматизацию выбора режимов

сушки. Создана структура базы знаний, объединяющая требования ГОСТ 19773–84 и опыт специалистов, что позволяет генерировать адаптивные рекомендации. Система предоставляет аргументированные рекомендации, что отличает её от традиционных «чёрных ящиков» автоматизированных систем. Разработанный прототип может быть расширен для включения режимов сушки лиственных пород и интеграции с системами автоматизированного управления сушильными камерами в реальном времени.

Древесина относится к гигроскопичным материалам и при изменении влажности окружающей среды взаимодействует с воздухом поглощая или отдавая влагу. Данный процесс продолжается, пока не наступает баланс между влажностью древесины и окружающей среды. В зависимости от колебаний относительной влажности меняются и размеры изделий из древесины. Заданное



и равномерное содержание влаги в древесине необходимо для правильной обработки, склеивания и отделки продукции.

Процесс сушки древесины — один из самых энергоемких и критичных этапов, где легко возникают дефекты. Режим сушки зависит от породы, размеров, влажности и назначения высушиваемых пиломатериалов. Систематизация накопленного опыта и принятых стандартов служит ключевой задачей для оптимизации данного этапа производства и сокращения брака продукции [1].

К преимуществам сушки относятся уменьшение веса, повышение прочности и устойчивости к биологическому разрушению. По этим причинам пиломатериалы необходимо высушивать перед использованием в дальнейшем производстве. Выделяют два основных способа сушки древесины: воздушная сушка и сушка в печи.

Воздушная сушка пиломатериалов подразумевает естественный процесс высушивания на открытом воздухе в течение длительного времени. Он зависит от погодных условий, является нестабильным и неконтролируемым. Кроме того, этот метод требует значительных пространственных, временных и, следовательно, финансовых затрат.

Сушка в специальной печи (камерная сушка) тщательно контролируется и происходит гораздо быстрее. Древесина находится в сушильной камере, где регулируются циркуляция воздуха, параметры влажности и температуры. Это позволяет снизить влажность древесины до нужного уровня без каких-либо дефектов, связанных с сушкой [2].

В настоящее время для задачи сушки пиломатериалов широко используются стандартные режимы по ГОСТ, опыт операторов и технологические регламенты производства. Однако эти методы имеют ограничения, такие как не адаптивность, зависимость от человеческого фактора, отсутствие объяснимости и единой, формализованной системы.

#### АРХИТЕКТУРА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Применение интеллектуальных технологий стало востребованным в различных отраслях производства. Одним из основополагающих аспектов развития интеллектуальных технологий является использование интеллектуальных информационных или экспертных систем [3]. Экспертная система — это информационная система, имитирующая аналитические рассуждения специалиста в конкретной области для решения сложных задач на основе накопленных знаний [4].

Экспертная система реализует формализацию и применение опыта специалистов в узкой предметной области, манипулируя символическими значениями. Ее ключевой функцией является решение неформализованных задач с помощью логического вывода на основе базы знаний и предоставление аргументированных рекомендаций, которые моделируют компетентность специалиста.

Ключевые компоненты экспертной системы:

- База знаний — это структурированное хранилище информации в конкретной предметной области, представленное в виде совокупности фактов и правил.
- Механизм вывода — программный модуль, реализующий алгоритмы рассуждения и принятия решений на основе известных правил.
- Пользовательский интерфейс — функционал, позволяющий взаимодействовать пользователю с системой [5].

Одной из первых разработанных сред для создания экспертных систем является программная среда CLIPS (C Language Integrated Production System). Первый прототип CLIPS разработан в 1985 году в космическом центре NASA, США. На текущий момент CLIPS представляет собой востребованный инструмент создания экспертных систем с бесплатно распространяемым, доступным исходным кодом [6].

В данной работе предлагается при использовании экспертной системы, созданной в среде CLIPS, сформировать подход к формализации правил выбора температурно-влажностного режима сушки пиломатериалов опираясь на данные ГОСТ и технической литературы.

#### РАЗРАБОТКА БАЗЫ ЗНАНИЙ И БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

При разработке экспертной системы необходимо формализовать полученную информацию, то есть построить базу знаний и базу данных. В качестве экспертных данных используется ГОСТ 19773–84 о режимах низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов из древесины сосны, ели, пихты и кедра в камере периодического действия [7]. Камера периодического действия — это тип сушильного оборудования, в котором процесс сушки протекает циклически (периодами) [8].

Режим сушки древесины — низкотемпературный или высокотемпературный — устанавливается в соответствии с требованиями к конечной продукции и видом используемой древесины. При низкотемпературном режиме выделяют три категории сушки: мягкая (М) — бездефектная сушка материалов с сохранением первоначальных свойств, нормальная (Н) — бездефектная сушка с сохранением прочности, но с возможными изменениями цвета материалов, форсированная (Ф) — сушка



пиломатериалов при некотором снижении прочности на скалывание и сопротивление раскалыванию с возможным потемнением древесины.

Параметрами, характеризующими режимы сушки, являются температура  $t$ , степень насыщенности  $\phi$  и психрометрическая разность  $\Delta t = t - t_m$ , где  $t_m$  — температура смоченного термометра психрометра.

Режим сушки пиломатериалов в паровоздушной камере периодического действия характеризуется состоянием сушильного агента перед подачей его на высушиваемый материал. Это состояние изменяют периодически, по ступеням, в зависимости от влажности древесины. Влажность, при которой переходят со ступени на ступень, называют переходной влажностью. Число ступеней и значения переходной влажности устанавливают по таблицам режимов. Процесс сушки прекращают при достижении древесиной в камере, заданной средней конечной влажности [7].

В таблице 1 рассмотрен пример заполнения базы знаний для заданных параметров породы, толщины и начальной влажности. В ней наглядно представлены рекомендуемые параметры сушки для оператора при выборе заданного качества пиломатериалов.

В данной модели экспертной системы за основной параметр принимается качество конечного продукта, которое технолог устанавливает перед началом процесса сушки. Для достижения высокого качества предпочтителен мягкий режим сушки, способствующий максимальному сохранению исходных характеристик древесины. В случае выбора низкого качества потребуются применение форсированного режима, что может привести к частичному снижению прочности пиломатериалов и возможному потемнению древесины. К дополнительным параметрам относятся текущие характеристики древесины — порода, толщина и начальная влажность.

Следующим этапом разработки экспертной системы является создание базы данных на основе указанных параметров в базе знаний. В таблице 2 приведены значения характеристик влажности и параметров режимов сушки [7].

Структура предметной области, соответствующая базе знаний и параметрам базы данных, применяется для внесения данных в среду разработки CLIPS.

## РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В СРЕДЕ CLIPS

В первую очередь необходимо внести основные параметры и их значения в среду CLIPS. Для определения структуры фактов используется конструкция `deftemplate`.

Шаблон `deftemplate` является декларативной конструкцией в системе CLIPS, предназначенной для определения структурированных фактов. С точки зрения формальных систем, `deftemplate` задаёт типовую схему элементов рабочей памяти, обеспечивая структурированную организацию знаний [9].

Для параметров процесса выделено три шаблона, а именно пиломатериалы, режим сушки, рекомендации, представленные на рисунках 1–3 соответственно. Каждому режиму сушки — мягкий, нормальный и форсированный — поставлено в соответствие числовое значение. Аналогичным способом в системе хранятся и типы древесины.

Следующим шагом реализации модели является внесение фактов на основе таблицы базы данных с помощью конструкции `defacts` [9]. На рисунке 4 приведен пример заполнения факта для мягкого режима при толщине пиломатериала до 22 мм и влажности до 20%.

Подобным образом заполняются оставшиеся факты в формате «шаблон-факты», отражающие актуальные значения технологического процесса.

**Таблица 1.** Параметры сушки для заданных параметров породы, толщины и начальной влажности

**Table 1.** Drying parameters for given wood species, thickness, and initial moisture content

| Основной параметр                          | Дополнительные параметры       | Рекомендация        | Рекомендуемые параметры сушки                                 |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------|
| Высокое качество пиломатериалов            | Порода — сосна<br>Толщина — 23 | Мягкий режим        | $t, C^{\circ}=77$<br>$\Delta t, C^{\circ}=25$<br>$\phi=0,29$  |
| Хорошее качество пиломатериалов            | Начальная влажность — 19       | Нормальный режим    | $t, C^{\circ}=105$<br>$\Delta t, C^{\circ}=33$<br>$\phi=0,26$ |
| Удовлетворительное качество пиломатериалов |                                | Форсированный режим | $t, C^{\circ}=123$<br>$\Delta t, C^{\circ}=41$<br>$\phi=0,22$ |



Таблица 2. База данных

Table 2. Database

| Порода                             | Качество | Влажность, %        | Параметры режима     | Толщина, мм          |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |
|------------------------------------|----------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|
|                                    |          |                     |                      | до 22                | св. 22 до 25         | св. 25 до 32      | св. 32 до 40      | св. 40 до 50      | св. 50 до 60      | св. 60 до 75      | св. 75 до 100     |                  |                 |
| Хвойные (сосна, ель, пихта и кедр) | Высокое  | Мягкий режим        |                      |                      |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |
|                                    |          | <20                 | t, C°<br>Δt, C°<br>φ | 77<br>26<br>0,27     | 77<br>25<br>0,29     | 77<br>24<br>0,31  | 75<br>24<br>0,30  | 75<br>24<br>0,30  | 75<br>24<br>0,30  | 70<br>21<br>0,33  | 70<br>20<br>0,35  |                  |                 |
|                                    |          |                     |                      | 20–35                | 61<br>10<br>0,59     | 61<br>9<br>0,62   | 61<br>8<br>0,66   | 58<br>7<br>0,69   | 58<br>7<br>0,69   | 58<br>7<br>0,69   | 55<br>6<br>0,72   | 55<br>5<br>0,76  |                 |
|                                    |          |                     |                      |                      | >35                  | 57<br>6<br>0,73   | 57<br>5<br>0,77   | 57<br>4<br>0,81   | 55<br>4<br>0,81   | 55<br>4<br>0,81   | 55<br>4<br>0,81   | 52<br>3<br>0,84  | 52<br>2<br>0,90 |
|                                    |          | Нормальный режим    |                      |                      |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |
|                                    |          | <25                 |                      | t, C°<br>Δt, C°<br>φ | 110<br>36<br>0,24    | 105<br>33<br>0,26 | 105<br>32<br>0,27 | 100<br>30<br>0,29 | 96<br>28<br>0,31  | 94<br>27<br>0,32  | 85<br>24<br>0,33  | 75<br>22<br>0,34 |                 |
|                                    |          |                     |                      |                      | 25–35                | 88<br>14<br>0,55  | 84<br>12<br>0,59  | 84<br>11<br>0,62  | 80<br>10<br>0,64  | 77<br>9<br>0,66   | 75<br>8<br>0,70   | 68<br>7<br>0,71  | 58<br>5<br>0,77 |
|                                    |          |                     |                      |                      |                      | >35               | 83<br>9<br>0,68   | 79<br>7<br>0,73   | 79<br>6<br>0,77   | 75<br>5<br>0,80   | 73<br>5<br>0,80   | 71<br>4<br>0,83  | 64<br>3<br>0,86 |
|                                    |          | Форсированный режим |                      |                      |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |
|                                    |          | <25                 |                      |                      | t, C°<br>Δt, C°<br>φ | 125<br>42<br>0,21 | 123<br>41<br>0,22 | 123<br>39<br>0,24 | 120<br>37<br>0,25 | 115<br>36<br>0,25 | 110<br>32<br>0,29 | 98<br>29<br>0,30 | -<br>-<br>-     |
|                                    | 25–35    |                     |                      |                      |                      | 99<br>16<br>0,54  | 97<br>15<br>0,55  | 97<br>13<br>0,60  | 95<br>12<br>0,62  | 92<br>11<br>0,64  | 88<br>10<br>0,66  | 78<br>9<br>0,66  | -<br>-<br>-     |
|                                    |          |                     | >35                  |                      |                      | 94<br>11<br>0,65  | 92<br>10<br>0,67  | 92<br>8<br>0,73   | 90<br>7<br>0,75   | 87<br>6<br>0,78   | 83<br>5<br>0,80   | 73<br>4<br>0,84  | -<br>-<br>-     |
|                                    |          |                     |                      |                      |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |
|                                    |          |                     |                      |                      |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |
|                                    |          |                     |                      |                      |                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                  |                 |

```
(deftemplate lumber
  (slot woodSpecies)
  (slot thickness)
  (slot quality)
  (slot initialMoisture)
)
```

Рисунок 1. Шаблон для параметра: пиломатериалы

Figure 1. Parameter template: sawn timber

Знания в определенной предметной области в системе CLIPS представлены в виде правил, состоящих из предпосылок и действий. Предпосылки определяют условия применимости правил, которые задают последовательность шагов для конкретного случая [10]. Правила формулируются в формате «ЕСЛИ-ТО» и реализуются с помощью команды `defrule`, что позволяет создавать алгоритмы для записи новых фактов и предоставления рекомендаций [9].

Для решаемой задачи создано правило, сравнивающее введенные данные пользователя о пиломатериалах и требуемое качество с тем, что описано

```
(deftemplate recommendation
  (slot woodSpecies)
  (slot categoryMode)
  (slot temperature)
  (slot psychometricDifference)
  (slot degreeOfSaturation)
  (slot explanation)
)
```

Рисунок 2. Шаблон для параметра: режимы сушки

Figure 2. Parameter template: drying schedule

```
(deftemplate drying_mode
  (slot id_mode)
  (slot categoryMode)
  (slot woodSpecies)
  (slot minthickness)
  (slot maxthickness)
  (slot minMoisture)
  (slot maxMoisture)
  (slot temperature)
  (slot psychometricDifference)
  (slot degreeOfSaturation)
  (slot description)
)
```

Рисунок 3. Шаблон для параметра: рекомендации

Figure 3. Parameter template: recommendations

```
(def facts drying_modes
  (drying_mode (id_mode 1) (categoryMode 1) (woodSpecies 1)
    (minthickness 0) (maxthickness 22) (minMoisture 0) (maxMoisture 20)
    (temperature 77) (psychometricDifference 26) (degreeOfSaturation 0.27)
    (description "Мягкий режим для сосны высокого качества"))
)
```

Рисунок 4. Пример заполнения факта для мягкого режима

Figure 4. Sample entry for the Soft mode parameter

```
(defrule find_drying_step
  (lumber (woodSpecies ?woodSpecies) (thickness ?thickness) (initialMoisture ?initialMoisture))
  (selected_mode (categoryMode ?category))
  (drying_mode (id_mode ?id) (categoryMode ?category) (woodSpecies ?woodSpecies)
    (minthickness ?min_thick) (maxthickness ?max_thick)
    (minMoisture ?min_moist) (maxMoisture ?max_moist)
    (temperature ?temp) (psychometricDifference ?psych_diff)
    (degreeOfSaturation ?saturation) (description ?desc))
  (test (and (>= ?max_thick ?thickness)
    (<= ?min_thick ?thickness)
    (>= ?max_moist ?initialMoisture)
    (>= ?initialMoisture ?min_moist)))
  =>
  (assert (recommendation (woodSpecies ?woodSpecies)
    (categoryMode ?category)
    (temperature ?temp)
    (psychometricDifference ?psych_diff)
    (degreeOfSaturation ?saturation)
    (explanation ?desc)))

  (printout t "=== НАЙДЕН ПОДХОДЯЩИЙ РЕЖИМ СУШКИ ===" crlf)
  (printout t "ID режима: " ?id crlf)
  (printout t "Температура: " ?temp "°C" crlf)
  (printout t "Психометрическая разность: " ?psych_diff "°C" crlf)
  (printout t "Степень насыщенности: " ?saturation crlf)
  (printout t "Описание: " ?desc crlf crlf)
)
```

Рисунок 5. Правило технологического процесса сушки

Figure 5. Drying process rule

в базе данных, с последующей выдачей рекомендаций на основании проанализированной информации. На рисунке 5 представлен пример полученного правила для технологического процесса сушки.

Работоспособность описанных конструкций кода проверяется с помощью команд `reset` (очистка памяти и перезапуск процесса) и `run` (запуск кода). Результат, полученный для приведенного примера, представлен ниже на рисунке 6.

В верхней части экрана выведена информация по настройке параметров процесса сушки для получения древесины хорошего качества. В нижней части расположены зафиксированные и созданные факты.

В ходе использования экспертной системы могут возникнуть ситуации, когда входные параметры сушки, такие как порода, толщина, начальная влажность и требуемое качество, не соответствуют строго одному из заранее определённых режимов

или противоречат друг другу, находясь на границе нескольких категорий. В таких обстоятельствах система, вместо того чтобы предоставить стандартную рекомендацию, может выводить специальное сообщение, подчеркивающее неоднозначность классификации. В этом сообщении будет представлена информация о диапазонах параметров, в которых находятся введённые данные, а также о конкретном параметре, превышающем установленные пределы. Например, система может обнаружить, что указанная толщина пиломатериала находится на границе между двумя категориями, и в таком случае предложит пользователю уточнить исходные данные или предоставит обобщённую рекомендацию, основанную на усреднённых или интерполированных значениях параметров из смежных режимов. Данный подход увеличивает адаптивность системы, помогает избежать ошибочных рекомендаций в нестандартных условиях и содействует принятию более обоснованных технологических решений.

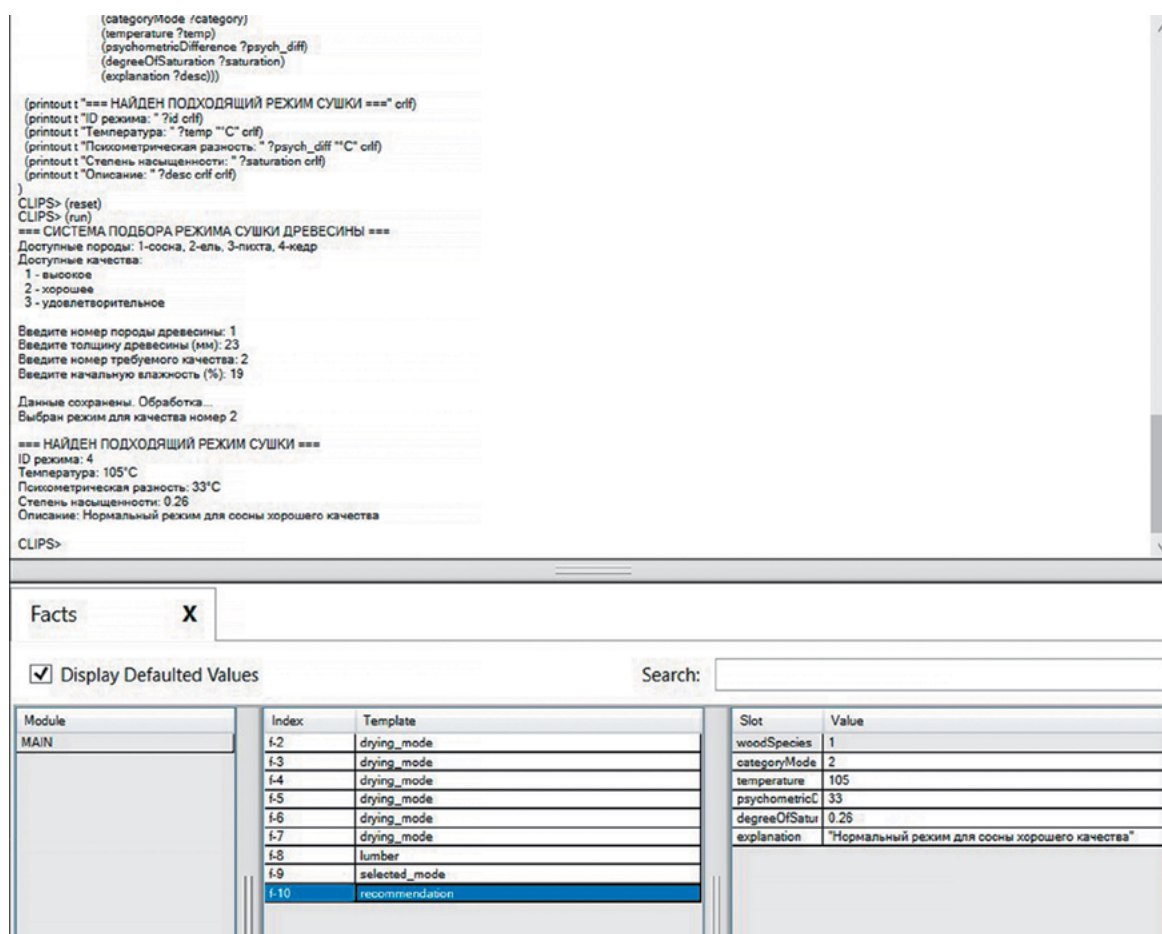


Рисунок 6. Результат проверки работы экспертной системы  
Figure 6. Results of the expert system operation verification

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В ходе проведенного исследования был успешно разработан и протестирован функциональный прототип экспертной системы для выбора оптимального режима сушки пиломатериалов хвойных пород в среде CLIPS. Основным результатом работы является формализованная база знаний, содержащая правила и факты, соответствующие требованиям ГОСТ 19773–84, и механизм логического вывода, обеспечивающий на их основе генерацию рекомендаций.

Реализованная модель демонстрирует свою работоспособность на примере выбора параметров для мягкого режима сушки пиломатериалов толщиной до 22 мм с начальной влажностью менее 20%. Как показано на рисунке 6, система корректно проанализировала входные данные и выдала релевантные значения температуры (77 °C), психрометрической разности (26 °C) и степени насыщенности (0,27), соответствующие табличным данным стандарта.

На основе полученных результатов можно выделить ключевые преимущества предложенного подхода:

- Снижение субъективного фактора. Система минимизирует зависимость технологического процесса от опыта и квалификации оператора, предоставляя формализованные и воспроизводимые рекомендации.
- Повышение объяснимости. Экспертная система на основе правил CLIPS предоставляет прозрачную логику принятия решений, что позволяет проверить и обосновать выданные параметры режима.
- Сокращение брака. Автоматизированный подбор режима, строго следующего стандартам, направлен на минимизацию таких дефектов сушки, как растрескивание, коробление и потемнение древесины, что в конечном итоге ведет к повышению выхода качественной продукции.

Таким образом, результаты проверки прототипа подтверждают адекватность выбранного метода и корректность реализации базы знаний. Разработанная

система представляет собой готовый инструмент, способный служить основой для создания более сложных адаптивных систем управления сушильными процессами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе решена задача разработки прототипа экспертной системы, предназначенной для оптимизации режима камерной сушки пиломатериалов хвойных пород. В качестве инструментальной среды была выбрана система CLIPS, доказавшая свою эффективность для создания подобных моделей, основанных на правилах.

Разработанная экспертная система может найти практическое применение в технологически значимых ситуациях деревообрабатывающих производств, способствуя их оптимизации и модернизации. В частности, она способствует стандартизации технологических процессов через унификацию процедур выбора температурно-влажностных режимов сушки, что имеет особое значение для предприятий, где отсутствуют четкие методические указания. Внедрение требований государственного стандарта ГОСТ 19773–84 в базу знаний системы обеспечивает соответствие нормативным параметрам технологического процесса, что помогает минимизировать риски отклонений от установленных стандартов.

Кроме того, данная система помогает уменьшить влияние субъективных факторов на принятие технологических решений, особенно в условиях нехватки высококвалифицированных технологов. Формализация экспертных знаний в виде логических правил способствует снижению зависимости качества продукции от человеческого фактора, что, в свою очередь, уменьшает вероятность ошибок, связанных с недостаточным опытом работников. Это достигается посредством алгоритмического выбора режимов сушки — мягкого, нормального или форсированного — в зависимости от специфических характеристик материала. Такой подход оптимизирует один из наиболее энергозатратных этапов деревообработки, снижая производственные потери и уровень брака, а также предотвращая такие дефекты, как растрескивание, коробление и изменение цвета древесины.

Экспертная система также обладает значительным образовательным и тренировочным потенциалом, выступая в роли интерактивного инструмента для подготовки специалистов в области технологии деревообработки. Она демонстрирует логику выбора режимов сушки, основываясь на нормативных документах, что способствует повышению квалификации сотрудников.

Практическая значимость работы заключается в создании доступного и эффективного средства поддержки принятия решений для технологических и инженерных служб деревообрабатывающих предприятий. Внедрение подобной системы позволит стандартизировать процесс сушки, снизить количество брака, обусловленного человеческим фактором, и сохранить материальные ресурсы.

Перспективы дальнейших исследований видятся в расширении базы знаний для включения режимов сушки лиственных пород и высокотемпературных процессов, а также в интеграции разработанной экспертной системы с системами автоматизированного управления сушильными камерами в режиме реального времени.

## Список литературы

1. Гороховский А. Г., Шишкина Е. Е., Агафонов А. С. Производственные испытания технологии сушки древесины берёзы бесступенчатыми режимами // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 2 (93). С. 125–132. DOI 10.51318/FRET.2025.93.2.015.
2. Hanna Botter-Kuisch, Jan Van den Bulcke, Jan M. Baetens, Joris Van Acker. Experimental results of monitoring wood drying and the occurrence of drying cracks in real-time in hardwoods // Hardwood Conference Proceedings. 2021. Vol. 9, part II. Pp. 17–24.
3. Мамедова Л. Э., Иванова Л. Н., Алтаев Е. С. Основные аспекты технологии искусственного интеллекта // Известия высших учебных заведений. (Экономика, финансы и управление производством). 2023. № 3 (57). С. 78–88. DOI 10.6060/ivecofin.2023573.656.
4. Луткевич Б. Экспертная система. URL: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/expert-system> (дата обращения: 01.11.2025).
5. Селезнева В. С. Экспертная система как инструмент метаязыковой коммуникации // Russian Linguistic Bulletin. 2023. № 8 (44). С. 14. DOI 10.18454/RULB.2023.44.14.
6. Култыгин О. П. Экспертные системы анализа предметной области для проектирования информационных систем // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 2. С. 105–118. DOI: 10.37791/2687-06492020-15-2-105-118.
7. ГОСТ 19773–84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия: введ. 1985-01-01. Москва: Стандартинформ, 2009. 13 с.
8. Avramidis S., Lazarescu C., Rahimi S. Basics of Wood Drying // ResearchGate. 2023. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369768547\\_Basics\\_of\\_Wood\\_Drying](https://www.researchgate.net/publication/369768547_Basics_of_Wood_Drying). (дата обращения: 01.11.2025).
9. Речинский А. В., Станкевич Л. А., Черненькая Л. В., Черненький А. В. Анализ особенностей построения экспертных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 4. С. 199–205. DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-199-205.



10. Joseph C. Giarratano. CLIPS User's Guide: version 6.4. CLIPS Rules. URL: <https://clipsrules.net/documentation/v642/ug642.pdf> (дата обращения: 04.11.2025).

## References

1. Gorokhovskiy A. G., Shishkina E. E., Agafonov A. S. Plant testing of birch wood drying technology using stepless modes, *Forests of Russia and their management*. 2025. Vol. 93, no. 2. Pp. 125–132. DOI 10.51318/FRET. 2025.93.2.015.
2. Hanna Botter-Kuisch, Jan Van den Bulcke, Jan M. Baetens, Joris Van Acker (2021) Experimental results of monitoring wood drying and the occurrence of drying cracks in real time in hardwoods, *Hardwood Conference Proceedings*. Vol. 9, part II. Pp. 17–24.
3. Mamedova L. E. Ivanova L. N., Altayev E. S. (2023) Main aspects of artificial intelligence technology, *News of higher educational institutions. (Economics, finance and production management)*. Vol. 57, no. 3. Pp. 78–88. DOI 10.6060/ivecofin. 2023573.656.
4. Lutkevich Ben. Expert system. URL: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/expert-system> (accessed: 01.11.2025).
5. Selezneva V. S. (2023) Expert system as a tool for metalin-guistic communication, *Russian Linguistic Bulletin*, no. 8 (44). Pp. 14. DOI 10.18454/RULB. 2023.44.14.
6. Kulygin O. P. (2020) Expert systems for domain analysis for information system design, *Applied Informatics*, no. 15, pp. 105–118. DOI: 10.37791/2687-06492020-15-2-105-118.
7. GOST 19773–84. Softwood and hardwood lumber. Drying modes in periodic chambers: introduction. 1985-01-01. Moscow: Standartinform, 2009. 13 p.
8. Avramidis S., Lazarescu C., Rahimi S. (2023) Basics of Wood Drying, *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/369768547\\_Basics\\_of\\_Wood\\_Drying](https://www.researchgate.net/publication/369768547_Basics_of_Wood_Drying). (Accessed: 01.11.2025).
9. Rechinsky A. V., Stankevich L. A., Chernenkaya L. V., Chernenky A. V. (2023) Analysis of the Features of Building Expert Systems, *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. No. 4, pp. 199–205. DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-199-205.
10. Joseph C. Giarratano. CLIPS User's Guide: version 6.4, *CLIPS Rules*. URL: <https://clipsrules.net/documentation/v642/ug642.pdf> (accessed: 04.11.2025).

## Информация об авторах

**Ремизова Ирина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой прикладной математики и информатики Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, РФ, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 8812–0734; Author ID: 420352; e-mail: [remirina@bk.ru](mailto:remirina@bk.ru).

## Information about the authors

**Remizova Irina Viktorovna**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Informatics of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN-код: 8812–0734; Author ID: 420352; e-mail: [remirina@bk.ru](mailto:remirina@bk.ru).

**Милехина Виктория Дмитриевна**, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, РФ, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, e-mail: [hvd.02@mail.ru](mailto:hvd.02@mail.ru).

**Milekhina Viktoria Dmitrievna**, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095, e-mail: [hvd.02@mail.ru](mailto:hvd.02@mail.ru).



# ВЫЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ В КЛЕЕННЫХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАЗВУКА

Артур Александрович Федяев, Ярослав Ярославович Семенов

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

© Федяев А. А., Семенов Я. Я., 2026

Автор-корреспондент: А. А. Федяев, e-mail: art\_fedyayev@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Вследствие нарушения технологических процессов производства клееных деревянных конструкций могут возникать различные скрытые и открытые дефекты, например, такие, как непрочные места в результате неравномерного нанесения клея. При наличии пороков в древесине и в результате неточной механической обработки древесных пород могут возникать трещины, вырывы, сколы, выпадение сучков и прочее. В настоящее время представляется перспективным проведение диагностики несплошности клеевых соединений, которая востребована не только для контроля качества продукции в процессе производства, но и в ходе эксплуатации клееных деревянных конструкций. В работе представлены результаты исследований по определению несплошности (непрочные, наличие внутренних пустот) в клеевом соединении клееных деревянных конструкций. Для определения возможности использования акустических неразрушающих методов контроля было произведено склеивание образцов с различными видами непрочных мест с имитацией внутренних дефектных мест (пустот) толщиной 0,5 и 1,0 мм, при этом толщина склеенных ламелей составила 26 мм. Ультразвуковой дефектоскоп «А 1214 ЭКСПЕРТ» с двумя преобразователями ПЭП 111–2,5–К6 использовался для проведения диагностики. Для поиска дефектов был применен амплитудный теневой метод акустического контроля с частотой 1,25 МГц. Оценка наличия дефектов проведена по значениям уровня шумового давления. Полученные в ходе исследования результаты можно рекомендовать специалистам деревообрабатывающих предприятий, а также научно-исследовательских организаций ВУЗов с целью проведения последующих исследований в области неразрушающих методов контроля и внедрения в производственные циклы ультразвуковой диагностики древесины и древесных материалов.

**Ключевые слова:** клееные деревянные конструкции, клееный брус, ультразвук, несплошность клеевых соединений, дефекты

**Для цитирования:** Федяев А. А., Семенов Я. Я. Выявление внутренних скрытых дефектов в клееных древесных материалах на основе ультразвука // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 28–35. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_28-35

## ULTRASONIC DETECTION OF INTERNAL HIDDEN DEFECTS IN GLUED LAMINATED TIMBER

Artur Alexandrovich Fedyayev, Yaroslav Yaroslavovich Semenov

St. Petersburg State Forestry University, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: A. A. Fedyayev, e-mail: art\_fedyayev@mail.ru

## ABSTRACT

Deviations from the intended manufacturing technology for glued laminated timber may cause defects like unbonded spots due to uneven glue spread, which can be either hidden or visible. Defects such as cracks, tear-outs, chips, and knot dislocation can arise from either natural imperfections in the wood material or inaccuracies in its mechanical processing. Currently, the diagnostics of adhesive bond discontinuities presents significant promise, being critical both for in-process quality assurance and for the in-service structural health monitoring of glulam constructions. This paper presents the results of research on determining discontinuities (unglued areas, internal voids) in adhesive bonds of glued laminated timber structures. To assess the feasibility of using acoustic non-destructive testing methods, samples with various types of unglued areas were manufactured. These samples included simulated internal defects (voids) with thicknesses of 0.5 and 1.0 mm, while the thickness of the bonded lamellae was 26 mm. Diagnostic measurements were



performed using the “A 1214 EXPERT” ultrasonic flaw detector equipped with a pair of piezoelectric transducers, model PEP 111–2.5-K6. For defect detection, the amplitude shadow ultrasonic testing method was employed at a frequency of 1.25 MHz. The assessment of defect presence was conducted based on the noise pressure level values. The findings of this research can be used by specialists in the woodworking industry and by academic researchers to advance studies in non-destructive testing and to facilitate the integration of ultrasonic diagnostics for wood and wood composites into manufacturing processes.

**Keywords:** glued laminated timber structures, glulam, ultrasound, adhesive bond discontinuity, defects

**For citation:** Fedyaev A. A., Semenov Ya. Ya. Ultrasonic detection of internal hidden defects in glued laminated timber // Technology and Energy. 2026. Vol. 1, no. 1. Pp. 28–35. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_28-35

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире развития техники и технологий системы оценки качества сырья и готовой продукции, а также методы их контроля и диагностики все больше пользуются спросом во всех отраслях промышленности. Оценка качества продукции и предметов труда неразрушающими методами контроля является одним из актуальных направлений развития различных отраслей производства. Главные преимущества проведения диагностики неразрушающими методами контроля: возможность применения как к готовой продукции, так и к сырью, и к материалам на ранних стадиях производственного цикла, при этом испытуемый материал может эксплуатироваться с гарантированными характеристиками по качеству.

Назовем основные методы неразрушающего исследования и контроля в области диагностики древесины и материалов на ее основе [1]:

- рентгенография, компьютерная томография дают возможность определения мест с дефектами, в том числе в клееных древесных материалах, определения размеров, формы древесных сортиментов, внутренних скрытых пороков; возможна оценка структуры элементов древесины; толщины клееного слоя материалов из древесины; также позволяют идентифицировать древесные породы по макроструктурным признакам и пр.;
- тепловидение дает возможность провести оценку качества монтажа готовой продукции из древесины, выполнить оценку тепловых свойств готовой конструкции и ее соответствия требованиям, а также находить скрытые дефектные зоны и т. д.;
- акустическая диагностика дает возможность определить плотность древесины, спрогнозировать прочность склеивания цельной древесины, а также дать оценку монолитности клееного слоя и однородности материалов из древесины и на ее основе.

Из представленных выше неразрушающих методов контроля наиболее безопасными являются

акустические. Их главные преимущества: относительно невысокая стоимость, возможность получения и обработки результатов в режиме реального времени, проведения корректировки технологии изготовления и пр. Главные недостатки этих методов заключаются в необходимости учета особенностей ультразвуковой диагностики древесины, связанных с возможным отклонением ультразвукового пучка в зависимости от направления годовичных слоёв [2]; необходимости подбора частоты в зависимости от породы древесины и ее размерных характеристик; недостаточной изученности степени влияния различных пороков и дефектов древесины на результат ультразвуковой диагностики, — то есть в высокой вероятности получения данных, выходящих за пределы известного ультразвукового «видения» древесины.

Методы акустического неразрушающего контроля: ультразвуковые (с частотой колебания от 20 кГц и выше); методы, которые основаны на использовании колебаний звуковой частоты (с частотой до 20 кГц); инфразвуковые (с частотой до 20 Гц). Применительно к деревообрабатывающей отрасли наибольший интерес представляет использование ультразвуковой дефектоскопии. На основании анализа колебания волн (амплитуды, формы, времени прихода и т. д.) с использованием ультразвуковых колебаний можно определять наличие мест с дефектами в древесных материалах. Излучает звуковые волны резонатор, который далее преобразует электрические колебания в акустические. Отраженные сигналы регистрируются измерительными цепями. Звуковые волны, не изменяющие своей траектории движения, говорят об однородной структуре древесного материала, а также о том, что мест с дефектами нет. Если присутствует акустическое сопротивление в древесном материале, то звуковая волна будет изменять траекторию движения и, отражаясь, будет возвращаться к приемнику, — такой характер движения звуковой волны будет свидетельствовать о наличии дефекта в древесном материале [3, 4].

Выполненные исследования по адаптации ультразвуковых технологий при обследовании древесины



и материалов на ее основе позволили установить зависимость между параметрами скорости ультразвука и динамического модуля ее упругости [5]–[10]. Выполнили также оценку параметров скорости ультразвукового сигнала с механическими свойствами древесины [11]. Стоит отметить, что на результат исследования влияют следующие показатели: порода и влажность древесины, пороки и дефекты обработки материала, частота и тип преобразователей. Одним из основных недостатков при этом является использование малой частоты ультразвуковых колебаний (до 250 кГц), что значительно увеличивает шаг длины волны, и, как следствие, она с большей вероятностью огибает отдельные элементы строения древесины, искажая при этом получаемый результат.

Результаты выполненных ранее исследований в направлении изучения возможностей применения ультразвуковой диагностики [3–4, 12–15], а также результаты анализа, проведенного в этом исследовании, позволяют производить диагностику пиломатериалов на основе временно-теневого метода. Этот метод заключается в сквозном прохождении сигнала через объект с фиксацией времени его прохода.

В последнее время все более активно выполняются исследования возможности применения велосимметрического метода акустического контроля готовой продукции из древесины и материалов на ее основе. Необходимо отметить, что метод работает при небольшой толщине древесных материалов, когда вероятный дефект огибается ультразвуковой волной. Также возникают некоторые сомнения в применимости метода для достоверного определения параметров в текущих условиях. Например, при попытке использования частоты 60 кГц длина волны составляет порядка 23 мм. При такой длине волны возможен поиск дефектов только значительного раскрытия и значительного размера.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализировав ряд литературных источников, а также основываясь на результатах собственных исследований, мы установили, что наиболее высокая точность определения скрытых дефектов в клееном древесном материале может быть достигнута с применением амплитудного теневого метода акустического контроля. Выбор частоты ультразвукового импульса 1,25 МГц производился с учетом рекомендаций, которые представлены в работах [3, 4], при этом толщина склеенных ламелей составила 26 мм для каждой. Для проведения эксперимента в клееном слое были имитированы пустоты толщиной 0,5 мм и 1,0 мм, которые могли образоваться как вследствие механической обработки, так и в результате наличия трещин или

Выполненные ранее исследования позволили выявить, что при использовании теневого метода акустического контроля имеется возможность определять плотность древесины в зависимости от скорости прохождения ультразвука [14], а также с использованием амплитудно-теневого метода идентифицировать наличие пустот в клееном слое в клееных деревянных конструкциях в зависимости от уровня шумового давления [15].

Наличие особенностей при ультразвуковой диагностике древесины, с одной стороны, усложняет этот процесс, а с другой стороны, расширяет его возможности за счет анализа получаемых сведений, адаптации их к условиям технологических процессов производства. Одной из положительных сторон ультразвуковой диагностики является смещение сигнала, которое дает возможность определения в поточном производстве направления волокон пиломатериалов.

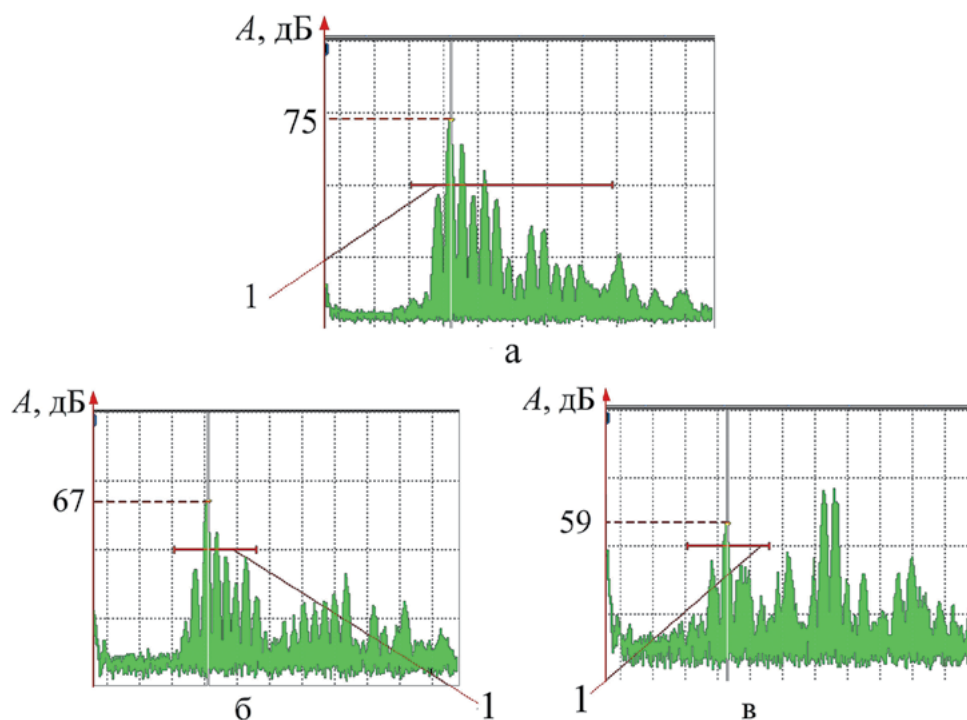
В клееных материалах из древесины могут присутствовать следующие разновидности дефектных мест:

- непроклеенные участки материала (образуются в результате отсутствия клееного состава в ламелях вследствие нарушения технологии нанесения клееного состава, неисправности клеенонасящего оборудования и пр.);
- сколы или вырывы в древесине (побочный эффект механической обработки древесного материала перед процессом склеивания);
- пустоты (пороки, которые присущи древесине, — например, наличие трещин, выпавшие сучки, смоляные кармашки и пр.).

других видов пороков и дефектов, которые присущи древесине.

Для проведения диагностики использовался ультразвуковой дефектоскоп «А 1214 ЭКСПЕРТ» с двумя преобразователями ПЭП 111–2,5-К6. С целью повышения достоверности получаемых результатов исследования использовали контактный слой (может быть представлен в виде жидкости или датчиков с силиконовыми контактными элементами).

При движении по заготовке по длине объекта контроля амплитуда сигнала имеет значение, находящееся в диапазоне  $A_{\min} \div A_{\max}$ , такой разброс в значении амплитуды сигнала может быть обусловлен различной плотностью,



**Рисунок 1.** А-сканы звукового импульса при плотности древесины клееного бруска 525 кг/м<sup>3</sup>: а – зона древесины без наличия каких-либо дефектов; б – дефектная область с пустотой, толщиной 0,5 мм; в – дефектная область с пустотой, толщиной 1,0 мм; 1 – строб-импульс

**Figure 1.** A-scans of the acoustic pulse for wood density of 525 kg/m<sup>3</sup> in a glulam sample: а – wood zone without any defects; б – defective area with a 0.5 mm thick void; в – defective area with a 1.0 mm thick void; 1 – gate pulse

условиями контакта с поверхностью и т. д., а также при попадании сигнала в зону, где имеется несплошное клеевое соединение, можно наблюдать ослабление звукового давления и снижение его до значений, сильно отличающихся от основного диапазона, которые свидетельствуют о наличии зоны непроклеенного места, а также о возможных других дефектах, которые могут быть обусловлены наличием смоленных кармашков в древесине, трещин, сколов и вырывов при механической обработке.

На основании методики, представленной в работе [16], проводили обработку экспериментальных данных с определением доверительного интервала и необходимого количества наблюдений с учетом критерия Стьюдента, с проверкой однородности дисперсий по критерию Кохрена.

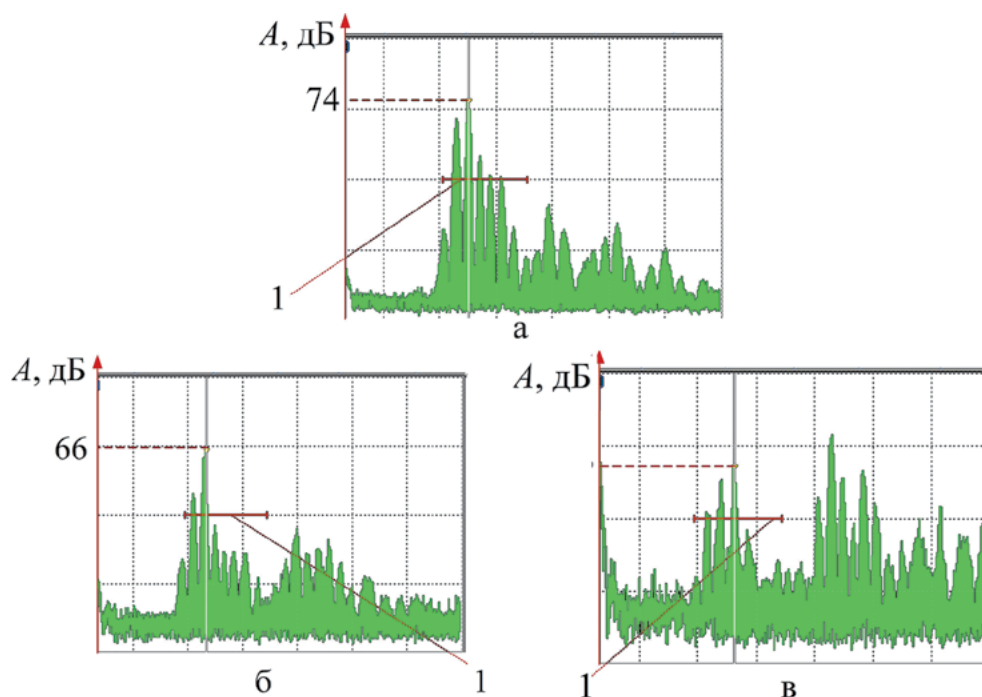
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены А-сканы звукового импульса, согласно которым можно говорить о наличии внутренних дефектов, на которые указывают ослабление уровня шумового давления и изменение характера

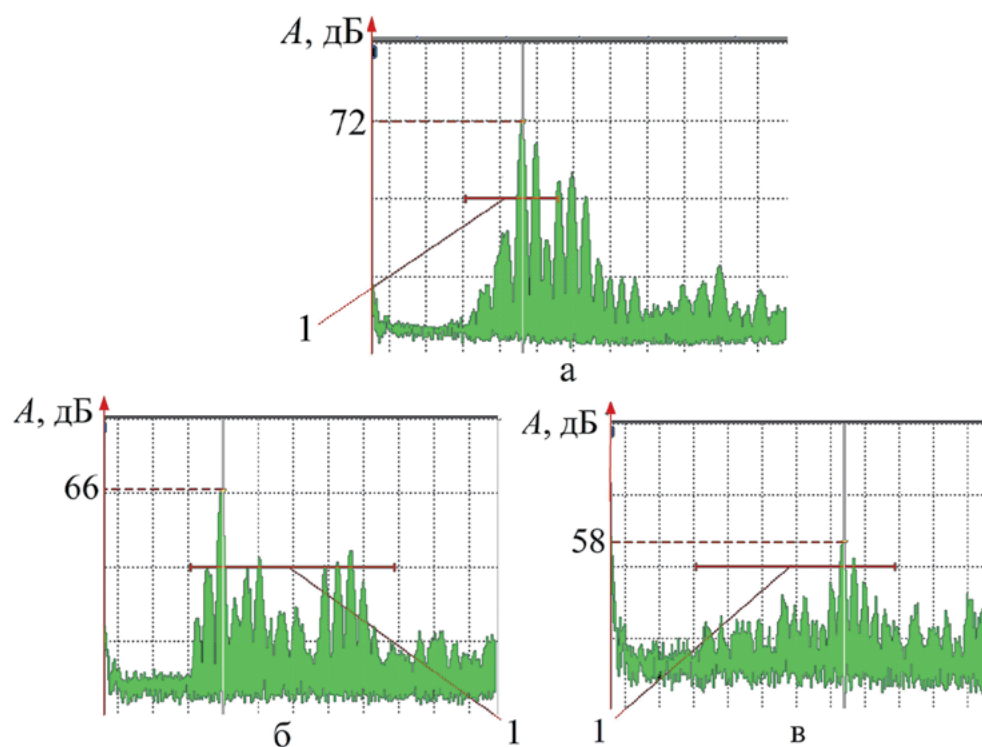
движения сигнала. Уровень шумового давления зависит и от плотности древесного материала даже при изменении в относительно небольших диапазонах, как представлено на рисунках 1–4, поэтому необходимо учитывать этот параметр при проведении ультразвуковой диагностики даже в рамках одной породы древесины. Полученные экспериментальным путем зависимости влияния плотности древесины и наличия или отсутствия внутренних дефектов на уровень шумового давления представлены на рисунке 5.

При снижении уровня шумового давления ниже 70 дБ можно говорить о наличии внутренних дефектных мест в клееном древесном материале.

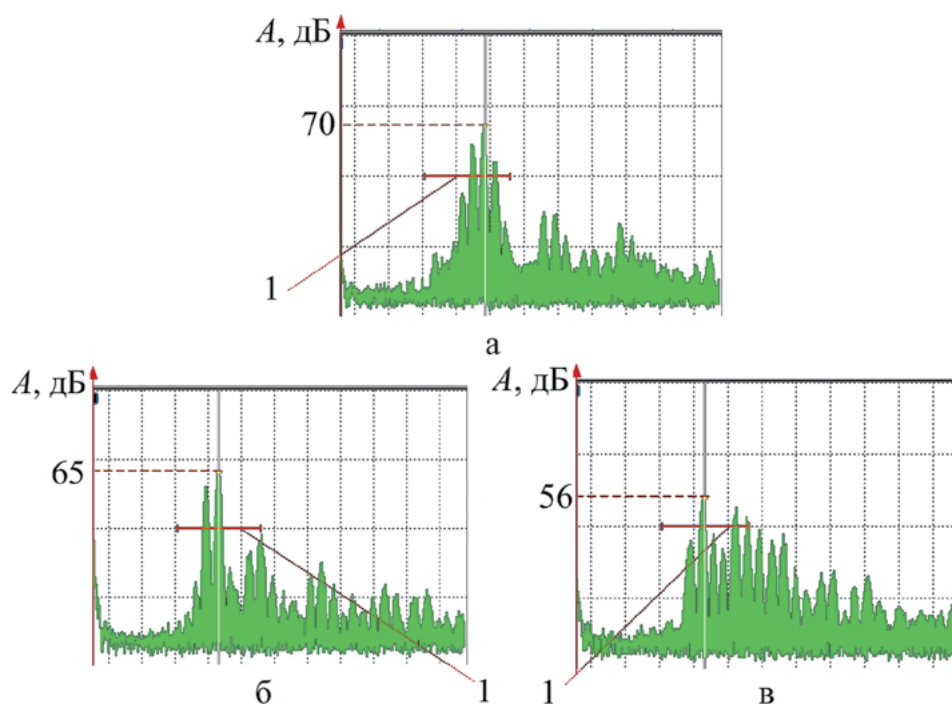
Любое изменение в показателях исследуемого объекта, например, толщина клееного древесного материала, количество слоев и прочее, может привести к потере ультразвукового сигнала, из-за возможного его смещения [17]. Стоит также отметить и то, что на потерю ультразвукового сигнала будет влиять и неправильно подобранные параметры импульса, именно этот момент представляет больший интерес в проведении последующих экспериментов и исследований.



**Рисунок 2.** А-сканы звукового импульса при плотности древесины клееного бруска 515 кг/м³: а – зона древесины без дефектов; б – дефектная область с пустотой толщиной 0,5 мм; в – дефектная область с пустотой толщиной 1,0 мм; 1 – строб-импульс  
**Figure 2.** A-scans of the acoustic pulse for wood density of a 515 kg/m³ in a glulam sample: а – wood zone without any defects; б – defective area with a 0.5 mm thick void; в – defective area with a 1.0 mm thick void; 1 – gate pulse

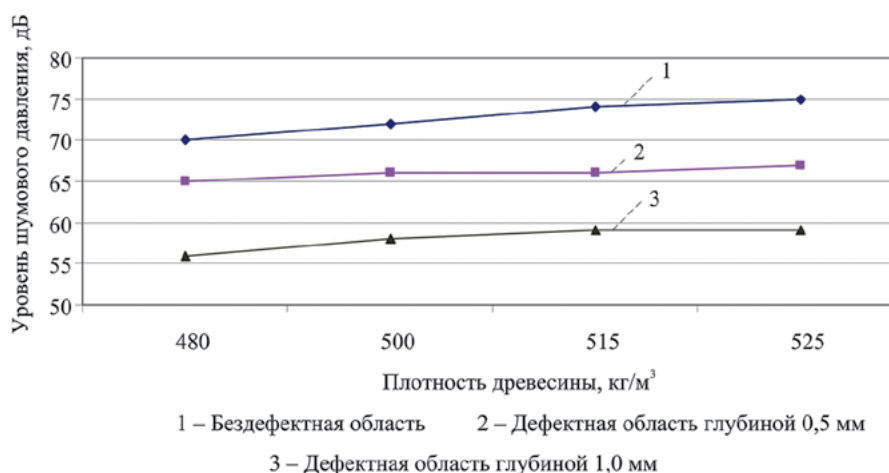


**Рисунок 3.** А-сканы звукового импульса при плотности древесины клееного бруска 500 кг/м³: а – зона древесины без дефектов; б – дефектная область с пустотой толщиной 0,5 мм; в – дефектная область с пустотой толщиной 1,0 мм; 1 – строб-импульс  
**Figure 3.** A-scans of the acoustic pulse for wood density of 500 kg/m³ in a glulam sample: а – wood zone without any defects; б – defective area with a 0.5 mm thick void; в – defective area with a 1.0 mm thick void; 1 – gate pulse



**Рисунок 4.** А-сканы звукового импульса при плотности древесины клееного бруска 480 кг/м³: а – зона древесины без дефектов; б – дефектная область с пустотой толщиной 0,5 мм; в – дефектная область с пустотой толщиной 1,0 мм; 1 – строб-импульс

**Figure 4.** A-scans of the acoustic pulse for wood density of 480 kg/m³ in a glulam sample: а – wood zone without any defects; б – defective area with a 0.5 mm thick void; в – defective area with a 1.0 mm thick void; 1 – gate pulse



**Рисунок 5.** Влияние плотности древесины и толщины дефекта на уровень шумового давления

**Figure 5.** The influence of wood density and defect thickness on noise pressure level

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно проведенному исследованию, можно сказать, что амплитудный теневой метод ультразвуковой диагностики позволяет идентифицировать наличие внутренних пороков и дефектов древесных материалов, таких, как трещины, сколы, вырывы и другие. Для оценки падения уровня шумового давления также следует учитывать такой показатель, как плотность древесины в клееном материале.

## Список литературы

1. Чубинский А. Н., Тамби А. А., Теплов А. В., Ананьева Н. И., Семичур С. О., Бахшиева М. А. Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов. Дефектоскопия. Екатеринбург, 2014. С. 76–84.
2. Чубинский А. Н., Федяев А. А., Павлов К. С., Теплякова А. В., Лозак А. А. Исследование отклонения ультразвукового

- пучка при прозвучивании древесины. // Известия СПб-ГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 6. С. 77–82.
3. Кармадонов А. Н. Дефектоскопия древесины. М.: Лесная промышленность, 1987. 120 с.
  4. Лакатош Б. К. Дефектоскопия древесины. М.: Лесная промышленность, 1966. 183 с.
  5. Бобылева Ю. Н., Давыдов С. Л., Зарецкий-Феоктистов Г. Г. К вопросу об определении упругих параметров древесины ультразвуковым методом. // Лесной журнал. (Изв. вузов). 1978. № 3. С. 156–159.
  6. Колесникова А. А. Исследование свойств древесины по кернам. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2002. 178 с.
  7. Bucur V. Acoustics of wood. Berlin, Springer, 2006. 393 p.
  8. Arriaga F., Osuna-Sequera C., Bobadilla I. et al. Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. Construction and Building Materials, 2022, vol. 322, art. 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>.
  9. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C. et. al. Determination of the mechanical properties of Castanea sativa Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. Wood Science and Technology, 2015. vol. 49. Pp. 607–622. DOI:10.1007/s00226-015-0719-7.
  10. Wang S.-Y., Lin C.-J., Chiu C.-M. The adjusted dynamic modulus of elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement. Holzfor-schung, 2003, vol. 57, pp. 547–552. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.081>.
  11. Tippner J., Hrivnák J., Kloiber M. Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic methods. BioResources, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 503–518. DOI: 10.15376/biores.11.1.503–518.
  12. Ланге Ю. В., Ермолов И. Е. Неразрушающий контроль: справочник. В 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / Под общей редакцией В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
  13. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товаро-ведения. 4-е изд. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.
  14. Чубинский А. Н., Федяев А. А., Паврос К. С., Теплякова А. В. Прогнозирование прочности склеивания строганных пиломатериалов методом ультразвуковой диагностики. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 7. С. 109–115.
  15. Чубинский А. Н., Федяев А. А., Шумякова Н., Федяева Н. Ю. Определение сплошности клеевого соединения в древесном материале с помощью ультразвука. // Системы. Методы. Технологии. 2017. БрГУ. № 2 (34). С. 101–105.
  16. Пижурич А. А., Роземблич М. С. Исследования процессов деревообработки. М.: Лесная промышленность, 1984. 232 с.
  17. Федяев А. А., Чубинский А. Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб.: ГА-ЛАНИКА, 2022. 118 с.

## References

1. Chubinsky A. N., Tambi A. A., Teppoev A. V., Anan-yeva N. I., Semishkur S. O., Bakhshieva M. A. Physical non-destructive testing methods and evaluation of wood material structure. Flaw detection. Yekaterinburg. 2014, pp. 76–84.
2. Chubinsky A. N., Fedyaev A. A., Pavros K. S., Teplyako-va A. V., Lozak A. A. Study of ultrasonic beam deviation during wood sounding. Izvestiya of ETU “LETI”. 2012. No. 6. Pp. 77–82.
3. Karmadonov A. N. Wood flaw detection. M.: Lesnaya Pro-myshlennost, 1987. 120 p.
4. Lakatos B. K. Wood flaw detection. Moscow: Lesnaya Pro-myshlennost, 1966. 183 p.
5. Bobyleva Yu. N., Davydov S. L., Zaretsky-Feoktistov G. G. On the issue of determining the elastic parameters of wood by the ultrasonic method. // News of universities. Forestry journal. 1978. No. 3. Pp. 156–159.
6. Kolesnikova A. A. Study of wood properties using cores: Scientific publication. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University, 2002. 178 p.
7. Bucur V. Acoustics of wood. Berlin, Springer, 2006. 393 p.
8. Arriaga F., Osuna-Sequera C., Bobadilla I. et al. Prediction of the mechanical properties of timber members in existing structures using the dynamic modulus of elasticity and visual grading parameters. Construction and Building Materials, 2022, vol. 322, art. 126512. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126512>.
9. Vázquez C., Gonçalves R., Bertoldo C. et. al. Determina-tion of the mechanical properties of Castanea sativa Mill. using ultrasonic wave propagation and comparison with static compression and bending methods. Wood Science and Technology, 2015. vol. 49. pp. 607–622. DOI:10.1007/s00226-015-0719-7.
10. Wang S.-Y., Lin C.-J., Chiu C.-M. The adjusted dynamic mod-ulus of elasticity above the fiber saturation point in Taiwania plantation wood by ultrasonic-wave measurement. Holzfor-schung, 2003, vol. 57, pp. 547–552. <https://doi.org/10.1515/HF.2003.081>.
11. Tippner J., Hrivnák J., Kloiber M. Experimental evaluation of mechanical properties of softwood using acoustic meth-ods. BioResources, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 503–518. DOI: 10.15376/biores.11.1.503–518.
12. Ermolov I. E., Lange Yu. V. Non-destructive testing: Hand-book in 7 volumes. Volume 3. Ultrasonic testing. Under the general editorship of V. V. Klyuev. M.: Mechanical En-gineering, 2004. 864 p.
13. Ugolev B. N. Wood science with the basics of forest com-modity science. 4th ed. M.: MGUL, 2007. 351 p.
14. Chubinsky A. N., Fedyaev A. A., Pavros K. S., Teplyako-va A. V. Predicting the gluing strength of planed lumber using ultrasonic diagnostics. Bulletin of ETU “LETI”. 2011. No. 7, pp. 109–115.
15. Chubinsky A. N., Fedyaev A. A., Shumyakova N., Fedyaeva N. Yu. Determination of the continuity of the adhesive



- joint in wood material using ultrasound. Systems. Methods. Technologies. 2017. BrSU. Vol. 34, no. 2 (34), pp. 101–105.
16. Pizhurin A. A., Rozemblit M. S. Research of woodworking processes. M.: Lesn. promyshlennost, 1984. 232 p.
  17. Fedyaev A. A., Chubinsky A. N. Non-destructive methods of testing the properties of wood products. St. Petersburg: GALANIKA, 2022. 118 p.

#### ■ Информация об авторах

**Федяев Артур Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова, 194021, Институтский переулок, д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия; ORCID ID: 0000-0001-8036-7432; SPIN-код: 8169–9209; e-mail: art\_fedyaev@mail.ru.

#### ■ Information about the authors

**Fedyaev Artur Alexandrovich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Technology of Materials, Structures and Wooden Structures of the St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov; 194021, Institutskii per., 5, Bldg. U, Saint Petersburg, Russia; ORCID ID: 0000-0001-8036-7432; SPIN-code: 8169–9209; e-mail: art\_fedyaev@mail.ru.

**Семенов Ярослав Ярославович**, студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова, 194021, Институтский переулок, д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия.

**Semenov Yaroslav Yaroslavovich**, student of the St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov; 194021, Institutskii per., 5, Bldg. U, Saint Petersburg, Russia.

# ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕН ДЕРЕВЯННЫХ ДОМОВ ИЗ ЦЕЛЬНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Наталия Юрьевна Федяева, Степан Яковлевич Пырин,  
Петр Константинович Коваленко

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

© Федяева Н. Ю., Пырин С. Я., Коваленко П. К., 2026

Автор-корреспондент: Н. Ю. Федяева, e-mail: nat\_fedyaeva@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Данное исследование направлено на определение наиболее рациональных размеров ограждающих конструкций из древесины с использованием тепловизионных методов обследования. Несмотря на требования нормативных документов, направленных на соблюдение необходимых значений по достижению показателя расчетного сопротивления теплопередачи, на практике толщина стен деревянных домов оказывается менее расчетных показателей. Так, при учете нормативных показателей толщина стен деревянных домов должна составлять более 400 мм при применении, например, древесины сосны. На практике толщина стен таких домов обычно не превышает значения 200–220 мм. При этом в помещениях наблюдаются достаточно комфортные условия для проживания даже в наиболее холодную пятидневку в году. Таким образом, показатели расчетного сопротивления теплопередачи при использовании древесины не всегда сопоставимы с практикой строительства, что предполагает проведение оценки тепловой эффективности конструкций из древесины в зависимости от толщины стен, а также от различных климатических условий. Для проведения обследования использовались различные стеновые элементы домов в диапазоне температур наружного воздуха от –25 °С до 5 °С. С помощью тепловизора Testo 875-2i выполняли обследование ограждающих конструкций 4 деревянных домов в одном из районов Ленинградской области. С целью повышения достоверности результатов съемку вели в условиях отсутствия осадков и солнечной радиации на стеновые элементы деревянных домов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании деревянных домов заводского изготовления, в индивидуальном деревянном домостроении, домостроении в рамках национального проекта «Доступное жилье» и прочее.

**Ключевые слова:** древесина, деревянный дом, тепловые потери, тепловизор, энергоэффективность стен

**Для цитирования:** Федяева Н. Ю., Пырин С. Я., Коваленко П. К. Оценка энергоэффективности ограждающих конструкций стен деревянных домов из цельной древесины. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 36–42. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_36-42

## ASSESSMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF WALL ENVELOPE STRUCTURES IN SOLID TIMBER HOUSES

Natalya Yuryevna Fedyaeva, Stepan Yakovlevich Pyrin, Petr Konstantinovich Kovalenko

St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: N. Yu. Fedyaeva, e-mail: nat\_fedyaeva@mail.ru

## ABSTRACT

This study aims to determine the optimal dimensions of timber envelope structures using thermographic survey method. In practice, the walls of wooden houses are often built thinner than the calculated specifications despite the requirements of regulatory documents mandating compliance with necessary design thermal resistance values. Thus, according to regulatory standards, the wall thickness of wooden houses should exceed 400 mm when using materials such as pine wood. In practice, the wall thickness of such houses typically does not exceed 200–220 mm. At the same time adequately comfortable living conditions are observed indoors even during the coldest five-day period of the year. Therefore, the calculated thermal resistance coefficients for wood are not always comparable with actual construction



practice, which necessitates an evaluation of the thermal efficiency of wooden structures based on wall thickness and various climatic conditions. For the survey, various wall elements of houses were examined within an outdoor air temperature range of  $-25^{\circ}\text{C}$  to  $5^{\circ}\text{C}$ . Using a Testo 875-2i thermal imager, an examination of the envelope structures was conducted on four wooden houses located in one of the districts of the Leningrad Region. In order to improve the accuracy of the findings, the thermal survey was carried out when there was no precipitation or direct sunlight on the walls of the wooden houses. The results obtained from this research can be used in the design of factory-made wooden houses, in individual timber house construction, and in housing development under the national "Affordable Housing" initiative, etc.

**Keywords:** wood, wooden house, heat loss, thermal imager, wall energy efficiency

**For citation:** Fedyaeva N. Yu., Pyrin S. Ya., Kovalenko P. K. (2026) Assessment of the energy efficiency of wall envelope structures in solid timber houses. *Technology and Energy*, 2026, vol. 1, no. 1, pp. 36–42, DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_36-42

## ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от назначения тепловизоры могут выполнять следующие основные функции: измерительные, визуальные, наблюдательные и т. д. [1]–[2]. В последнее время, согласно проведенному анализу использования тепловидения, можно сказать, что оно применяется практически во всех областях, а именно в медицине, строительстве, военном деле, в различных видах промышленности, при обслуживании инженерных сетей и электрооборудования и др. [3]–[6]. Тепловидение активно используют и для диагностики различных мест с дефектами в условиях реального времени [7]. Однако недостаточное внимание уделяется такому методу использования тепловидения, как определение размерно-качественных характеристик различных строительных материалов, в частности, обоснованию выбора толщины стеновых элементов домов в зависимости от региона их эксплуатации. Для нашего исследования наибольший интерес представляют стеновые элементы домов, выполненные из древесных материалов.

Толщина стеновых элементов деревянных домов на практике может быть в диапазоне показателей от 150 до 250 мм. Показатель толщины стеновых элементов в первую очередь зависит от региона эксплуатации дома, а также от финансовых возможностей заказчика его строительства. При использовании стеновых элементов с толщиной менее 150 мм может произойти потеря устойчивости всего здания в целом. К толщине стеновых элементов дома также предъявляются требования, которые представлены в нормативных документах, например, в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Согласно этому строительному документу, данные по толщине стеновых элементов являются нерациональными. Например, при требуемом сопротивлении теплопередаче материалов для г. Санкт-Петербурга  $3,08 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$  расчетная толщина стен для достижения этого показателя из цельной древесины составит более 277 мм, а коэффициент теплопроводности

для древесины сосны поперек волокон будет равен  $0,09 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$  и выше в зависимости от условий эксплуатации. Следует отметить, что для различных не древесных строительных материалов показатель толщины стеновых элементов также является необоснованно высоким, например, толщина стенового элемента из газобетона свыше 600 мм, из керамического кирпича — свыше 1600 мм. Стоит уточнить, что для выполнения требований СП 50.13330.2012 к тепловой защите зданий из цельного бруса сосны толщина сырья для выпуска стеновых элементов дома должна составлять от 350 до 450 мм, что значительно ограничивает сырьевую базу для производства, а стоимость готового дома будет намного выше. Цельный брус также имеет ряд специфических недостатков, в частности, наличие мест с дефектами и пороками, неравномерное распределение влажности в древесине после сушки, риск коробления стеновых элементов, нарушения целостности конструкции и прочее.

В настоящее время существующие расчётные методы оценки затрат тепловой энергии при использовании различных типов ограждающих конструкций можно использовать только для определения усредненных тепловых свойств различных материалов. При оценке тепловых потерь с применением стандартных методик на основе стандартных обобщенных данных часто не учитываются особенности изготовления конструкций и материалов, монтажа и условий эксплуатации, а также требуемые характеристики древесных материалов. Как следствие, достаточно высока вероятность погрешности при оценке энергозатрат с использованием различных типов конструкций; при этом не будут учтены реальные тепловые свойства и размеры древесины. Выполненные нами предварительные измерения с применением тепловизора показали высокую точность при определении фактических потерь тепловой энергии через ограждающие конструкции из древесных материалов.



Целью работы является снижение расхода древесины на изготовление ограждающих конструкций энергоэффективных деревянных домов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать эффективность тепловой защиты зданий из древесины методом тепловизионной диагностики.
2. Обосновать рациональные размеры древесных элементов, обеспечивающих тепловую защиту зданий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рациональное обоснование параметров и размеров элементов ограждающих конструкций для деревянных домов с использованием тепловизора является достаточно актуальным в настоящее время. Также при проведении исследований стоит учитывать условия региона эксплуатации деревянных домов.

Объектом исследования стали стены деревянных домов из цельной древесины. Исследованию подлежали четыре жилых деревянных дома с толщиной стен 150, 175, 200 и 220 мм, расположенные в одном районе Ленинградской области. С использованием термофотографирования провели обследование стеновых элементов дома внутри помещений для определения температуры на их поверхности. Термофотографирование выполнялось преимущественно осенью и зимой при стабильной температуре воздуха не менее трех суток в одном диапазоне по ранее намеченным участкам ограждающих стеновых конструкций дома. В память тепловизора Testo-875 записывались полученные термограммы. При проведении тепловизионного обследования учитывали параметры окружающей среды согласно строительной документации [12]: температура наружного воздуха составляла  $0 \pm 0,5$  °C, влажность воздуха  $60 \pm 5\%$ , скорость движения воздуха  $1 \pm 0,5$  м/с, температура внутри помещения  $23 \pm 0,5$  °C, влажность внутри помещения  $50 \pm 5\%$ . При помощи специализированной компьютерной программы Testo проводили обработку полученных термограмм. Представленная на рисунке 1, б температурная шкала соответствует цветовой палитре с указанием температур и разрезов по сечениям и поля распределения температур. Для более наглядного представления и определения мест привязки распределения температур на рисунке 1, а представлены фотографии исследуемого объекта в натуральном виде.

Оборудование, применявшееся для проведения обследования: тепловизор Testo 875-2i; пирометр Testo 845; люксметр Testo 540; анемометр с крыльчаткой Testo 410-2, который применяли для измерения температуры воздуха, а также скорости движения воздуха; манометр абсолютного давления Testo 511; измеритель плотности тепловых потоков ИТП-МГ4.03/3 «ПОТОК».

На основании ГОСТ 25380 «Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков,

проходящих через ограждающие конструкции» в начале проведения обследования выполнили фотографирование всех участков конструкций, а также определили температуру, относительную влажность и скорость движения наружного воздуха. Как говорилось ранее, все термограммы с покадровой записью были сохранены в памяти тепловизора Testo и затем обработаны в палитре 256 цветов.

В таблице 1 представлена методическая сетка проведенных обследований и экспериментов. Она включает в себя фиксацию на постоянном уровне таких показателей, как влажность, плотность, порода древесины; атмосферное давление, скорость движения воздуха, влажность воздуха внутри помещения, наружная влажность и температура внутри помещения. За переменные факторы для обследования были взяты температура наружного воздуха и толщина стен ограждающих конструкций. Наблюдения выполнялись с учётом статистической обработки в количестве, достаточном для достижения убедительной достоверности полученных результатов обследования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 показан пример термофотографирования стены деревянного дома заводского изготовления в натуральном и инфракрасном спектрах. При съемке произведена оценка качества монтажа, определены места с отсутствием инфильтрации холодного воздуха из-за дефекта монтажа, определена зона, подлежащая проведению исследований.

На рисунке 2 представлена зависимость трансмиссионных потерь тепловой энергии от толщины стен ограждающих конструкций на  $1 \text{ м}^2$  площади при температуре наружного воздуха от 5 °C до -25 °C. На представленном рисунке зависимость 8 построена с учетом нормативно-технической документации [12, 13].

Выполненные нами обследования показывают, что толщина стеновых элементов дома влияет на энергоэффективную эксплуатацию дома в целом. Использование ограждающих конструкций с толщиной, не обеспечивающей в должной степени тепловой защиты дома, будет приводить к увеличению расходов на отопление помещений. Применение ограждающих конструкций



Таблица 1. Методическая сетка проведения эксперимента по исследованию влияния температуры наружного воздуха на потери тепловой энергии при различной толщине элементов стен ограждающих конструкций

Table 1. Methodological framework for studying the influence of outdoor air temperature on heat loss with the various thicknesses of wall envelope elements

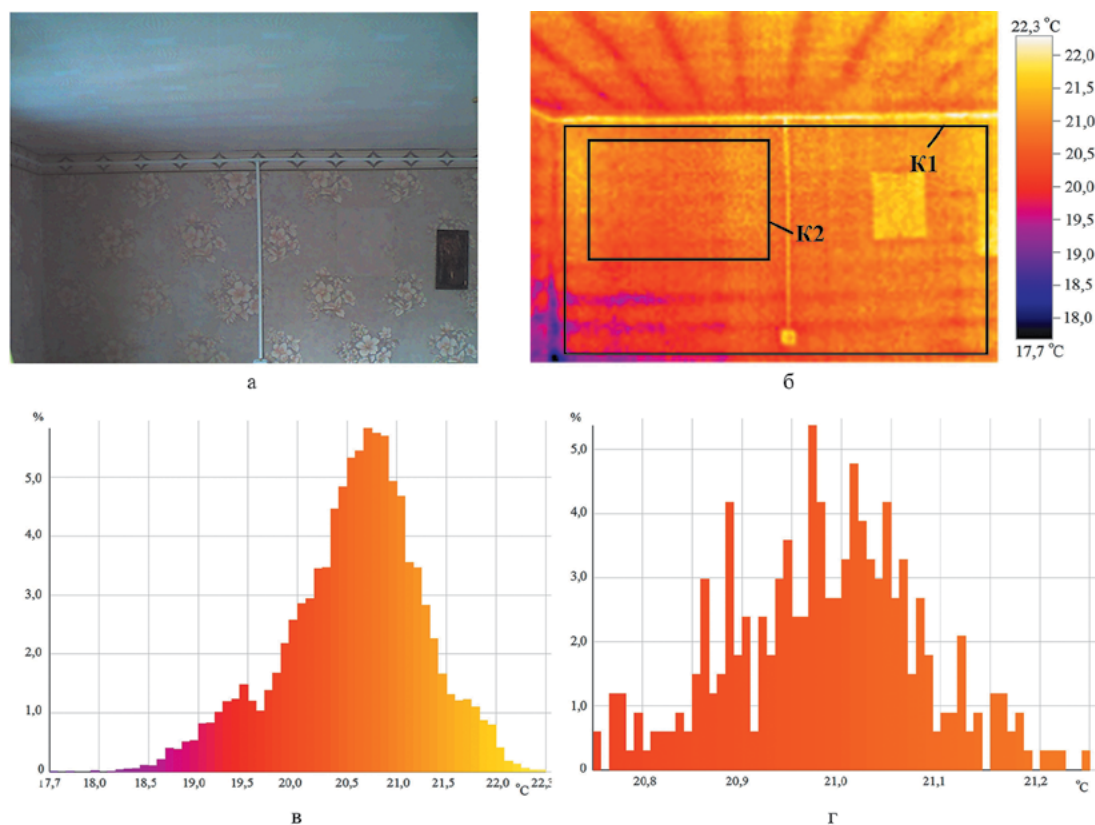
| Задача исследования                                                                                                     | Постоянные факторы                       |          | Критерий оценки                                                         | Переменные факторы                       |          | Количество опытов | Количество наблюдений в опыте | Общее количество наблюдений |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|                                                                                                                         | Наименование                             | Значение |                                                                         | Наименование                             | Значение |                   |                               |                             |
| Установить влияние температуры наружного воздуха на потери тепловой энергии через элементы стен ограждающих конструкций | 1. Влажность древесины, %                | 15 ± 2   | Температура элементов стен ограждающей конструкции внутри помещения, °C | Температура наружного воздуха, °C        | 5        | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 2. Плотность древесины, кг/м³            | 505 ± 25 |                                                                         |                                          | 0        | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 3. Порода древесины                      | сосна    |                                                                         |                                          | -5       | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 4. Атмосферное давление, мм рт. ст.      | 760 ± 10 |                                                                         |                                          | -10      | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 5. Скорость движения воздуха, м/с        | 1 ± 0,5  |                                                                         |                                          | -15      | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 6. Влажность воздуха внутри помещения, % | 50 ± 5   |                                                                         |                                          | -20      | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 7. Влажность наружного воздуха, %        | 60 ± 5   |                                                                         | Толщина стен ограждающих конструкций, мм | -25      | 12                | 6                             | 72                          |
|                                                                                                                         | 8. Температура внутри помещений, °C      | 23 ± 0,5 |                                                                         |                                          | 150      | 21                | 6                             | 126                         |
|                                                                                                                         |                                          |          |                                                                         |                                          | 175      | 21                | 6                             | 126                         |
|                                                                                                                         |                                          |          |                                                                         |                                          | 200      | 21                | 6                             | 126                         |
|                                                                                                                         |                                          |          |                                                                         |                                          | 220      | 21                | 6                             | 126                         |

Таблица 2. Энергетически эффективные толщины стены из цельной древесины в зависимости от климатических особенностей ряда регионов эксплуатации

Table 2. Energy-optimal wall thicknesses in solid timber wall based on the climatic conditions of various operational regions

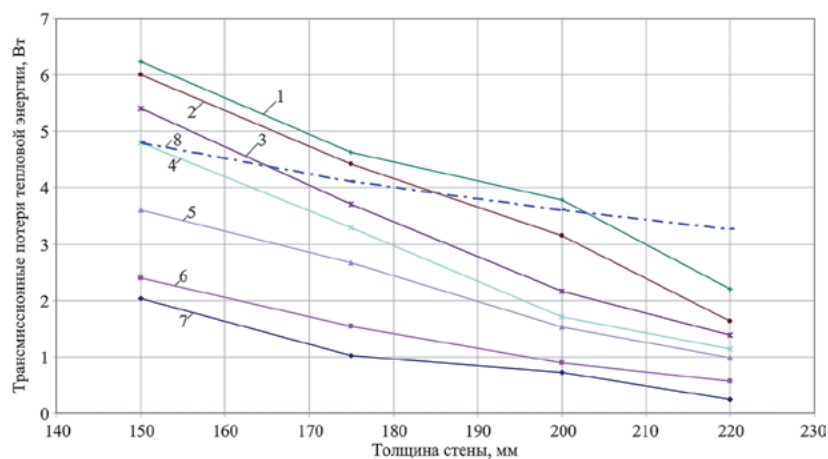
| Температура наружного воздуха, °C | Толщина энергетически эффективной стены из цельной древесины, мм | Возможный климатический регион эксплуатации с наиболее холодной пятидневкой в году с уровнем вероятности выше 0,9 | Возможный климатический регион эксплуатации с наиболее холодным месяцем в году с уровнем вероятности выше 0,9 |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| -25                               | 202                                                              | Санкт-Петербург                                                                                                   | Чита                                                                                                          |
| -20                               | 188                                                              | Калининград                                                                                                       | Воркута                                                                                                       |
| -15                               | 167                                                              | Черкесск                                                                                                          | Самара                                                                                                        |
| -10                               | 150                                                              | Южно-Курильск                                                                                                     | Ульяновск                                                                                                     |





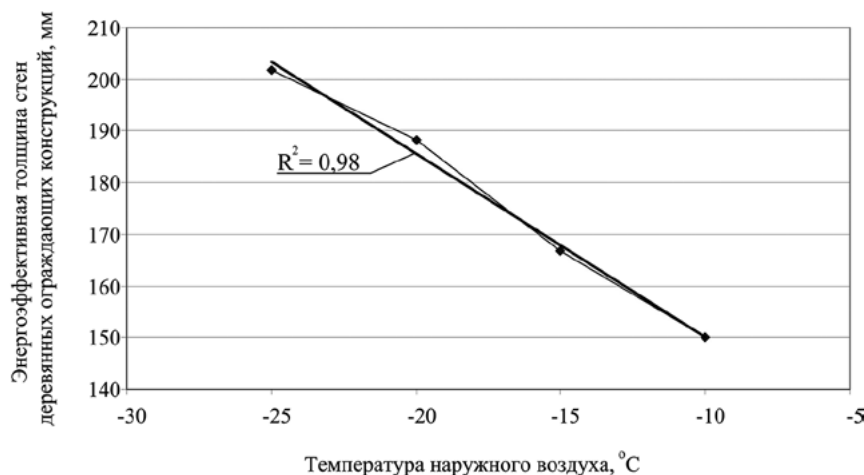
**Рисунок 1.** Изображение ограждающей конструкции стены деревянного дома заводского изготовления с толщиной бруса 150 мм в натуральном и инфракрасном спектрах, а также % распределение температур на его поверхности: а – фотография объекта; б – термограмма объекта; в – процентное распределение температур на поверхности контура К1; г – процентное распределение температур на поверхности контура К2

**Figure 1.** Image of a wall envelope assembly of a factory-made wooden house with 150 mm timber thickness in natural light and infrared spectrum, along with the percentage distribution of temperatures on its surface: а – photograph of the object; б – thermogram of the object; в – percentage temperature distribution across the K1 surface contour; г – percentage temperature distribution across the K2 surface contour



**Рисунок 2.** Зависимость трансмиссионных потерь тепловой энергии от толщины стен на 1 м² их площади при различной температуре наружного воздуха: 1 – -25 °C; 2 – -20 °C; 3 – -15 °C; 4 – -10 °C; 5 – -5 °C; 6 – 0 °C; 7 – 5 °C; 8 – максимально допустимые трансмиссионные потери тепловой энергии при соответствующей толщине стен

**Figure 2.** Dependence of heat transmission losses on wall thickness per 1 m² of their area at various outdoor air temperatures: 1 – -25 °C; 2 – -20 °C; 3 – -15 °C; 4 – -10 °C; 5 – -5 °C; 6 – 0 °C; 7 – 5 °C; 8 – maximum permissible heat transmission losses at given wall thicknesses



**Рисунок 3.** Влияние температуры наружного воздуха на изменение энергоэффективной толщины стен деревянных ограждающих конструкций

**Figure 3.** Influence of outdoor air temperature on the change in energy-optimal thickness of wooden wall envelope structures

с размерами, которые превышают рекомендуемые показатели, влечет за собой перерасход энергии и сырья на их изготовление, монтаж и транспортировку. На основании этого отметим, что определение энергетически эффективных размеров стеновых ограждающих конструкций для различных климатических зон с учётом температуры, в частности для наиболее холодных пятидневки и месяца в году, является актуальной задачей.

Результаты представлены в таблице 2. На рисунке 3 показана зависимость энергетически эффективных толщин стен деревянных домов от температуры наружного воздуха. Также эту зависимость можно описать уравнением 1:

$$h_n^{\dot{Y}} = -3,546 \cdot t_{n.a.} + 114,7, \quad (1)$$

где  $h_n^{\dot{Y}}$  — энергетически эффективная толщина стены, мм;

$t_{n.a.}$  — температура наружного воздуха, °C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного обследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Фактические теплотери увеличиваются с уменьшением толщины ограждающей конструкции не пропорционально, в отличие от линейной зависимости максимально допустимых потерь тепловой энергии, которые рассчитываются по стандартным методикам.
2. Рекомендуемая толщина стеновых элементов деревянных домов, при которой необходимая тепловая

защита помещений будет обеспечиваться в должной объеме, составляет от 150 до 202 мм в диапазоне температур наиболее холодной пятидневки в году от 5 °C до — 25 °C соответственно.

## Список литературы

1. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 3. Infrared and Thermal Testing. ASNT, USA, 2001.
2. Shepard S. Advances in pulsed thermography. Thermosense XXIII: 16–20 April 2001, Orlando, Florida, United States. Proceedings of SPIE — the International Society for Optical Engineering (Vol. 4360), ISSN 1996-756X. P. 511–515.
3. Тажибаева К. М. Повышение энергоэффективности жилого дома. // Современные инновации. № 1 (39). Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Республика Казахстан. 2021. С. 54–58.
4. Титунин А. А. Определение коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций с учетом макро-структуры и плотности древесины // Умные композиты в строительстве. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 8–18.
5. Леонович О. К., Короб А. Ю. Перспективные направления в строительстве деревянных малоэтажных зданий // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 188–198.
6. Федяев А. А., Чубинский А. Н. Неразрушающие методы контроля свойств продукции из древесины. СПб.: Галаника, 2022. 118 с.
7. Будадин О. Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 472 с.
8. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
9. Вавилов В. П., Климов А. Г. Тепловизоры и их применение. М.: Интел универсал, 2002. 87 с.

10. Чубинский А. Н., Тамби А. А., Федяев А. А., Федяева Н. Ю., Кульков А. М. Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины. // Системы. Методы. Технологии. Братск.: БрГУ, 2015. № 2 (26). С. 152–158.
11. Чубинский А. Н., Тамби А. А., Варанкина Г. С., Федяев А. А., Чубинский М. А., Швец В. Л., Чаузов К. В. Физические методы испытаний древесины. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 125 с.
12. СП 50.133330.2012 «Тепловая защита зданий».
13. СП 131.13330.2020 «СНиП 23-01-99 Строительная климатология».

## References

1. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 3. Infrared and Thermal Testing. ASNT, USA, 2001.
2. Shepard S. Advances in pulsed thermography. Thermosense XXIII: 16–20 April 2001, Orlando, Florida, United States. Proceedings of SPIE — the International Society for Optical Engineering (Vol. 4360), ISSN 1996-756X. Pp. 511–515.
3. Tazhibaeva K. M. INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF A RESIDENTIAL BUILDING. Modern Innovations No. 1 (39). International Educational Corporation, Almaty, Republic of Kazakhstan., 2021. Pp. 54–58.
4. Titunin A. A. Determination of the thermal conductivity coefficient of glued timber structures taking into account

- the macrostructure and density of wood // Smart Composites in Construction. 2024. Vol. 5, issue 1. Pp. 8–18.
5. Leonovich O. K., Korob A. Yu. Promising Directions in the Construction of Low-Rise Wooden Buildings. Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources. 2022. No. 1 (252). Pp. 188–198.
6. Fedyaev A. A., Chubinsky A. N. Non-destructive methods for testing the properties of wood products. St. Petersburg: GALANIKA, 2022. 118 p.
7. Budadin O. N. Thermal non-destructive testing of products. Moscow: Nauka, 2002. 472 p.
8. Vavilov V. P. Thermal methods of non-destructive testing. Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 240 p.
9. Vavilov V. P., Klimov A. G. Thermal imagers and their application. Moscow: Intel universal, 2002. 87 p.
10. Chubinsky A. N., Tambi A. A., Fedyaev A. A., Fedyaeva N. Yu., Kulikov A. M. Areas of use of physical methods for testing the structure and properties of wood. // Systems. Methods. Technologies. Bratsk: BrGU, 2015 No. 2 (26). Pp. 152–158.
11. Chubinsky A. N., Tambi A. A., Varankina G. S., Fedyaev A. A., Chubinsky M. A., Shvets V. L., Chauzov K. V. Physical methods of wood testing. St. Petersburg: SPbGLTU. 2015. P. 125.
12. SP 50.133330.2012 Thermal protection of buildings.
13. SP 131.13330.2020 SNiP 23-01-99 Construction climatology.

## Информация об авторах

**Федяева Наталья Юрьевна**, кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры строительства и планировки населенных пунктов Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова; 194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0000-0002-9454-9285; SPIN-код: 7500–5197, e-mail: nat\_fedyaeva@mail.ru.

**Пырин Степан Яковлевич**, студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова; 194021, Институтский переулок, д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия.

**Коваленко Петр Константинович**, студент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова; 194021, Институтский переулок, д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия.

## Authors' information

**Fedyaeva Natalya Yuryevna**, Ph. D. in Engineering, Senior Lecturer at the Department of Construction and layout of settlement of the St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov; 194021, Institutskii per., 5, Bldg. U, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0002-9454-9285; SPIN-code: 7500–5197, e-mail: nat\_fedyaeva@mail.ru.

**Pyrin Stepan Yakovlevich**, student of the St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov; 194021, Institutskii per., 5, Bldg. U, Saint Petersburg, Russia.

**Kovalenko Petr Konstantinovich**, student of the St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov named after S. M. Kirov; 194021, Institutskii per., 5, Bldg. U, Saint Petersburg, Russia.



# ВЛИЯНИЕ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ НА ЭКОНОМИКУ СЕВЕРО- ЗАПАДНОГО РЕГИОНА В СОВРЕМЕННЫХ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕАЛИЯХ

Марина Геннадьевна Трейман, Мария Александровна Еремина

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

© Трейман М. Г., Еремина М. А., 2026

*e-mail: britva-69@yandex.ru*

## АННОТАЦИЯ

В исследовании проведен комплексный анализ влияния национальной инновационной системы России на социально-экономическое развитие Северо-Западного федерального округа (СЗФО) за период до 2025 года. Актуальность исследования обусловлена ключевой ролью региона в национальной экономике и его значительным, но не до конца реализованным научно-технологическим потенциалом. Цель исследования — оценить эффективность мер государственной инновационной политики, реализуемых в рамках национальной инновационной системы, и их конкретные результаты на различных уровнях хозяйствования. Основой исследования являются системный подход, статистический анализ, а также сравнительный и прогнозный анализ. На основе данных за 2025 год выявлены ключевые тренды: опережающий рост валового регионального продукта (ВРП) СЗФО по сравнению со среднероссийскими показателями, структурные сдвиги в пользу развития высокотехнологичных секторов, то есть инновационного пути развития экономики, значительный рост инвестиций в человеческий капитал и исследования и разработки.

**Ключевые слова:** национальная инновационная система, Северо-Западный регион, экономическое развитие, целлюлозно-бумажная промышленность, инновационная политика, технологическая модернизация

**Для цитирования:** Трейман М. Г., Еремина М. А. Национальная инновационная система России и ее влияние на экономику Северо-Западного региона в современных экономических реалиях // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 43–46. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_43-46

## RUSSIA'S NATIONAL INNOVATION SYSTEM AND ITS IMPACT ON THE NORTHWESTERN REGION'S ECONOMY IN THE CURRENT ECONOMIC CONTEXT

Marina Gennadyevna Treyman, Maria Alexandrovna Eremina

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

*e-mail: britva-69@yandex.ru*

## ABSTRACT

The study conducts a comprehensive analysis of the impact of Russia's National Innovation System on the socio-economic development of the Northwestern Federal District (NWFD) for the period up to 2025. The relevance of the study



is determined by the region's key role in the national economy and its significant, yet not fully realized, scientific and technological potential. The study aims to evaluate the efficacy of government innovation policy measures, as part of the national innovation system, and their specific outcomes across different tiers of the economy. The study is based on a systemic approach, statistical methods, and comparative and forecasting analysis. Based on data for 2025, key trends have been identified: outpacing growth of the gross regional product (GRP) of the Northwestern Federal District compared to the national average, structural shifts favoring the development of high-tech sectors, i. e., an innovation-driven economic development path, and significant growth in investments in human capital and research and development.

**Keywords:** National Innovation System, Northwestern Region, economic development, pulp and paper industry, innovation policy, technological modernization

**For citation:** Treiman M. G., Eremina M. A. Russia's National Innovation System and its impact on the Northwestern Region's economy in the current economic context // Technology and Energy. 2026. No. 1 (1). Pp. 43–46. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_43-46

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобальной технологической конкуренции и санкционного давления ключевым фактором устойчивого развития национальной экономики становится эффективность ее инновационной системы. Национальная инновационная система (НИС) России, проходящая этап активного реформирования и усиления, представляет собой комплекс взаимосвязанных институтов, целью которого является генерация, распространение и использование новых знаний и технологий [1]. К 2025 году предпринятые государством меры, такие как реализация национального проекта «Наука и университеты», инициативы «Приоритет-2030», а также адресная поддержка высокотехнологичных отраслей через институты развития (ВЭБ. РФ, Фонд развития промышленности, АО «РВК»), позволили сформировать новые подходы к ее развитию.

Северо-Западный федеральный округ (СЗФО), обладающий значительным научно-образователь-

ным, промышленным и логистическим потенциалом, исторически является одним из флагманов инновационного развития страны [1]. На его долю приходится около 10 % ВВП России, а такие центры, как Санкт-Петербург, Ленинградская и Калининградская области, демонстрируют устойчивый рост в несырьевых секторах [2]. Однако структурные диспропорции внутри региона и зависимость ряда субъектов от традиционной ресурсодобывающей промышленности обуславливают необходимость целенаправленного стимулирования инноваций, в том числе со стороны органов государственной власти и местного самоуправления [2].

Цель данного исследования — оценить влияние модернизированной российской НИС на экономику Северо-Западного региона по состоянию на 2025 год с учетом модернизации деятельности целлюлозно-бумажного производства.

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНСТРУМЕНТЫ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИННОВАЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ В 2025 ГОДУ

К 2025 году архитектура российской НИС приобрела целостный и многоуровневый характер. Ее ядро составляют научно-образовательные центры мирового уровня (НОЦ), созданные в рамках нацпроекта «Наука и университеты». Для СЗФО ключевым стал НОЦ «Интеллектуальная экологическая энергетика, инженерия и материалы», интегрирующий потенциал ведущих университетов Санкт-Петербурга, научных организаций РАН и промышленных предприятий.

Важнейшим инструментом стало расширение практики государственно-частного партнерства (ГЧП) во всех сферах, в том числе и промышленной. Доля

внебюджетных средств в финансировании исследований в вузах и научных институтах СЗФО к 2025 году достигла 45%, что свидетельствует о росте коммерческого спроса на инновации со стороны реального сектора [3]. Институты развития, в свою очередь, сфокусировались не на точечной поддержке, а на создании сквозных технологических цепочек — от фундаментальной research-идеи до серийного производства [4].

Согласно теории развития региональных инновационных систем, успех определяется плотностью взаимодействия между акторами [5]. В СЗФО эту функцию выполняют технологические платформы и кластеры, такие как «Фотоника», «Кораблестроение и судоремонт» в Санкт-Петербурге, «Композитный кластер» в Удмуртии, получившие в 2025 году новый импульс развития за счет федеральных грантов и налоговых льгот.



Таблица 1. Анализ макроэкономической динамики Северо-Западного региона в 2025 году: влияние инновационного фактора  
Table 1. Analysis of Macroeconomic Dynamics in the Northwestern Region in 2025: The Impact of the Innovation Factor

| Показатель                                  | Значение / Характеристика                                                | Ключевые детали и драйверы роста                                                                                           |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Динамика ВРП                                | Темп прироста: 4,2% (2025 г.)<br>(в среднем по России: 3,1%)             | Основной вклад: обрабатывающие производства (+1,8 п. п.) и ИТ-сектор (+0,7 п. п.).                                         |
| Структурные сдвиги                          | Доля высокотехнологичного сектора: 18,5% (2025 г.)<br>(в 2020 г.: 14,8%) | Рост в химической промышленности (включая фармацевтику), производстве электронного и оптического оборудования, ИТ-услугах. |
| Инвестиции в ИР (исследования и разработки) | Внутренние затраты: 2,1% от ВРП (2025 г.) (в 2020 г.: 1,4%)              | 60% затрат направлены на прикладные исследования и экспериментальные разработки (коммерческая ориентация) [6].             |
| Человеческий капитал                        | Доля исследователей до 39 лет: >50%                                      | Следствие программ мегагрантов и создания современных кампусов (СПбПУ, ИТМО).                                              |
| Инновационная активность организаций        | Удельный вес: 22,5% (2025 г.)<br>(в среднем по России: 18,1%)            | Лидеры: Ленинградская обл. (32%), Санкт-Петербург (28%), Калининградская обл. (25%).                                       |

Статистические данные за 2025 год наглядно демонстрируют позитивное влияние усиленной НИС на экономику СЗФО (см. таблицу 1).

Данные показатели свидетельствуют о том, что СЗФО не только успешно адаптировался к новым экономическим условиям, но и перешел к модели роста, основанной на знаниях и инновациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что к 2025 году национальная инновационная система России стала действенным катализатором структурных преобразований в экономике Северо-Западного федерального округа. Сформированная система мер государственной поддержки, ориентированная на кооперацию науки, бизнеса и образования, доказала свою эффективность.

Макроэкономические показатели СЗФО — опережающий рост ВРП, увеличение доли высокотехнологичного сектора и инновационной активности организаций — являются прямым следствием целенаправленной реализации инновационной политики. Успешная трансформация АО «Целлюлозный завод «Светогорский»» демонстрирует, как традиционные, ресурсоемкие отрасли под воздействием НИС могут стать центрами генерации передовых технологий и драйверами устойчивого роста.

Однако, для закрепления достигнутых результатов необходимы дальнейшие усилия, в частности, по развитию и внедрению принципов венчурного финансирования на поздних стадиях, снижению административных барьеров для экспорта высокотехнологичной продукции и углублению международного научно-технического сотрудничества с дружественными странами. Опыт СЗФО может быть тиражирован на другие регионы

России, способствуя формированию единого, сбалансированного и конкурентоспособного национального инновационного пространства.

Примечание редактора: 08.06.2026 редакцией журнала произведена коррективка электронной версии статьи в связи с выявлением неточной информации.

Список литературы

1. Котов А. И. Инновационно-организационные решения в управлении социально-экономическим развитием территорий // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. № 3 (78) 2024. С. 31–37. DOI: 10.52897/2411-4588-2024-3-31-37.
2. Журавлев Д. М., Глухов В. В. Стратегирование цифровой трансформации экономических систем как драйвер инновационного развития // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2021. 2 (14). С. 7–21.
3. Смирнов С. А., Боброва С. В., Аренков И. А., Салихова Я. Ю. Устойчивые сочетания отличительных особенностей бизнес-моделей инновационных фирм. Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2021. Т. 37. Вып. 1. С. 62–83. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2021.103>.
4. Lee, Jeong-Dong, and others (eds), The Challenges of Technology and Economic Catch-up in Emerging Economies (Oxford, 2021; online edn, Oxford Academic, 22 July 2021), <https://doi.org/10.1093/oso/9780192896049.001.0001>, accessed 16 Oct. 2025.
5. Asheim, B. T. Smart specialisation, innovation policy and regional innovation systems: what about new path development in less innovative regions? // Innovation: The European Journal of Social Science Research. 2019. 32 (1). P. 8–25.
6. Сорвина Т. А., Марченко Е. А. Формирование модели развития технологического предпринимательства. // Петербургский экономический журнал. 2024. № 4. С. 42–55.



7. Данные мониторинга Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ «Индикаторы инновационной деятельности: 2025». М.: НИУ ВШЭ, 2025.
8. Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации. Выпуск 10 / В. Л. Абашкин, Г. И. Абдрахманова, С. В. Артёмов, и др.; под ред. Л. М. Гохберга, Е. С. Куценко; Высшая школа экономики. М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2025. ISBN 978-5-7598-3113-6. URL: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1068200858.pdf>. (Дата обращения 29.09.2025).
9. Отчет об устойчивом развитии АО «Группа «Илим» за 2023 год. URL: [https://www.ilingroup.com/upload/iblock/609/3q05mx92ugdx9wuh05zawf3g9lrd5fy/our\\_2023.pdf](https://www.ilingroup.com/upload/iblock/609/3q05mx92ugdx9wuh05zawf3g9lrd5fy/our_2023.pdf). (Дата обращения: 03.10.2025).
10. Путинцева Н. А. Теоретические подходы к управлению региональными системами обращения с вторичными ресурсами. // Петербургский экономический журнал / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина). СПб., 2024. № 4. С. 162–176.

## References

1. Kotov A. I. Innovative and organizational solutions in the management of socio-economic development of territories. *Economics of the North-West: Problems and Development Prospects*. 2024; (3 (78)): 31–37. DOI: 10.52897/2411-4588-2024-3-31-37.
2. Zhuravlev D. M., Glukhov V. V. Strategizing the digital transformation of economic systems as a driver of innovative development. *Scientific and Technical Bulletins of the St. Petersburg State Polytechnic University. Economic Sciences*. 2021;2 (14):7–21.
3. Smirnov S. A., Bobrova S. V., Arenkov I. A., Salikhova Ya. Yu. Stable combinations of distinctive features of business models of innovative firms. *Vestnik of Saint Petersburg University. Economics*. 2021;37 (1):62–83. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2021.103>.
4. Lee, Jeong-Dong, and others (eds). *The Challenges of Technology and Economic Catch-up in Emerging Economies*. Oxford, 2021. Available from: <https://doi.org/10.1093/oso/9780192896049.001.0001>. Accessed October 16, 2025.
5. Asheim, B. T. Smart specialisation, innovation policy and regional innovation systems: what about new path development in less innovative regions? *Innovation: The European Journal of Social Science Research*. 2019;32 (1):8–25.
6. Sorvina T. A., Marchenko E. A. Formation of a model for the development of technological entrepreneurship. *Petersburg Economic Journal*. 2024; (4):42–55.
7. Data from the monitoring “Indicators of Innovation Activity: 2025” by the Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge, National Research University Higher School of Economics. Moscow: HSE; 2025.
8. Rating of Innovative Development of the Subjects of the Russian Federation. Issue 10. Abashkin V. L., Abdrakhmanova G. I., Artemov S. V., et al., editors; Gokhberg L. M., Kutsenko E. S., editors; National Research University Higher School of Economics. Moscow: HSE ISSEK; 2025. ISBN 978-5-7598-3113-6. Available at: <https://issek.hse.ru/mirror/pubs/share/1068200858.pdf>. Accessed September 29, 2025.
9. Sustainability Report of JSC “Ilim Group” for 2023. Available from: [https://www.ilingroup.com/upload/iblock/609/3q05mx92ugdx9wuh05zawf3g9lrd5fy/our\\_2023.pdf](https://www.ilingroup.com/upload/iblock/609/3q05mx92ugdx9wuh05zawf3g9lrd5fy/our_2023.pdf). Accessed October 3, 2025.
10. Putintseva N. A. Theoretical approaches to the management of regional systems for the handling of secondary resources. *Petersburg Economic Journal*. St. Petersburg: V. I. Ulyanov (Lenin) St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”; 2024; (4):162–176.

## Информация об авторах

**Трейман Марина Геннадьевна**, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры менеджмента и права Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 9469–5553; Author ID: 965998; e-mail: britva-69@yandex.ru.

## Information about the authors

**Treyman Marina Gennadievna**, Dr. Sci in Economics, Associate Professor, Professor at the Department of Management and Law of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN-code: 9469–5553; Author ID: 965998; e-mail: britva-69@yandex.ru.

**Еремина Мария Александровна**, редактор, Высшая школа технологии и дизайна Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: pochtimag@gmail.com.

**Eremina Maria Aleksandrovna**, editor, Higher School of Technology and Design of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 198095, Russia, St. Petersburg, st. Ivana Chernykh, 4; e-mail: pochtimag@gmail.com.



Оригинальное теоретическое исследование  
УДК 504.062.2  
DOI 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_48-57

# ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЛАНДШАФТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА ТЕРРИТОРИИ

Екатерина Даниловна Тарасова, Яна Матвеева, Алла Борисовна Дягилева

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

© Тарасова Е. Д., Матвеева Я., Дягилева А. Б., 2026

Автор-корреспондент: Е. Д. Тарасова, e-mail: tarasova\_ekaterina\_10@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

В статье представлена сравнительная интегральная оценка устойчивости ландшафтов Республики Хакасия (Россия) и Костанайской области (Республика Казахстан). Рассматриваются два близких объекта хозяйственной деятельности по истории формирования природно-технических систем в аналогичных климатических условиях, в том числе в период советского этапа развития. Эти территории характеризуются наличием промышленных горно-обрабатывающих предприятий, обширных пастбищ и плодородных земель в сочетании с суровым континентальным климатом, что сделало их благоприятной средой для развития постиндустриального общества. Для оценки и сравнения класса устойчивости территорий был произведен расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта (ИПУЛ). 9 критериев расчета: радиационный баланс, радиационный индекс сухости, ветровой режим, интенсивность геоматических процессов, устойчивость составных частей ландшафта, контрастность урочищ в ландшафте, защищенность грунтовых вод и индекс биологической эффективности климата. Для оценки каждого показателя территориям присваивался класс устойчивости и соответствующий ему балл. Основные результаты сведены в таблицы. Графическое изображение соответствующих расчетных величин устойчивости рассмотренных ландшафтов приведено в виде круговой диаграммы по нормированным значениям критериев. Установлено, что для Республики Хакасии характерна устойчивость выше средней — 0,619 по критериям интегрального показателя устойчивости ландшафта, для Костанайской области Казахстана этот показатель находится в пределах средней устойчивости — 0,532. Более устойчивый ландшафт имеет дополнительное преимущество для реализации технологических проектов в процессе развития территории в рамках допустимых экологических нагрузок, которые необходимо учитывать при обосновании инвестиционных проектов в условиях развития современной техносферы.

**Ключевые слова:** технологический суверенитет, антропогенная нагрузка, устойчивость ландшафта, интегральные показатели качества, индекс биологической эффективности климата, радиационный индекс сухости, класс устойчивости

**Для цитирования:** Тарасова Е. Д., Матвеева Я., Дягилева А. Б. Интегральная оценка устойчивости ландшафта для определения технологического суверенитета территории. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 48–57. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_48-57

## INTEGRATED ASSESSMENT OF LANDSCAPE RESILIENCE FOR DETERMINING THE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF A TERRITORY

Ekaterina Danilovna Tarasova, Yana Matveeva, Alla Borisovna Dyagileva

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

Corresponding author: E. D. Tarasova, e-mail: tarasova\_ekaterina\_10@mail.ru



## ABSTRACT

This study provides a comparative integrated evaluation of landscape stability in the Republic of Khakassia (Russia) and Kostanay Region (Kazakhstan). The article examines two closely related facilities used for economic activities are considered in terms of the history of the formation of natural-technical systems in similar climatic conditions, including during the Soviet stage of development. These regions are characterized by the presence of industrial mining and processing enterprises, extensive pastures, and fertile lands combined with a harsh continental climate, which has created a favorable environment for the development of post-industrial society. To assess and compare the resilience classes of the territories, the Integrated Landscape Resilience Indicator (ILRI) was calculated. Nine calculation criteria were used: radiation balance, radiation index of dryness, wind regime, intensity of geomantic processes, stability of landscape components, contrast of localities within the landscape, groundwater protection, and the climate biological efficiency index. For the assessment of each indicator, territories were assigned a resilience class and a corresponding score. The main results are summarized in tables. The calculated resilience metrics for the analyzed landscapes are visualized in a pie chart using normalized values of the criteria. The study established that the Republic of Khakassia exhibits above-average stability (0.619) based on the integrated landscape stability indicator, whereas this indicator for Kazakhstan's Kostanay Region indicates average stability (0.532). Landscapes with greater stability offer a distinct advantage for deploying technological projects, as their development can proceed within acceptable ecological constraints. This factor is critical for the feasibility assessment of investments in the evolving modern technosphere.

**Keywords:** technological sovereignty, anthropogenic load, landscape stability, integrated quality indicators, climate biological efficiency index, radiation index of dryness, stability class

**For citation:** Tarasova E. D., Matveeva Ya., Dyagileva A. B. (2026) Integral assessment of landscape stability for determining the technological sovereignty of a territory, *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 48–57. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_48-57

## ВВЕДЕНИЕ

Экологические ограничения, сложившиеся на территории Российской Федерации в связи с экстенсивной эксплуатацией природных ресурсов, наблюдаются в разных районах. Это заставляет рассматривать новые механизмы для определения потенциала технологического развития их территорий. Под экологическими ограничениями понимают как естественные ограничения по ряду природных факторов, так и приобретенные ограничения, сложившиеся в период исторического развития конкретных территорий. Качество окружающей среды принято оценивать по ряду химических и физических показателей, которые отражены в санитарных правилах и нормах (СанПин 1.2.3685–21). В системе производственного экологического контроля наиболее часто используются интегральные показатели.

Для водных систем используют такие, как химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК), взвешенные вещества, водородный показатель (рН) водных систем и другие. При оценке качества воздуха определяют концентрацию пыли, а также индивидуальные и суммарные концентрации различных газов [1]. Все эти показатели отражают состояние качества окружающей среды по типу воздействия на человека и совокупность живых организмов в целом. Кроме того, к интегральным показателям качества окружающей среды относится и интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ), который целесообразно выполнять и контролировать для всех хозяйствующих субъектов, расположенных на определенных территориях, особенно при разработке перспективных планов их развития.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Республика Хакасия (РХ) является субъектом Российской Федерации, а Костанайская область (КО) входит в состав Республики Казахстан. Они в полной мере могут быть рассмотрены с позиции особенностей формирования качества окружающей среды, и к ним может быть применен метод оценки интегральной устойчивости ландшафта.

Данные территории выбраны неслучайно: они имеют историческую общность развития, в том числе в составе СССР, и специфический технологический

уклад. Основным условием их рассмотрения в контексте оценки интегральной устойчивости является принадлежность к одной климатической зоне. Оба региона осваивались и развивались в центре Евразийского материка. Эта территория на протяжении тысячелетий служила связующим звеном между Востоком и Западом. Несмотря на то, что сегодня эти регионы принадлежат разным государствам, их природные и исторические судьбы во многом схожи. Следует отметить, что авторы статьи имеют прямое отношение к этим территориям, с которыми у них были связаны длительные промежутки проживания с естественной оценкой качества



окружающей среды в течении более 10 лет. Поэтому они и выбрали в качестве объектов исследования сбора информации для оценки устойчивости к антропогенным нагрузкам эти регионы для последующей рекомендации по их возможному технологическому развитию на современном этапе.

Оба рассматриваемых региона находятся в пределах степной и лесостепной зоны, где издавна складывались особые формы природопользования и хозяйственно-бытовой деятельности [2]. Для них характерно наличие обширных пастбищ и плодородных земель в сочетании с суровым континентальным климатом. Именно эти условия сделали степные просторы благоприятной средой для развития кочевого скотоводства, которое сегодня при реализации собственности на землю практически невозможно.

Симбиоз развития сельскохозяйственного производства, горнодобывающей, металлургической промышленности сегодня определяет антропогенную нагрузку и накопленный экологический ущерб данным территориям. Особый интерес вызывают природные ресурсы, которые позволили развивать на ранних этапах металлургические центры и формировать техносферу вокруг них. Поэтому вопрос рационального использования невозпроизводимых природных ресурсов для этих территорий становится особенно актуальным.

Устойчивое состояние и развитие экономической системы страны опирается на технологический суверенитет отдельных регионов как составных частей технологического суверенитета Российской Федерации и невозможен без технологического суверенитета стран СНГ и БРИКС. В контексте существующих общественно-политических угроз для большинства этих регионов должна быть использована возможность беспрепятственного внедрения необходимых современных технологий [3] в критически важных сферах жизнеобеспечения. Особое место в их перечне занимают ресурсосберегающие и энергоэффективные технологические процессы с максимальным использованием собственных и вторичных ресурсов на конкретных территориях с организацией циклических процессов.

В оценке современной инфраструктурной стратегии развития территории обязательным условием является определение особенностей ее ландшафта [4, 5], где могут быть размещены промышленные объекты. С одной стороны, интегральная оценка устойчивости ландшафта отражает уже состоявшееся изменение под воздействием антропогенных факторов с констатацией факта этого изменения, с другой стороны, она позволяет оценить возможные перспективы дальнейшего технологического развития, а также является показателем

потенциальной суверенности через устойчивость развития. Технологический суверенитет — это способность страны разрабатывать и применять критически важные технологии, чтобы оставаться независимой и конкурентоспособной [6]. В современных условиях достижение технологического суверенитета Российской Федерации невозможно без понимания принципов устойчивого развития территории как для страны в целом, так и каждого региона в частности. Для достижения технологического суверенитета необходимо создать систему функционирования территории, на которой не будет превышена способность самовосстановления и саморегулирования природно-технических систем. Вопросы технологического суверенитета обсуждаются достаточно давно, однако источникам сырьевых потоков, являющихся определяющими инструментами в оценке динамики потенциального развития регионов, уделяется недостаточное внимание. Оценка устойчивости природных систем и воспроизводимости природных и вторичных ресурсов позволяет сделать выводы о том, как дальнейшее антропогенное воздействие при освоении этих ресурсов повлияет на продуктивность этой системы на новом этапе развития.

В связи с этим была сформулирована цель работы, которая заключалась в сравнении территорий методом интегральной оценки ландшафта двух исторически сложившихся регионов с использованием достоверных общедоступных данных и определении потенциальной нагрузки на ландшафт в условиях перспективного развития промышленности по ряду экологических показателей.

В качестве объектов исследования были выбраны две территории со схожими климатическими и технологическими условиями развития; обе в современной системе техногенеза находятся на стадии постиндустриального развития [7]. Основные климатические характеристики выбранных для анализа регионов представлены в таблице 1.

Следует отметить, что не все численные значения показателей, требуемые для расчета, представлены на сайтах официальных источников. Поэтому часть значений были приняты с учетом климатических особенностей и теоретических представлений по аналогичным объектам. Следует ожидать, что принятые так называемые условные величины выбирались с учетом общей картины развития устойчивости подобных систем. Проблема неполной информации по состоянию экологического мониторинга территории, к сожалению, имеет межрегиональный характер и требует повышенного контроля со стороны органов власти к информационной достоверности качества окружающей среды. Доступность экологической информации регламентирована для объектов



**Таблица 1.** Климатические характеристики Республики Хакасия (РХ) и Костанайской области (КО)**Table 1.** Climatic characteristics of the Republic of Khakassia (RK) and Kostanay Region (KR)

| Показатель                            | РХ                                                                                                                                                                                                                                               | КО                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Климат                                | Резко континентальный [8]                                                                                                                                                                                                                        | Континентальный [9]                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Средняя температура                   | Июля: +17,9 °С,<br>Января: – 18,9 °С [8]                                                                                                                                                                                                         | Июля: +19 °С,<br>Января: – 15–17 °С [9]                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Количество осадков в год              | 300–700 мм [10]                                                                                                                                                                                                                                  | 330–220 мм [9]                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Количество ясных дней в году          | 311 дней [10]                                                                                                                                                                                                                                    | 130–155 дней [11]                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Направление ветра                     | Юго-западные и западные [10]                                                                                                                                                                                                                     | Юго-западные [9]                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Средняя скорость ветра в течении года | 2–3 м/с [10]                                                                                                                                                                                                                                     | 3,2–5,7 м/с [9]                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Влияние гор и равнин на осадки        | Горы занимают 80% территории. Зима в котловинах сухая, в горах снега выпадает больше. Летом средняя температура в горах ниже, чем в котловинах на 6–7 °С. В горах среднегодовое количество осадков значительно больше (на 350–450 мм в год) [12] | Большая часть лесов находится на севере области. В северной части – слабовлажная, умеренно теплая агроклиматическая зона. В южной части – засушливая, теплая. Среднегодовое количество осадков к югу уменьшается (примерно на 100 мм), температура увеличивается (примерно на 3 °С) [13] |
| Растительность                        | Листоветочно-березовые, березово-сосновые леса, в среднгорьях – кедрово-пихтовая тайга. Всего порядка 1526 видов растений [12]                                                                                                                   | Березово-осиновые, сосновые, березовые леса. Всего более 1223 видов растений [13, 14]                                                                                                                                                                                                    |
| Рельеф                                | Степи, горы, тайга [8]                                                                                                                                                                                                                           | Лесостепи, степи [13]                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Количество озер, рек, речушек         | 500 [8]                                                                                                                                                                                                                                          | 310 [13]                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Площадь лесного фонда                 | 59,3% от общей площади [8]                                                                                                                                                                                                                       | 1,1% от общей площади [13]                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Особо охраняемые природные территории | 15,1% от общей площади [8]                                                                                                                                                                                                                       | 1,8% от общей площади [13]                                                                                                                                                                                                                                                               |

хозяйственной деятельности любого субъектов РФ, ее отсутствие может свидетельствовать о низком уровне организации экологического менеджмента по иерархии функционирования природно-территориальных комплексов для выбранных объектов исследования.

Динамика экологического реформирования стран СНГ и БРИКС подчеркивает важность разработки и внедрения комплексных подходов оценки, что отражено в экологической резолюции «Форума по охране окружающей среды и экологическому развитию Российской Федерации» [15]. Работа, которая проведена и представлена в данной статье, является апробацией предлагаемых подходов и методологии для проведения комплексной оценки территорий в целях предварительной оценки устойчивости ландшафтов к техногенной нагрузке.

Известно, что режим ветров и пространственное распределение аэродинамических нагрузок оказывают существенное влияние на устойчивость экосистем обеих территорий. Для Костанайской области (КО), расположенной в пределах Северо-Казахстанской равнины, характерны открытые степные пространства с незначительным количеством естественных барьеров, что способствует частому возникновению ветров умеренной

и высокой скорости и, как следствие, дефляционным процессам в почвенном покрове. Продолжительные штильные периоды наблюдаются здесь редко, что снижает способность экосистем к саморегуляции в засушливые периоды [14]. В противоположность этому, Республика Хакасия (РХ) отличается сложным горно-долинным рельефом, который формирует локальные ветровые режимы: в долинах и межгорных котловинах наблюдаются периоды относительного безветрия, тогда как на открытых предгорьях и хребтах часто фиксируются ветры повышенной силы. Такое пространственное чередование усиливает контрастность природных процессов и создаёт неоднородность воздействия ветров на ландшафтные компоненты [17].

Интенсивность геоморфологических процессов также существенно различается в этих регионах. КО характеризуется слабо расчленённым равнинным рельефом и незначительной активностью эрозионных форм. Отсутствие крутых склонов и активных тектонических движений обеспечивает устойчивость рельефа и слабое развитие овражно-балочной сети. Эрозионные и дефляционные процессы проявляются в основном локально — на участках с распаханными почвами и при ветровых нагрузках в засушливые годы. Таким образом, интенсивность геоморфологических процессов здесь



незначительна, что способствует относительной стабильности ландшафтной структуры [16].

С точки зрения геоматических процессов территория КО также отличается относительной устойчивостью. Материалы космического зондирования и геодезического наблюдения фиксируют слабую динамику земной поверхности. Основные изменения выявляются на сельскохозяйственных землях — сезонные колебания влажности почв, проявления дефляции и изменение показателей растительного покрова. Анализ данных радарной интерферометрии показывает отсутствие значимых вертикальных смещений, за исключением отдельных техногенных участков, связанных с добычей полезных ископаемых и эксплуатацией транспортных объектов [17, 18].

Для РХ ситуация иная: горные и предгорные участки подвержены активным процессам эрозии, делювия и склонового смыва, особенно в районах с развитым сельскохозяйственным использованием склонов. В котловинных частях отмечается проявление дефляции и локальных просадок, связанных с многолетней техногенной трансформацией земель. Разнообразие морфологических форм делает территорию геодинамически более активной [19].

Геоматические исследования в Хакасии подтверждают повышенную подвижность элементов рельефа. Космические наблюдения выявляют зоны сезонных и долговременных смещений склонов, развитие оползневых и осыпных процессов, а также деформации поверхности, возникающие в районах подработанных территорий. В предгорных областях наблюдается ускорение процессов смыва и разжижения грунтов после интенсивных осадков. В котловинных ландшафтах фиксируются очаги дефляции, признаки опустынивания и снижение биопродуктивности растительности, что подтверждается динамикой спектральных показателей. Применение геоинформационных методов позволяет выделять опасные зоны и отслеживать изменения рельефа во времени [20, 21].

Устойчивость составных частей ландшафта определяется сочетанием свойств почв, растительности и гидрологического режима. В КО преобладают чернозёмные и каштановые почвы с развитым травяным покровом, что формирует устойчивые степные экосистемы. Однако значительная доля распаханых земель и воздействие сельского хозяйства снижают естественный потенциал восстановления растительного покрова, особенно при усилении засушливости климата. Тем не менее за счёт высокого биопродуктивного потенциала и способности к саморегуляции эти комплексы сохраняют стабильность в условиях умеренных нагрузок и чувствительны

к изменению температуры [22]. В РХ устойчивость компонентов ландшафта варьируется значительно: горнолесные участки и долинные экосистемы обладают высоким потенциалом самовосстановления, тогда как степные и полупустынные территории котловин демонстрируют признаки деградации почвенного покрова: уплотнение и засоление в результате выпаса и ирригации [23].

Контрастность урочищ и ландшафтов выражена по-разному в сравниваемых регионах. Для КО характерна слабая мозаичность природных комплексов: рельеф плавно волнистый, преобладают однородные степные урочища, границы между природными элементами размыты. Это дает равномерное распределение тепловой и влагообеспеченности и повышает устойчивость территорий к антропогенному воздействию [24].

Таким образом, выбранные объекты исследования имеют общие и характерные черты ландшафтов, поэтому в данной работе была применена методика интегральной устойчивости ландшафта. Исходные данные и основные показатели приняты по аналогии с соответствующими климатическим зонам.

Расчетный показатель ИПУЛ характеризует территорию на основе ряда признаков и соответствующей им оценочной шкалы. Всего существует 9 признаков, принятых для оценки устойчивости ландшафта: радиационный баланс, радиационный индекс сухости, ветровой режим (а — количество дней со штилями в году, б — количество дней с сильными ветрами), интенсивность геоматических процессов, устойчивость составных частей ландшафта, контрастность урочищ в ландшафте, защищенность грунтовых вод и индекс биологической эффективности климата [25, 26].

После оценки каждого показателя ландшафтам присваиваются классы устойчивости и соответствующие им баллы. При наличии всех оцененных показателей производится расчет устойчивости ландшафта:

$$\text{ИПУЛ} = \sum (q_i \cdot dr_i),$$

где  $q_i$  — нормированное значение  $i$ -го критерия (в диапазоне 0–1);

$dr_i$  — весовой коэффициент критерия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа свойств ландшафтов РХ и КО проведем расчет радиационного индекса сухости (К) и индекса биологической эффективности климата (индекс ТК). Данные для расчета и сам расчет индекса ТК представлены в таблицах 2 и 3.



Таблица 2. Исходные данные для расчета индекса ТК [24, 25, 26]

Table 2. Initial data for calculating the Climate Biological Efficiency Index (TK index) [24, 25, 26]

| Мес.<br>Тер. | 1                                                          | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12    |
|--------------|------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| РХ           | Среднемесячные значения температур по месяцам 2024 г. (°C) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|              | -19,1                                                      | -17,2 | -1,4 | 5,8  | 13,3 | 19,2 | 22,3 | 19,2 | 8,9  | 3,3  | -5,0 | -13,9 |
|              | Среднемесячные осадки 2024 г. (мм)                         |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
| КО           | 3                                                          | 2     | 5    | 9    | 42   | 69   | 107  | 72   | 50   | 13   | 4    | 8     |
|              | Среднемесячные значения температур по месяцам 2024 г. (°C) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|              | -16                                                        | -15,5 | -7   | 9,5  | 10   | 21   | 20   | 17   | 12   | 4    | -4,5 | -8,5  |
|              | Среднемесячные осадки 2024 г. (мм)                         |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|              | 12,7                                                       | 11,1  | 17,4 | 19,6 | 26,4 | 25,9 | 25,2 | 15,4 | 11,4 | 21,3 | 17,4 | 17,8  |

Таблица 3. Расчет индекса ТК

Table 3. Calculation of the TK index

| Показатель                           | Территория | Республика Хакасия | Костанайская область |
|--------------------------------------|------------|--------------------|----------------------|
| Суммарная активная температура, (°C) |            | 2255,6             | 2132                 |
| Годовая сумма осадков, (мм/год)      |            | 384                | 221,6                |
| Годовая испаряемость, (мм/год)       |            | 600                | 750                  |
| Индекс ТК                            |            | 14,44              | 6,4                  |
| Класс устойчивости                   |            | IV                 | II                   |

Таблица 4. Расчет радиационного индекса сухости

Table 4. Calculation of the radiation index of dryness

| Показатель                                       | Территория | Республика Хакасия | Костанайская область |
|--------------------------------------------------|------------|--------------------|----------------------|
| Радиационный баланс, (ккал/см <sup>2</sup> -год) |            | 35,5               | 30                   |
| Годовая сумма осадков, (мм)                      |            | 384                | 221,6                |
| Скрытая теплота парообразования воды, (ккал/кг)  |            | 585                |                      |
| Радиационный индекс сухости                      |            | 1,5                | 2,3                  |
| Класс устойчивости                               |            | IV                 | III                  |

Расчёт индекса ТК:

$$TK = \frac{T}{100} \cdot Ky,$$

где  $T$  — суммарная активная температура за период с среднесуточными температурами  $> 10^{\circ}\text{C}$ ;

$$Ky = r/Er,$$

где  $r$  — годовая сумма осадков;

$Er$  — годовая испаряемость.

При таких значениях индекса ТК интегральной показатель Республики Хакасия попадает в промежуток, характерный для территорий с устойчивостью выше средней (IV), в то время как для Костанайской области характерна устойчивость ниже средней (II).

Проведем расчет радиационного индекса сухости ( $K$ ) для данных территорий (исходные данные для расчета представлены в таблице 4):

$$K = \frac{R}{L \cdot r},$$

где  $R$  — радиационный баланс, ккал/м<sup>2</sup>-год;

$r$  — годовая сумма осадков, мм;

$L$  — скрытая теплота парообразования воды, ккал/кг [30].

В соответствии с классификацией, Республика Хакасия относится к территории с устойчивостью выше средней (IV), Костанайская область — средней (III). При определении остальных признаков ИПУЛ используется процедура сопоставления значений



**Таблица 5.** Расчет интегрального показателя устойчивости ландшафта Республики Хакасия и Костанайской области  
**Table 5.** Calculation of the integrated landscape resilience indicator for the Khakassia Republic and Kostanay Region

| №                                                     | Признак                                                  | Значение признака |     | Нормированное значение критерия |       | Класс устойчивости* |     |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------|-----|---------------------------------|-------|---------------------|-----|
|                                                       |                                                          | РХ                | КО  | РХ                              | КО    | РХ                  | КО  |
| 1                                                     | Радиационный баланс                                      | 35,5              | 30  | 0,47                            | 0,41  | IV                  | III |
| 2                                                     | Радиационный индекс сухости                              | 1,5               | 2,3 | 0,78                            | 0,61  | IV                  | III |
| 3                                                     | Ветровой режим:<br>а) количество дней со штилями в году  | 4                 | 4   | 0,80                            | 0,80  | IV                  | IV  |
| 4                                                     | Ветровой режим:<br>б) количество дней с сильными ветрами | 2                 | 3   | 0,60                            | 0,40  | IV                  | IV  |
| 5                                                     | Интенсивность геоматических процессов                    | 10                | 17  | 0,50                            | 0,85  | III                 | IV  |
| 6                                                     | Устойчивость составных частей ландшафта                  | 4                 | 4   | 0,70                            | 0,70  | IV                  | IV  |
| 7                                                     | Контрастность урочищ в ландшафте                         | 3                 | 4   | 0,50                            | 0,70  | III                 | IV  |
| 8                                                     | Защищенность грунтовых вод                               | 3                 | 4   | 0,50                            | 0,70  | III                 | IV  |
| 9                                                     | Индекс биологической эффективности климата               | 14,4              | 6,4 | 0,72                            | 0,32  | IV                  | II  |
| Интегральный показатель устойчивости ландшафта (ИПУЛ) |                                                          |                   |     | 0,619                           | 0,532 | IV                  | III |

\*II – устойчивость ниже средней; III – средняя устойчивость; IV – устойчивость выше средней



**Рисунок 1.** Сравнение нормированных значений критериев устойчивости РХ и КО

**Figure 1.** Comparison of normalized sustainability criteria values in RK and KR

показателей с их пороговыми и промежуточными уровнями, соответствующими конкретным классам устойчивости территории. На основе этих значений была сформирована таблица 5, где рассмотрены отдельные показатели, входящие в расчетную величину ИПУЛ для двух регионов. Весовой коэффициент критериев ( $dr_i$ ) и их вклад в общее значение устойчивости территории для всех рассмотренных параметров составляет 1/9.

Значение ИПУЛ, находящееся в интервале 0–0,198, соответствует минимальной устойчивости ландшафта (I); 0,198–0,392 — устойчивость ниже средней (II); 0,392–0,588 — средняя устойчивость (III); 0,588–0,793 — устойчивость выше средней (IV); значения 0,793–1,00 соответствуют максимальной устойчивости (V) [26].

Для наглядности соответствующих расчетных величин устойчивости рассмотренных ландшафтов построена

круговая диаграмма (см. рисунок 1) по нормированным значениям критериев.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показано в таблице 5, Республика Хакасия характеризуется более стабильным состоянием природных систем: суммарный интегральный показатель устойчивости составляет 0,619, что соответствует уровню выше среднего. Костанайская область Казахстана демонстрирует несколько более низкие значения: ее ИПУЛ равен 0,532, что указывает на среднюю степень устойчивости. Сравнение нормированных значений критериев устойчивости ландшафта, рассчитанных нами для РХ и КО, представлены на рисунке 1.

Графическое отображение нормированных показателей позволяет нагляднее оценить их соотношение для обеих территорий. Видно, что, несмотря на более высокие значения по отдельным критериям в КО, РХ в целом отличается большей сбалансированностью и равномерностью их распределения, что подтверждает большую устойчивость состояния этой природно-антропогенной зоны. Наиболее уязвимы контрастность урочищ в ландшафте и защищённость грунтовых вод, которые являются важным источником водообеспечения и качества жизни для населения, проживающего на территории этой климатической зоны. Особую настороженность вызывает радиационный баланс, он должен быть учтен в энергообеспеченности данной территории. В связи с этим необходимо учитывать пространственную организацию инфраструктурных объектов нового поколения на стадии разработки инвестиционных проектов, которые отражают общую тенденцию развития суверенных государств в особых климатических зонах.

## Список литературы

1. СанПин 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: [https://mrgu31.fmba.gov.ru/upload/iblock/e45/evif3igb1niegp1g2oaqxajltqqlk1wm/Post-12\\_-3685.pdf](https://mrgu31.fmba.gov.ru/upload/iblock/e45/evif3igb1niegp1g2oaqxajltqqlk1wm/Post-12_-3685.pdf) (дата обращения: 09.10.2025).
2. Национальный атлас России. National atlas. URL: <https://nationalatlas.ru/> (дата обращения: 10.10.2025).
3. Афанасьев А. А. Технологический суверенитет: основные направления политики по его достижению в России // А. А. Афанасьев. Технологический суверенитет: к вопросу о сущности // Креативная экономика. — 2022. — № 10. — DOI: 10.18334/ce. 16.10.116406.
4. Гусев А. П. Оценка состояния и динамики геологической среды техногенно нагруженных территорий (на примере Гомельской области) // Российский журнал прикладной экологии. 2025. № 3. С. 4–10. DOI: 10.24852/2411-7374.2025.3.04.10.
5. Гусев А. П. Газогеохимические индикаторы геодинамически активных зон // Литасфера. 2025. № 1 (62). С. 147–156.
6. Технологический суверенитет: платформа суверенного технологического развития. URL: <https://ts.nti2035.ru> (дата обращения: 13.10.2025).
7. Дягилева А. Б., Смирнова А. И., Ленивец П. И. Лесопромышленный комплекс и процесс техногенеза // Известия вузов. Лесной журнал. 2025. № 1. С. 177–196.
8. География: официальный портал исполнительных органов Республики Хакасия. URL: <https://r-19.ru/about-khakasia/geography> (дата обращения: 09.10.2025).
9. Kazhydromet. Костанайская область. URL: <https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/72/file/5ec145504ea54-oblast.pdf> (дата обращения: 11.10.2025).
10. Климат республики Хакасия // Travel Association. URL: [https://trasa.ru/region/hakasiya\\_clim.html](https://trasa.ru/region/hakasiya_clim.html) (дата обращения: 15.10.2025).
11. Казгидромет: ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана / Научно-исследовательский центр Казгидромет; Республиканское государственное предприятие «Казгидромет». 2023. URL: [https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/1891/file/675274ea2635aezhegodnyy-byulleten-ik-za-2023\\_rus\\_ot\\_27-11-24.pdf](https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/1891/file/675274ea2635aezhegodnyy-byulleten-ik-za-2023_rus_ot_27-11-24.pdf) (дата обращения: 10.10.2025).
12. Самойлова Г. С., Горячко М. Д., Кызласов И. Л. Хакасия // Большая российская энциклопедия. URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/5454659> (дата обращения: 17.10.2025).
13. Агроклиматические ресурсы Костанайской области: научно-прикладной справочник / Под ред. С. С. Байшолонова. Астана, 2018. 139 с. ISBN 978–601–7150–86–0.
14. Пережогин Ю. В. Таксономический анализ флоры Костанайской области (Северный Казахстан) // Вестник ОГУ. 2008. № 5 (86). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/taksonomicheskij-analiz-flory-kostanayskoy-oblasti-severnuy-kazakhstan> (дата обращения: 24.10.2025).
15. Ежегодная общественная резолюция по охране окружающей среды и экологическому развитию Российской Федерации. Москва, 2025. URL: <https://forumeco.ru/conf2025/resolution/resolution-2025> (дата обращения: 21.10.2025).
16. Единая платформа интернет-ресурсов государственных органов. URL: <https://www.gov.kz> (дата обращения: 21.10.2025).
17. Tazhiyeva A., Henebry G. M., Tyurin A. Spatio-temporal analysis of the soil threats in the Kostanay Region, northern Kazakhstan using remote sensing techniques // Soil Science Annual, 2022, Vol. 73 (1), pp. 1–12. DOI: 10.37501/soilsa/208822.
18. Abylkasymova A. O., Selezneva A. I., Zholdasov B. T. Assessment of soil pollution and erosion processes in the Republic of Kazakhstan according to literary data // Почвоведение. 2023. № 6. С. 743–759. DOI: 10.24852/0032-180X-2023-6-743-759.



19. Главное управление МЧС России по Республике Хакасия. URL: <https://19.mchs.gov.ru> (дата обращения: 20.10.2025).
20. Лысанова Г. И., Семенов Ю. М., Сороковой А. А. Ландшафтное картографирование Республики Хакасия // Геодезия и картография. — 2016. — № 12. — С. 16–23. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-918-12-16-23.
21. Белошейкина А. В., Таловская А. В., Языков Е. Г. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова территории Сорского ГОКа (Республика Хакасия). URL: <https://earchive.tpu.ru/jspui/handle/11683/57876> (дата обращения: 02.12.2025).
22. Lee E. H., Beedlow P. A., Waschmann R. S., Tingey D. T., Wickham C., Cline S., Bollman M., Carlile C. Douglas-fir displays a range of growth responses to temperature, water, and Swiss needle cast in western Oregon, USA // Agriculture and forest meteorology. 2016. Vol. 221. Pp. 176–188.
23. Федеральное агентство водных ресурсов — официальный сайт. URL: [voda.gov.ru](http://voda.gov.ru) (дата обращения: 22.10.2025).
24. Информация о субъектах РФ. Федеральное агентство водных ресурсов. URL: <https://voda.gov.ru/maps/respublika-khakasiya/> (дата обращения: 23.10.2025).
25. Шаркова В. А., Димова Е. В., Бильдина А. Ф. Характеристика спектра приобретенной (вторичной) лекарственной устойчивости штаммов *m. tuberculosis* у детей и подростков приморского края // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 3. С. 127–127.
26. Дмитриев В. В., Огурцов А. Н. Устойчивость сложных систем в природе и обществе: методология, оценка, результаты. Санкт-Петербургский государственный университет // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 72–84.
27. Изменение климата Хакасия. Meteoblue: официальный сайт. URL: [https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Хакасия\\_Россия\\_1503834/](https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Хакасия_Россия_1503834/) (дата обращения: 25.10.2025).
28. Погода в Абакане по месяцам в 2024 году. // World weather: официальный сайт. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/abakan/2024> (дата обращения: 21.10.2025).
29. Архив погоды в Костанае. // Gismeteo, официальный сайт. URL: <https://www.gismeteo.ru/weather-kostanay-4628/archive> (дата обращения: 25.10.2025).
30. Экологическое управление территориально-производственными комплексами: учеб. пособие. Часть 1 / А. Б. Дягилева. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. 136 с. ISBN 978-5-91646-398-9.
3. Afanasyev A. A. Technological Sovereignty: Main Directions of Policy for Its Achievement in Russia, 2022; Afanasyev A. A. Technological Sovereignty: On the Issue of Its Essence // Creative Economy. 2022; (10). DOI: 10.18334/ce.16.10.116406.
4. Gusev A. P. (2025). Assessment of the state and dynamics of the geological environment of technogenically loaded territories (using the example of The Gomel Region). Russian Journal of Applied Ecology. 2025; (3):4–10. DOI: 10.24852/2411-7374.2025.3.04.10.
5. Gusev A. P. Gas-geochemical indicators of geodynamically active zones. The lithosphere. 2025; (1 (62)): 147–156. URL: <https://litasfera.geologiya.by/jour/article/view/80> (accessed: 10.11.2025).
6. Platform for Sovereign Technological Development. Technological Sovereignty. URL: <https://ts.nti2035.ru> (accessed: 13.10.2025).
7. Dyagileva A. B., Smirnova A. I., Lenivtsev P. I. Forest Industry Complex and the Process of Technogenesis // Forestry Journal. 2025; (1):177–196.
8. Geography. Official Portal of Executive Authorities of the Republic of Khakassia. URL: <https://r-19.ru/about-khakassia/geography> (accessed: 09.10.2025).
9. Kazhydromet. Kostanay Region. URL: <https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/72/file/5ec145504ea54-oblast.pdf> (accessed: 11.10.2025).
10. Climate of the Republic of Khakassia. TravelAssociation. URL: [https://trasa.ru/region/hakasiya\\_clim.html](https://trasa.ru/region/hakasiya_clim.html) (accessed: 15.10.2025).
11. Kazhydromet. Annual Bulletin on the Monitoring of the State and Changes of the Climate of Kazakhstan: 2023 / Research Center of Kazhydromet, Republican State Enterprise “Kazhydromet”. — URL: [https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/1891/file/675274ea2635aetzhegodnyy-byulleten-ik-za-2023\\_rus\\_ot\\_27-11-24.pdf](https://www.kazhydromet.kz/uploads/files/1891/file/675274ea2635aetzhegodnyy-byulleten-ik-za-2023_rus_ot_27-11-24.pdf) (accessed: 10.10.2025).
12. Samoylova G. S., Goryachko M. D., Kyzlasov I. L. Khakassia // Great Russian Encyclopedia. URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/5454659> (accessed: 17.10.2025).
13. Agroclimatic Resources of the Kostanay Region: Scientific and Applied Reference Book / Ed. by Baisholanov S. S. — Astana. — 139 p. ISBN 978–601–7150-86-0. URL: <https://ingeo.kz/wp-content/uploads/2017/11/Агроклиматические-ресурсы-Костанайской-области2.pdf> (accessed: 18.10.2025).
14. Perezhogin Yu. V. Taxonomic Analysis of the Flora of the Kostanay Region (Northern Kazakhstan) // Orenburg State University Bulletin. 2008; (5 (86)). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/taksonomicheskii-analiz-flory-kostanayskoy-oblasti-severnoy-kazahstan> (accessed: 24.10.2025).
15. Annual Public Resolution on Environmental Protection and Ecological Development of the Russian Federation. Moscow, 2025. URL: <https://forumeco.ru/conf2025/resolution/resolution-2025> (accessed: 21.10.2025).
16. Unified Platform of Internet Resources of Government Bodies. URL: <https://www.gov.kz> (accessed: 21.10.2025).

## References

1. Hygienic Standard 1.2.3685–21. Hygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and/or Harmlessness to Humans of Environmental Factors. URL: [https://mru31.fmba.gov.ru/upload/iblock/e45/evif3igb1niegp1g2oaqxjltqqklwm/Post-12-\\_-3685.pdf](https://mru31.fmba.gov.ru/upload/iblock/e45/evif3igb1niegp1g2oaqxjltqqklwm/Post-12-_-3685.pdf) (accessed: 09.10.2025).
2. National Atlas of Russia. Nationalatlas. URL: <https://nationalatlas.ru> (accessed: 10.10.2025).



17. Tazhiyeva A., Henebry G. M., Tyurin A. *Spatio-temporal analysis of the soil threats in the Kostanay Region, northern Kazakhstan using remote sensing techniques*. Soil Science Annual, 2022, Vol. 73 (1), pp. 1–12. DOI: 10.37501/soilsa/208822.
18. Abylkasymova A. O., Selezneva A. I., Zholdasov B. T. Assessment of Soil Contamination and Erosion Processes in the Republic of Kazakhstan Based on Literature Data. Soil Science, 2023, No. 6, pp. 743–759. DOI: 10.24852/0032-180X-2023-6-743-759.
19. Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Republic of Khakassia. URL: <https://19.mchs.gov.ru> (accessed: 20.10.2025).
20. Lysanova G. I., Semenov Yu. M., Sorokovoy A. A., Landscape Mapping of the Republic of Khakassia // Geodesy and Cartography. 2016; (12):16–23. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-918-12-16-23.
21. Belosheikina A. V., Talovskaya A. V., Yazikov E. G. Ecological and Geochemical Assessment of the Soil Cover of the Sorsky Mining and Processing Plant Territory (Khakassia Republic). URL: <https://earchive.tpu.ru/jspui/handle/11683/57876> (accessed: 02.12.2025).
22. Federal Water Resources Agency — Official Website. URL: [voda.gov.ru/](http://voda.gov.ru/) (accessed: 22.10.2025).
23. Information on Subjects of the Russian Federation. Federal Water Resources Agency. URL: <https://voda.gov.ru/maps/respublika-khakasiya> (accessed: 23.10.2025).
24. Lee E. H., Beedlow P. A., Waschmann R. S., Tingey D. T., Wickham C., Cline S., Bollman M., Carlile C. Douglas-fir displays a range of growth responses to temperature, water, and Swiss needle cast in western Oregon, USA // Agriculture and forest meteorology. 2016; (221):176–188. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35156005> (accessed: 10.12.2025).
25. Sharkova V. A., Dimova E. V., Bildina A. F. Characteristics of the Spectrum of Acquired (Secondary) Drug Resistance of M.tuberculosis Strains in Children and Adolescents of Primorsky Krai // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2011; (3):127–127. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=1183> (accessed: 24.10.2025).
26. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N. Stability of Complex Systems in Nature and Society: Methodology, Assessment, Results. Saint Petersburg State University; Saint Petersburg State University. *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2017; (48):72–84.
27. Climate Change in Khakassia. Meteoblue: Official Website. URL: [https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Хакасия\\_Россия\\_1503834](https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Хакасия_Россия_1503834) (accessed: 25.10.2025).
28. Weather in Abakan by Month in 2024. World Weather: Official Website. URL: <https://world-weather.ru/pogoda/russia/abakan/2024> (accessed: 21.10.2025).
29. Weather Archive in Kostanay. Gismeteo: Official Website. URL: <https://www.gismeteo.ru/weather-kostanay-4628/archive> (accessed: 25.10.2025).
30. Environmental Management of Territorial-Production Complexes. Textbook. Part 1 / A. B. Dyagileva. St. Petersburg: HSHT SPbGUPTD, 2024. 136 p. ISBN 978-5-91646-398.

### ■ Информация об авторах

**Тарасова Екатерина Данииловна**, студент, Высшая школа технологии и энергетики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Российская Федерация, Санкт-Петербург, улица Ивана Черных, д. 4; e-mail [tarasova\\_ekaterina\\_10@mail.ru](mailto:tarasova_ekaterina_10@mail.ru).

**Матвеева Яна**, студент, Высшая школа технологии и энергетики ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Российская Федерация, Санкт-Петербург, улица Ивана Черных, д. 4; e-mail [yana-matveeva-03@mail.ru](mailto:yana-matveeva-03@mail.ru).

### ■ Information about the authors

**Tarasova Ekaterina**, student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; e-mail: [tarasova\\_ekaterina\\_10@mail.ru](mailto:tarasova_ekaterina_10@mail.ru).

**Matveeva Yana**, student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; e-mail: [yana-matveeva-03@mail.ru](mailto:yana-matveeva-03@mail.ru).

**Дягилева Алла Борисовна**, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург, улица Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 3808–0190, Author ID: 181347, ORCID: 0000-0001-5983-4550; e-mail: [abdiag@mail.ru](mailto:abdiag@mail.ru).

**Dyagileva Alla Borisovna**, Doc. Sci. in Chemistry, Professor, Professor at the Department of Environmental Protection and Sustainable Natural Resource Management of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN-code: 3808–0190, Author ID: 181347, ORCID: 0000-0001-5983-4550; e-mail: [abdiag@mail.ru](mailto:abdiag@mail.ru).



# ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ В ЛЕСАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Юрий Анатольевич Карасев, Виктор Михайлович Дьяченко,  
Владимир Александрович Марков

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

© Карасев Ю. А., Дьяченко В. М., Марков В. А., 2026

Автор-корреспондент: В. А. Марков, e-mail: mactor85@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию воздействия гусеничной и колесной техники на почвогрунты криолитозоны, представляющей собой особый регион земного шара, характеризующийся присутствием многолетнемерзлых пород. Авторы установили, что применение гусеничной техники позволяет минимизировать негативное воздействие на экологию лесов вечной мерзлоты по сравнению с использованием колесной техники. Этот положительный эффект достигается благодаря большему размеру пятна контакта элементов движителя с поверхностью почвы. Рассмотрены ключевые характеристики криолитозоны, включая наличие многолетней мерзлоты, зональность распространения, толщину мерзлого слоя, температурный режим и виды мерзлотных образований. Обозначено, что наличие многолетней мерзлоты создает особые условия для строительства инфраструктуры, добычи полезных ископаемых и сельскохозяйственного освоения земель. Подробно описаны трудности, связанные с освоением этих территорий, необходимость специальных технологий и оборудования, адаптированных к условиям мерзлых грунтов. Приведены статистические данные о распределении различных типов лесов на территориях с многолетней мерзлотой, подчеркивая важность северотаежных и притундровых лесов с точки зрения экологии. Проведен детальный анализ влияния различной лесной техники на состояние почвогрунтов, показано преимущество гусеничной техники перед колесной благодаря увеличенному пятну контакта. Упоминаются экспериментальные проекты, такие как шагающие харвестеры, направленные на уменьшение разрушительного воздействия на лесные массивы, хотя их коммерческое внедрение оказалось затруднительным. Отмечаются преимущества гусеничной техники в условиях Крайнего Севера, включая простоту конструкции, производства и обслуживания, а также лучшая проходимость на сложных почвах. Вместе с тем указаны недостатки, такие как больший расход топлива и худшие динамические характеристики. Исследование подтверждает, что выбор гусеничной техники для работы в лесах криолитозоны обоснован как с экологической, так и с технической точек зрения. Результаты анализа имеют важное значение для повышения эффективности и устойчивости лесного хозяйства в экстремальных климатических условиях.

**Ключевые слова:** криолитозона, лесные машины, пятно контакта, почвогрунт, гусеничные машины, колесные машины

**Для цитирования:** Карасев Ю. А., Дьяченко В. М., Марков В. А. Экологическое обоснование применения гусеничной техники в лесах криолитозоны. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 58–65. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_58-65

## ENVIRONMENTAL JUSTIFICATION FOR EMPLOYING TRACKED MACHINERY IN CRYOLITHOZONE FORESTS

Yuri Anatolyevich Karasev, Viktor Mikhailovich Dyachenko, Vladimir Aleksandrovich Markov

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

Corresponding author: V.A. Markov, e-mail: mactor85@mail.ru

## ABSTRACT

This article investigates the impact of tracked and wheeled vehicles on the soils of the cryolithozone, a unique global region characterized by the presence of permafrost. The authors established that the use of tracked vehicles minimizes



the negative impact on the ecology of permafrost forests compared to using of wheeled vehicles. This positive effect is achieved due to the larger contact patch between the running gear components and the soil surface. The key characteristics of the cryolithozone are considered, including the presence of permafrost, the zonal distribution, the thickness of the frozen layer, the temperature condition, and the types of permafrost formations. The presence of permafrost creates special conditions for infrastructure development, mineral extraction, and agricultural land use. The difficulties associated with developing these territories are described in detail, along with the necessity for special technologies and equipment adapted to frozen ground conditions. Statistical data on the distribution of various forest types within permafrost territories are presented, underlining the ecological importance of northern taiga and forest-tundra woodlands. A detailed analysis of the impact of various forestry machines on soil conditions was conducted. The advantage of tracked vehicles over wheeled ones was demonstrated, attributed to their larger contact patch. Experimental projects, such as walking harvesters, aimed at reducing destructive impact on forest ecosystems are mentioned, although their commercial implementation has proven challenging. The advantages of tracked vehicles in the conditions of the Far North are noted, including simplicity of their design, manufacture and maintenance, as well as better cross-country ability on difficult soils. At the same time, disadvantages are pointed out, including increased fuel consumption and poorer dynamic performance. The study demonstrates that using tracked machinery in cryolithozone forests is well-founded on both environmental and technical grounds. The analysis results are of significant importance for enhancing the efficiency and sustainability of forestry under extreme climatic conditions.

**Keywords:** cryolithozone, forestry machines, contact patch, soil ground, tracked vehicle, wheeled vehicles

**For citation:** Karasev Yu. A., Dyachenko V. M., Markov V. A. (2026) Environmental justification for employing tracked machinery In cryolithozone forests. Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 58–65. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_58-65

## ВВЕДЕНИЕ

Криолитозона представляет собой особую зону земной коры, характеризующуюся наличием многолетнемерзлых пород, сохраняющих отрицательную температуру круглый год. Термин «криолитозона» образован от греческих слов («κρύος» — холод, мороз и «λίθος» — камень) [1]. Это явление характерно преимущественно для высоких широт Арктики и Субарктики, а также высокогорных районов умеренных зон.

Особенности криолитозоны были сформулированы учеными кафедры технологии и оборудования лесного комплекса Арктического государственного агротехнологического университета:

- 1. Многолетняя мерзлота:** подземные слои грунта находятся в замороженном состоянии постоянно или большую часть года. Температура пород ниже точки замерзания воды (менее +0 °C).
- 2. Зональность распространения:** наиболее широко распространена в полярных регионах Северного полушария (Сибирь, Аляска, Канада), а также в горных районах Кавказа, Алтая, Урала и других регионов с суровым климатом.
- 3. Толщина мерзлого слоя:** глубина промерзших грунтов варьируется от десятков сантиметров до сотен метров и даже километров. Например, на севере Сибири мощность вечномерзлых слоев достигает 1500 м.

**4. Температурный режим:** верхние горизонты грунтов испытывают сезонные колебания температуры (тепло-заморозка), тогда как нижележащие остаются стабильно мерзлыми весь год.

### 5. Типы мерзлотных образований:

- солифлюкционные процессы: движение грунтовых масс по склону под действием циклов замораживания-оттаивания;
- бугры пучения: ледяные образования, возникающие вследствие накопления льда в грунте;
- полигональные структуры: формирование полигонов трещин вследствие многократного замораживания и растрескивания поверхности почвы.

**6. Экономическое значение:** наличие многолетней мерзлоты существенно влияет на строительство инфраструктуры, добычу полезных ископаемых и сельскохозяйственное использование земель. Необходимо учитывать специфику строительства фундаментов зданий, прокладки трубопроводов и дорог, учитывая воздействие низких температур и подвижек грунта.

В криолитозоне происходят специфические геологические, геоморфологические и экологические процессы, связанные с промерзанием и оттаиванием грунтов. Здесь распространены вечномерзлые грунты, которые занимают около 25% суши Земли. Невозможность прогрева почвы в этой зоне вызвана наличием подземных ледников, оказывающих существенное влияние на поверхностную температуру.

Криолитозона оказывает значительное влияние на хозяйственную деятельность человека в высоких широтах. Освоение этих территорий требует особых технологий и техники, учитывающих специфику мерзлых грунтов. Криолитозона также имеет обобщенное название «Крайний Север».

Важно отметить, что Крайний Север не следует отождествлять с Арктикой. Географически Арктика меньше и заканчивается на южной границе тундры, — то есть она территориально входит в Крайний Север и является той ее частью, на которой нет лесных насаждений.

В Российской Федерации около 65% территории, покрытой многолетней мерзлотой, входит в зону хвойных бореальных лесов, еще 2,5% территории приходится на лесотундру, 1,5% — лесостепь, оставшиеся 31% территории многолетней мерзлоты занимают открытые пространства — тундровые, степные, пустынные [2].

На Крайнем Севере находятся арктическая, тундровая, лесотундровая и северотаежная зоны. Для коммерческой эксплуатации лесов наибольший интерес представляет последняя, однако с экологической точки зрения значима и лесотундровая зона (притундровые леса). Несмотря на отсутствие значительных запасов ценной древесины, эти леса выполняют

важные экологические функции: накапливают углерод (от 20 до 45 тонн на гектар), снижают заболочиваемость территорий благодаря испарению влаги растениями, очищают атмосферу от загрязнений, вызванных деятельностью предприятий добывающей промышленности региона. Поэтому проведение необходимых мероприятий по уходу за этими лесами требует обязательного применения специализированной техники и оборудования.

Леса, произрастающие в криолитозоне, крайне чувствительны к антропогенному воздействию; вмешательство человека может нанести непоправимый вред хрупкой северной природе. Способность лесов криолитозоны восстанавливаться после природных и антропогенных нарушений значительно меньше, чем, например, в умеренном климате. И с очевидным потеплением климата, наблюдаемым в последние десятилетия, способность экосистем лесов криолитозоны восстанавливать нарушения все более снижается [3]. Согласно Приказу Министерства ресурсов и экологии РФ, лесозаготовительные работы в данной географической зоне можно проводить лишь в зимний период. Только таким образом возможно уберечь почвогрунты и корневые системы деревьев от разрушения. Однако в летний период проводятся работы по лесовосстановлению, уходу за насаждениями, а также противопожарные мероприятия, требующие передвижения тяжелой техники по почвогрунту.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются почвогрунты северных регионов Российской Федерации (Республика Карелия, Республика Саха (Якутия), Архангельская область).

На деформацию почвогрунтов северных лесов, особенно лесов криолитозоны, под воздействием движителей тяжелых лесных машин, преобладающих в лесном хозяйстве и в лесозаготовительном производстве предприятий и организаций Российской Федерации, значительное влияние оказывают особенности их устройства [4]. В ходе проведения исследований научной школой «Инновационных разработок в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» было установлено, что колесная техника наносит более высокий вред почвогрунтам, чем гусеничная. Это связано в первую очередь с пятном контакта элементов движителя, которое значительно больше у гусениц, чем у колес.

На рисунке 2 показан сравнительный анализ образования глубины колеи различными лесными машинами. Из данного графика видно, что колесный трактор ЛТ-157 уже после первого прохода оставляет под собой значительно более глубокую колею, чем гусеничные

тракторы, а с повышением количества проходов данная динамика увеличивается. Естественным ограничением глубины колеи в данном случае может являться лишь клиренс лесной машины. При многократных проходах колесной лесной машины происходит разрушение подстилающего слоя грунта, приводящее к его размягчению и значительному увеличению глубины колеи. При прохождении же гусеничной машины воздействие на почвогрунт значительно более щадящее [5].

Различную динамику формирования колеи отражает рисунок 3. На устойчивых почвогрунтах первоначальный контакт движителя вызывает деформацию лишь поверхностного слоя, после чего увеличение глубины колеи замедляется, следуя закону, близкому к логарифмическому (вариант 1). Второй вариант на рисунке отражает аналогичную закономерность, однако глубина деформации верхнего слоя почвы значительно больше. Третий вариант показывает ситуацию на мягких грунтах, где образование колеи продолжается непрерывно, увеличиваясь вплоть до момента потери проходимости пути, когда глубина достигает уровня дорожного просвета транспортного средства. Темпы развития этого процесса различаются, что видно на примере кривых 3





Рисунок 1. Территориальное распространение понятия «Крайний Север»

Figure 1. Geographic distribution of the concept "The Far North"

и 4. Наконец, при повторных проездах и повышенных нагрузках, характерных для колёсных машин, нижний слой грунта теряет свою прочность, вызывая резкое углубление колеи (вариант 5), что может привести к застреванию или затоплению машины.

Ширина гусениц играет важную роль для снижения давления на почвогрунт. Для лесных машин выбирают наиболее широкие гусеницы, увеличивая тем самым пятно контакта движителя с почвогрунтом. Заводы-изготовители производят стандартные заводские траки для экскаваторов и другой дорожной и складской техники шириной 600 мм; в то же время для лесной техники применяют гусеницы шириной 700 мм. С учетом «хрупкости» почвы в криолитозоне для северных лесов целесообразно было бы применять гусеницы с менее выраженными грунтозацепами, которые повреждают корневую систему деревьев при проходе лесной машины. Ни рисунке 4 представлены гусеницы дорожной и лесной техники [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Альтернативой гусеницам и колесам могут быть нестандартные элементы движателей, такие как «ноги». Экспериментальные харвестеры фирмы Timberjack оснащались шагающим движителем (рисунок 5), общее количество произведённых единиц составило менее

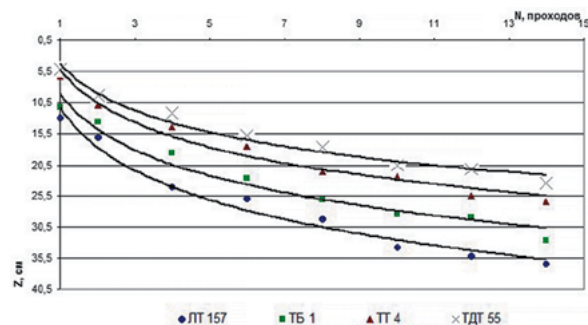


Рисунок 2. Образование колеи различными лесными машинами

Figure 2. Track formation by various forestry machines

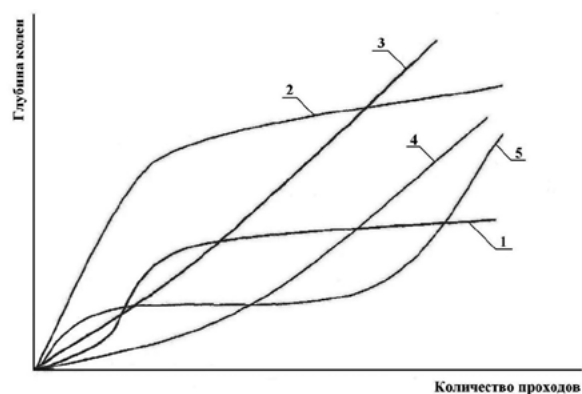


Рисунок 3. Типовые варианты динамики колееобразования

Figure 3. Typical patterns of rut formation dynamics



**Рисунок 4.** Гусеницы дорожной и лесной техники: а) гусеница экскаватора — 600 мм; б) гусеница лесной машины — 700 мм  
**Figure 4.** Crawler tracks of road and forestry machines a) excavator track — 600 mm; b) forestry machine track — 700 mm



**Рисунок 5.** Экспериментальный харвестер Timberjack  
**Figure 5.** Timberjack experimental harvester

10 экземпляров. Основная цель внедрения подобной схемы заключалась в уменьшении разрушающего влияния ходового устройства на почву лесного массива, особенно на участках с уклоном. Испытания подтвердили успешность инженерного решения — достигнуто минимальное воздействие техники на почвогрунт [7]. Однако столь инновационная конструкция изначально

уступала колёсным и гусеничным аналогам по эксплуатационным характеристикам и требовала значительных усилий для улучшения управляемости. Если бы компания Timberjack продолжила развитие проекта, вполне вероятно, что лесозаготовительная техника на шагающих шасси стала бы привычным элементом отрасли. Тем не менее глобальный экономический кризис 2008 г.

привёл к финансовому краху Timberjack, её последующему поглощению американской корпорацией John Deere и закрытию перспективного направления исследований новым владельцем, который счел проект экономически неоправданным. Большая часть опытных образцов ныне экспонируется в специализированных музеях, включая музей леса Финляндии «Lusto».

Преобладание гусеничного хода в российском лесном машиностроении обусловлено рядом факторов. Во-первых, такие механизмы проще конструировать, производить и обслуживать. Помимо этого, значительная доля почв (примерно 60%) лесных территорий России относится к III и IV категориям, на которых гусеничные машины летом демонстрируют существенно лучшую проходимость по сравнению с колесными аналогами [8].

Вопрос выбора подходящей техники для работы в лесах криолитозоны обусловлен особыми условиями окружающей среды, такими как низкая температура, сложность ландшафта и высокая чувствительность почвогрунтов к внешним механическим воздействиям. В исследовании рассмотрены различия воздействия гусеничной и колесной техники на структуру и свойства почв, а также предложены рекомендации по выбору оптимальной транспортной базы для защиты уникальных природных комплексов Севера.

Исследования показали, что применение гусеничной техники способствует минимизации негативного воздействия на природу криолитозоны по следующим причинам:

- больший размер пятна контакта: увеличенная площадь взаимодействия с почвой снижает удельное давление на единицу площади, предотвращая глубокое проникновение механизма в землю и обеспечивая лучшее распределение нагрузки;
- проходимость: за счет большой ширины гусениц и равномерного распределения веса машины обеспечивается повышенная мобильность и маневренность даже на рыхлом или замерзшем грунте;
- экологическая безопасность: использование широких гусениц предотвращает повреждение корней растений и лишнюю компрессию верхних горизонтов почвы, способствуя сохранению естественных биоценозов.

Колесная техника, напротив, характеризуется большим давлением на небольшие участки земли, что ведет к образованию глубоких следов и ухудшению состояния почвенного покрова. Колея, оставляемая колесными транспортными средствами, нарушает целостность гумуса и препятствует восстановлению растительного покрова.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование гусеничного движителя имеет преимущества перед колесным вариантом, особенно заметные в условиях бездорожья или слабых грунтов. Благодаря увеличенной площади соприкосновения с поверхностью почвы давление, оказываемое таким транспортным средством на грунт, существенно снижается. Это достигается за счёт распределения массы машины на большую поверхность, что позволяет минимизировать негативное воздействие на почву [9].

При уменьшении давления снижается и степень погружения ходового механизма в грунт. Таким образом, слой почвы, испытывающей непосредственное влияние транспортного средства, становится тоньше. Это означает меньшую деформацию грунта, снижение уплотнения поверхностного слоя и сохранение большей части структуры верхнего плодородного слоя. Такое свойство имеет особое значение в сельскохозяйственной технике, лесной промышленности и строительстве, где важно свести к минимуму ущерб природному покрытию и обеспечить устойчивость техники даже на мягких грунтах [10].

Таким образом, преимущества гусеничных машин заключаются именно в их способности снижать нагрузку на единицу площади поверхности и обеспечивать повышенную проходимость и экологичность эксплуатации в сложных природных условиях [11].

Применение гусеничной техники наиболее предпочтительно для условий Крайнего Севера не только с экологической, но и с эксплуатационной стороны. Гусеницы, в отличие от колес, не подвержены таким факторам, как снижение давления эластичности из-за низких температур, повышенный износ, разрывы и порезы. Однако и у гусеничной техники есть свои недостатки по сравнению с колесной: это в первую очередь динамические характеристики и расход топлива, который у гусеничного трактора значительно выше, чем у колесного трактора с таким же объемом двигателя. Альтернативой в некоторых случаях могут являться съемные гусеницы для колесных машин, однако стоимость их достаточно велика и широкого применения данная технология у российских лесозаготовителей не нашла.

## Список литературы

1. Дударев О. В., Чаркин А. Н., Шахов Н. Е. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России: монография. Томск: ТПУ, 2016. 192 с.
2. Григорьев И. В., Чураков А. А. Перспективный машинный комплекс для заготовки древесины // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. Материалы



- II международного научно-практического форума. 2017. С. 170–175.
3. Константинов П. Я., Аргунов Р. Н., Герасимов Е. Ю., Угаров И. С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. Т. IV. № 3. 2006. С. 15–22.
  4. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы международной научно-технической конференции. 2017. С. 136–139.
  5. Григорьева О. И., Давтян А. Б., Гринько О. И., Войнаш С. А. Концепция универсальной машины для выполнения лесохозяйственных работ и тушения лесных пожаров // Машиностроение: новые концепции и технологии: Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2020. С. 45–49.
  6. Сафин Р. Р., Сафин Р. Р., Григорьев И. В., Григорьева О. И., Разумов Е. Ю. Технология и машины лесовосстановительных работ. М.: Деревообрабатывающая промышленность, 2015. 230 с.
  7. Григорьева О. И., Давтян А. Б., Гринько О. И. Перспективы импортозамещения в производстве лесохозяйственных и лесопожарных машин в России // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Красноярск, 2020. С. 66–69.
  8. Бурмистрова О. Н., Просужих А. А., Хитров Е. Г., Кунитская О. А., Лунова Е. Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 3 (381). С. 101–116.
  9. Rudov S. E. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain / S. E. Rudov, A. M. Voronova, J. M. Chemshikova, E. V. Teterleva, I. N. Kruchinin, Yu. Zh. Dondokov, M. N. Khaldeeva, I. A. Burtseva, V. V. Danilov, I. V. Grigorev // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2019. Vol. 16. No. 4. Pp. 61–75.
  10. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Чураков А. А. Эффективные технологии и системы машин для малообъемных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61–66.
  11. Кунитская О. А. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии / О. А. Кунитская, Н. А. Чернуцкий, М. В. Дербин, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. И. Григорьева. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.

## References

1. Dudarev O. V., Charkin A. N. and Shakhov N. E. Modern Lithomorphogenesis on the East Arctic Shelf of Russia: monograph. Tomsk: TPU, 2016. 192 p.
2. Grigoriev I. V., Churakov A. A. (2017). Prospective machine complex for wood harvesting. In Natural Resources and Ecology of the Far Eastern Region: Proceedings of the Second International Scientific-Practical Forum, pp. 170–175.
3. Konstantinov P. Ya., Argunov R. N., Gerasimov E. Yu., Ugarev I. S. (2006). On the relationship between seasonal thaw depth and interannual variability in mean annual ground temperature. Earth's Cryosphere, vol. IV, no. 3, pp. 15–22.
4. Grigoriev I. V., Churakov A. A., Grigorieva O. I. (2017). Promising design of an all-terrain vehicle for forestry. Transport Systems and Technologies: Materials of the International Scientific-Technical Conference, pp. 136–139.
5. Grigorieva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I., Voinash S. A. (2020). Concept of a universal machine for performing forestry work and extinguishing forest fires. Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies: All-Russian Scientific-Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Krasnoyarsk, pp. 45–49.
6. Safin R. R., Grigoriev I. V., Grigorieva O. I., Razumov E. Yu. (2015). Technology and Machines for Forest Restoration Work. Moscow: Woodworking Industry Publ., 230 p.
7. Grigorieva O. I., Davtyan A. B., Grinko O. I. (2020). Prospects for import substitution in production of forestry and fire-fighting machinery in Russia. Forestry Exploitation and Comprehensive Use of Timber: Collection of Articles from the All-Russian Scientific-Practical Conference, Krasnoyarsk, pp. 66–69.
8. Burmistrova O. N., Prosuzhikh A. A., Khitrov, E. G., Kunitskaya, O. A., Luneva, E. N. (2021). Theoretical studies of forwarder productivity under restrictions on soil impact. Bulletin of Higher Educational Institutions. Forestry Journal, no. 3 (381), pp. 101–116.
9. Rudov, S. E., Voronova, A. M., Chemshikova, J. M., Teterleva, E. V., Kruchinin, I. N., Dondokov, Y. Zh., Khaldeeva, M. N., Burtseva, I. A., Danilov, V. V., Grigorev, I. V. (2019). Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. Asian Journal of Water, Environment and Pollution, vol. 16, no. 4, pp. 61–75.
10. Grigoriev, I. V., Grigorieva, O. I., Churakov, A. A. (2018). Effective technologies and systems of machines for small-volume timber harvesting. Energy: Economics, Technique, Ecology, no. 2, pp. 61–66.
11. Kunitskaya O. A., Chernutsky N. A., Derbin M. V., Rudov S. E., Grigoriev, I. V., Grigorieva, O. I. (2019). Machine Harvesting of Timber According to Scandinavian Technology. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Education Institutions, 192 p.



## ■ Информация об авторах

**Карасев Юрий Анатольевич**, соискатель, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0009-0009-9080-2974; SPIN-код: 1726–2547, AuthorID: 1239150; e-mail: kya1105@mail.ru.

**Дьяченко Владимир Михайлович**, соискатель, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана

Черных, д. 4; ORCID: 0009-0003-0510-7579; e-mail: volodya.dyachenko1986@mail.ru.

**Марков Виктор Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин автоматизированных систем Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0000-0002-4986-4155; SPIN-код: 1503–7932; AuthorID: 821223; e-mail: mactor85@mail.ru.

## ■ Information about the authors

**Karasev Yuriy Anatolyevich**, external PhD student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: 0009-0009-9080-2974; SPIN-code: 1726–2547, AuthorID: 1239150; e-mail: kya1105@mail.ru.

**Dyachenko Vladimir Mikhailovich**, external PhD student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan

Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: 0009-0003-0510-7579; e-mail: volodya.dyachenko1986@mail.ru.

**Markov Viktor Alexandrovich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automated Machinery Systems of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: 0000-0002-4986-4155; SPIN-code: 1503–7932; AuthorID: 821223; e-mail: mactor85@mail.ru.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ОСНОВНЫХ ОТХОДОВ ЦБК ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЛИГОНОВ

Оксана Павловна Лысак, Андрей Валерьевич Епифанов

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

© Лысак О. П., Епифанов А. В., 2026

Автор-корреспондент: О. П. Лысак, e-mail: [olysak@bk.ru](mailto:olysak@bk.ru)

## АННОТАЦИЯ

Рекультивация полигонов, выведенных из эксплуатации, требует применения инженерных материалов, обладающих стабильными физическими, сорбционными и фильтрационными свойствами, обеспечивающими долговременную изоляцию отходов и снижение техногенной нагрузки на окружающую среду. В последние годы возрастает интерес к использованию отходов целлюлозно-бумажной промышленности как перспективного сырья для формирования изоляционных и технических слоев, что связано с их доступностью, контролируемым химическим составом и частичным функциональным сходством с минеральными грунтами природного происхождения. Целью работы является исследование свойств основных видов отходов целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК) и анализ их соответствия нормативным требованиям к материалам, применяемым для гидроизоляции полигонов. Рассмотрены наиболее распространенные отходы, образующиеся в процессах золообразования, каустизации, водоподготовки и механической очистки сточных вод, включая золу, песчаные фракции, мелкодисперсные минеральные осадки и продукты химических реакций известкования. В данной статье приведены сведения об основных физических свойствах отходов, их структуре и механизмах формирования. Практическая часть исследования включает лабораторное определение гранулометрического состава, коэффициентов фильтрации и плотности отходов с последующей оценкой их соответствия нормативным требованиям к материалам гидроизоляционных слоев. Отдельное внимание уделяется анализу водопроницаемости и способности материалов выполнять барьерные функции, что является ключевым критерием при выборе компонентов для рекультивации. Полученные результаты и обобщенные литературные данные позволяют предварительно оценить потенциал отходов ЦБК как компонентов инженерных слоев, а также определить перспективные направления дальнейших исследований — от оптимизации смесей до оценки долговременной стабильности техногрунтов.

**Ключевые слова:** отходы ЦБК, рекультивация, техногрунт, изоляционный слой, рекультивационное покрытие полигона

**Для цитирования:** Лысак О. П., Епифанов А. В. Исследование свойств основных отходов ЦБК для использования при рекультивации полигонов // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 66–72. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_66-72

## INVESTIGATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY WASTE CHARACTERISTICS FOR LANDFILL SITE REHABILITATION

Oksana Pavlovna Lysak, Andrey Valerievich Epifanov

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

Corresponding author: O. P. Lysak, e-mail: [olysak@bk.ru](mailto:olysak@bk.ru)

## ABSTRACT

Landfill remediation requires the use of engineered materials with stable physical, sorption, and filtration properties to ensure long-term waste isolation and reduce the anthropogenic load on the environment. Recently, pulp and paper mill waste have gained attention as a viable raw material for creating isolation and structural layers in engineering applications, owing to their abundance, predictable chemical makeup, and certain functional parallels with natural mineral soils. This study aims to investigate the characteristics of key waste types generated by a pulp and paper mill (PPM) and assess their suitability against regulatory standards for landfill waterproofing. The most common waste generated in the processes of



ash formation, causticization, water treatment, and mechanical wastewater treatment have been considered. These include ash, sand fractions, fine-dispersed mineral sediments, and chemical reaction products from liming. This paper presents data on the key physical characteristics, structure, and formation mechanisms of the waste materials. The experimental work consists of laboratory tests to determine the waste's particle size distribution, permeability coefficients, and bulk density. The results are then evaluated against technical standards for landfill impervious layer. Special emphasis is placed on assessing the materials' permeability and their efficacy as hydraulic barriers — key selection criteria for remediation layer components. Based on the experimental results and a synthesis of published data, the potential of PPM wastes as engineered layer constituents can be preliminarily evaluated. Key future research avenues are also defined, ranging from optimizing composite blends to assessing the long-term performance of resulting technogenic soils.

**Keywords:** pulp and paper mill waste, remediation, technogenic soil, insulating layer, landfill biocover system

**For citation:** Lysak O. P., Epifanov A. V. (2026) Investigation of pulp and paper industry waste characteristics for landfill site rehabilitation, *Technology and Energy*, 2026, vol. 1, no. 1, pp. 66–72, DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_66-72

## ВВЕДЕНИЕ

Рекультивация объектов размещения отходов является ключевым этапом их вывода из эксплуатации, она направлена на минимизацию миграции загрязняющих веществ в окружающую среду и на восстановление природно-хозяйственного потенциала территории. Нормативно-методическая база, в частности ИТС 17–2024 «Размещение отходов производства и потребления» [1], требует обеспечить верхнее изоляционное покрытие для исключения инфильтрации осадков, предотвращения ветровой и водной эрозии поверхности объекта размещения отходов, а также для создания условий для последующей биологической рекультивации.

Экономический и экологический подход заключается в использовании промышленных отходов как

компонентов техногрунта, что позволяет сократить закупку природных материалов и утилизировать накопленные отходы. В данной работе проведена оценка физических и фильтрационных характеристик основных отходов ЦБК, потенциально пригодных для применения в изоляционных и рекультивационных покрытиях полигона.

Актуальность исследования обусловлена растущими объемами отходов целлюлозно-бумажной промышленности, требующими экологически безопасной утилизации [10, 11, 12]. Современные исследования подтверждают, что отходы лесной промышленности и деревообработки могут эффективно применяться как компоненты технических слоев при рекультивации нарушенных земель [13, 15].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В практике рекультивации полигонов в основном применяются следующие виды изоляционных покрытий: природные материалы (глины, суглинки, песчаные грунты, обладающие низкой фильтрационной способностью и хорошей пластичностью), искусственные материалы (геомембраны, бентонитовые маты и покрытия на основе композиционных материалов, обеспечивающие практически полную герметичность), промышленные отходы (золы, шлаки, известковые и щелочные осадки, которые при соответствующей подготовке могут выполнять функции грунтовых слоев).

Выбор материала для верхнего изоляционного покрытия определяется его способностью выполнять основные функции конструкции: предотвращать инфильтрацию атмосферных осадков в тело полигона, снижать миграцию загрязняющих веществ в грунтовые воды, защищать поверхность от ветровой и водной эрозии, обеспечивать устойчивость массива, создавать условия для укоренения растительности на этапе биологической рекультивации. Эти требования закреплены в ИТС 17–2024 «Размещение

отходов производства и потребления» и санитарных нормативах [1]. В них также указано, что толщина изолирующего слоя должна составлять не менее 2 м, включая защитный слой толщиной около 0,5 м.

Наряду с использованием природных грунтов в последние годы все чаще применяется альтернативный подход: использование промышленных отходов в качестве компонентов техногрунтов. Такой метод позволяет существенно снизить расходы на природные ресурсы и одновременно утилизировать накопленные отходы, что делает его экономически и экологически целесообразным [13, 15].

Для практической реализации данного подхода необходимо учитывать физические свойства используемых материалов. Назовем основные требования к техногрунтам:

- гранулометрический состав: 70 % частиц  $\leq 10$  мм и 30 %  $> 10$  мм [2];
- коэффициент фильтрации (Кф): 0,005–5 м/сут [3];
- насыпная плотность: 1,25–1,6 г/см<sup>3</sup> [4];
- влажность: 12–22 % [5].



Эти параметры обеспечивают стабильность покрытия и достаточную водоудерживающую способность.

Отходы ЦБК являются перспективными материалами для формирования техногрунта из-за содержания в них минеральных и органических компонентов. Минеральная часть представлена золой древесного топлива, осадками гашения извести, песчаными фракциями и химически осажденным мелом, которые обеспечивают плотность, структурную устойчивость и низкую фильтрацию. Органическая часть формируется преимущественно осадками водоподготовки (речным илом) и частично отходами каустизации зеленого щелока.

При работе ЦБК образуется широкий спектр побочных продуктов — минеральных, органических и смешанных. Наиболее распространенные отходы, рассматриваемые в качестве потенциальных компонентов при рекультивации полигонов [1, 6, 7]:

- зола от сжигания древесных отходов. В состав может входить: зола, несгоревшие частицы древесины, минеральные примеси. Как правило, твердое (порошкообразное, мелкодисперсное) вещество, темно-серого цвета;
- осадок гашения извести. Может содержать воду, кальций (в соединениях), а также соединения кремния, натрия, железа, марганца магния;
- мел химически осажденный. В основном содержит карбонаты кальция и магния;
- песок от процесса сжигания в многотопливном котле древесного биотоплива. В состав, как правило, входят: соединения алюминия, железа, кальция, калия, диоксид кремния;
- отходы водоподготовки (речной ил). В состав могут входить: соединения кремния, алюминия, органические вещества природного происхождения, вода;
- отходы каустизации зеленого щелока. В состав могут входить: гидроксид кальция, карбонат кальция, сульфат кальция, сульфид кальция, хлорид кальция, оксиды металлов, органические соединения (остатки лигнина, гемицеллюлозы, смолы), вода.

Перед использованием отходов рекомендуется провести анализ их состава на соответствие экологическим нормам.

В научной литературе также рассматриваются возможности применения растительных и древесных отходов в качестве экологичных строительных и изоляционных материалов, что подтверждает перспективность использования побочных продуктов лесной отрасли [14, 17].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки пригодности отходов в качестве компонентов техногрунта были проведены лабораторные исследования гранулометрического состава, коэффициента фильтрации, влажности и насыпной плотности.

Гранулометрический состав определяли методом сухого просеивания по ГОСТ 12536 [8], с применением сит размерами 10; 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,4; 0,2; 0,14 мм. Согласно ГОСТ 12536–2014, стандартный набор сит включает фракции 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,1 мм. Фракции были условно разделены на 3 группы:

- частицы > 0,2 мм — песчаная фракция;
- частицы 0,14–0,2 мм — пылеватая фракция;
- частицы < 0,14 мм — глинистая фракция.

Также в разделе результатов приведен наиболее характерный размер частиц по каждому отходу, а в таблице 2 — доля частиц < 10 мм, указанная в процентах.

Коэффициент фильтрации (Kf) определяли по методике [20] из-за отсутствия специализированного фильтрационного прибора, предусмотренного ГОСТ 25584–2016 [9]. Поэтому полученные значения коэффициентов фильтрации носят ориентировочный характер. Измерения проводили троекратно, при расхождении данных выполняли повторные исследования. Влажность определяли с использованием автоматизированного прибора «галоге́нный влагомер». Насыпную плотность измеряли по ГОСТ 5180–2015 [9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения гранулометрического состава представлены в таблице 1.

Мел химически осажденный и зола характеризуются заметной долей частиц до 0,14 мм, что повышает их водоудерживающую способность и способствует уплотнению смеси при формировании массива. В то же время мел химически осажденный имеет смешанный дисперсный состав, т. к. содержит в относительно равных пропорциях все определенные фракции.

Песок от процесса сжигания в многотопливном котле практически полностью состоит из частиц крупного размера (> 0,2 мм), что соответствует крупнозернистому составу и обуславливает высокую фильтрационную способность материала. По этой причине он не может использоваться как самостоятельный изоляционный компонент, но может выполнять функцию дренирующей добавки.



**Таблица 1.** Результаты определения гранулометрического состава отходов

**Table 1.** Grain-size distribution analysis results of waste

| № | Название отхода                                                         | Доля < 0,14 мм, % | 0,14–0,2 мм, % | > 0,2 мм, % |
|---|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|-------------|
| 1 | Зола от сжигания древесного топлива                                     | 80–90             | 10–20          | 0           |
| 2 | Осадок гашения извести                                                  | 4                 | 3,5            | 92,5        |
| 3 | Песок от процесса сжигания в многотопливном котле древесного биотоплива | 0,05              | 0,06           | 99,89       |
| 4 | Отходы водоподготовки (речной ил)                                       | 1,65              | 3,85           | 94,5        |
| 5 | Отходы каустизации зеленого щелока                                      | 9                 | 6              | 85          |
| 6 | Мел химически осажденный                                                | 33                | 22             | 45          |

**Таблица 2.** Результаты лабораторных исследований отходов

**Table 2.** Laboratory analysis results of waste

| Показатель                                                              | Kf, м/сут  | Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup> | Влажность, % | Доля частиц < 10 мм, % |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------|--------------|------------------------|
| Зола от сжигания древесины                                              | 0,59       | 0,215                                 | 1            | 0                      |
| Осадок гашения извести                                                  | 6,71       | 1,476                                 | 7,8          | 40,85                  |
| Мел химически осажденный                                                | 2,16       | 1,021                                 | 32,6         | 0                      |
| Песок от процесса сжигания в многотопливном котле древесного биотоплива | 18,21      | 1,32                                  | 0,23         | 0                      |
| Отходы водоподготовки (речной ил)                                       | 3,74       | 0,771                                 | 86,7         | 0                      |
| Отходы каустизации зеленого щелока                                      | 14,52      | 0,214                                 | 70           | 0                      |
| Требования [2]–[5]:                                                     | 0,005–0,05 | 1,25–1,6                              | 12–22        | 70                     |

Анализ коэффициентов фильтрации показывает, что материалы с преобладанием более крупных частиц (песок от процесса сжигания биотоплива, отходы каустизации зеленого щелока) характеризуются высоким коэффициентом фильтрации, тогда как более мелкодисперсные материалы (зола от сжигания древесного топлива, мел химически осажденный) имеют более низкие значения коэффициента фильтрации.

Влажность исследованных отходов принимает максимальные значения для отходов водоподготовки и отходов каустизации зеленого щелока. Мел химически осажденный и осадок гашения извести обладают умеренной влажностью, зола и песок характеризуются минимальными значениями данного показателя. Указанные различия необходимо учитывать при подборе состава техногрунта, чтобы обеспечить требуемый баланс между водоудерживающими и структурными компонентами.

Насыпная плотность исследованных отходов существенно различается и варьирует от 0,215 до 1,476 г/см<sup>3</sup>. Согласно инженерно-геологическим требованиям к материалам, используемым для формирования изоляционных слоев техногрунта (ориентировочные значения 1,25–1,6 г/см<sup>3</sup> для уплотняемых минеральных грунтов), только осадок гашения извести и мел химически осажденный (после уплотнения) приближаются к необходимым значениям [4].

Зола и иловые осадки вследствие низкой насыпной плотности относятся к рыхлым материалам, что ограничивает возможность их самостоятельного использования в минеральных изоляционных слоях, однако допускает применение в качестве корректирующих или водоудерживающих добавок. Песок обладает удовлетворительной насыпной плотностью, но его гранулометрический состав существенно ограничивает использование: более 99 % частиц имеют размер свыше 0,2 мм. Такой крупноразмерный материал характеризуется высокой водопроницаемостью, что подтверждается максимальным значением среди исследованных коэффициентов фильтрации. В связи с этим песок не может применяться в качестве самостоятельного компонента изоляционного техногрунта, но допускается его дозированное введение в малых количествах для корректировки структуры техногрунта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление полученных лабораторных данных с инженерными требованиями к материалам изоляционного слоя — Kf=0,005–0,5 м/сут, насыпная плотность 1,25–1,6 г/см<sup>3</sup>, влажность 12–22 %, доля частиц < 10 мм около 70 % — позволило выделить специфику каждого исследованного отхода [2]–[5].

Зола от сжигания древесного топлива характеризуется низкой насыпной плотностью 0,215 г/см<sup>3</sup>, минимальной



влажностью 1% и отсутствием мелких частиц. Коэффициент фильтрации 0,59 м/сут превышает верхнюю границу требуемых значений. Материал является слишком рыхлым и обладает повышенной водопроницаемостью, что исключает его применение как основного компонента изоляционного слоя, но допускает использование в малых дозах в качестве корректирующей минеральной добавки.

Осадок гашения извести имеет плотность 1,476 г/см<sup>3</sup>, что соответствует нормативам для техногрунтов. Коэффициент фильтрации 6,71 м/сут превышает норматив, однако высокая плотность и значительная доля частиц < 10 мм делают этот материал наиболее стабильным минеральным компонентом. Может рассматриваться как структурная основа смеси при условии снижения водопроницаемости.

Мел химически осажденный обладает умеренной влажностью 32,6% и удовлетворительной плотностью 1,021 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации 2,16 м/сут выше требуемых значений, однако мелкодисперсная фракция способствует уплотнению смеси. Может применяться как водоудерживающий и структурирующий компонент.

Песок от процесса сжигания древесного биотоплива имеет плотность 1,32 г/см<sup>3</sup>, соответствующую нормативам, однако коэффициент фильтрации 18,21 м/сут и крупный гранулометрический состав (частицы 0,63–2,5 мм) указывают на крайне высокую водопроницаемость. Материал может быть использован только дозированно как дренирующая добавка, поскольку не способен обеспечить барьерные свойства.

Осадки водоподготовки (речной ил) обладают экстремально высокой влажностью 86,7% и низкой плотностью 0,771 г/см<sup>3</sup>. Коэффициент фильтрации 3,74 м/сут превышает норматив. Материал не подходит для применения в качестве самостоятельного компонента изоляционных слоев, но может использоваться в очень ограниченных количествах в качестве органоминеральной добавки.

Отходы каустизации зеленого щелока имеют очень высокую фильтрацию 14,52 м/сут, низкую плотность 0,214 г/см<sup>3</sup> и щелочную реакцию, что требует предварительной химической нейтрализации. Материал не соответствует требованиям техногрунтов ни по одному из показателей.

В целом ни один из исследованных отходов не удовлетворяет всем требованиям к изоляционному слою. Однако несколько материалов — осадок гашения извести, мел химически осажденный и зола — обладают

характеристиками, которые при совместном использовании могут обеспечить нужную плотность и дисперсность смеси. Песок, иловые осадки и продукты каустизации допустимо применять только дозированно и исключительно как вспомогательные компоненты.

Перспективность использования отходов ЦБК и лесной промышленности для формирования инженерных слоев подтверждается современными исследованиями, свидетельствующими об их удовлетворительных физико-механических характеристиках, экологичности и технологической доступности [10]–[19].

## Список литературы

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 17–2024. Размещение отходов производства и потребления. М.: Бюро НДТ, 2024. 198 с.
2. ТУ 39.00.11-007-53898886-2023. Грунт техногенный строительный «ГТС». М., 2023. 15 с.
3. Коэффициент фильтрации грунтов: таблицы и методика расчета: [сайт]. URL: <https://xn--e1aaitdso4b.xn--p1ai/articles/koeffitsient-filtratsii-gruntov-tablitsy> (дата обращения: 28.10.2025).
4. Инженерный справочник: [сайт]. Москва, 2006. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityTable/?ysclid=mcvobifvk1714484401> (дата обращения: 05.10.2025).
5. GeologyLab: [сайт]. Москва, 2013. URL: <https://geologylab.ru/stati/vlazhnost-grunta> (дата обращения: 05.10.2025).
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 29 мая 2025 г. № 781 «О внесении изменений в Правила обращения с отходами производства и потребления». М., 2025.
7. ГОСТ Р 56847–2015. Процессы производства целлюлозы. Нормативы образования отходов: национальный стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2015 г. № 2235-ст: введен впервые 2016 07–01; ОАО «Группа Илим». Москва: Стандартинформ, 2016. 16 с.
8. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2014 г. № 2022-ст: дата введения 2015 07–01 ОАО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве». Москва: Стандартинформ, 2015. 23 с.
9. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому



- регулированию и метрологии от 3 ноября 2015 г. № 1694-ст: введен в действие: дата введения 22.07.2015 ОАО «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве». Москва: Стандартинформ, 2019. 23 с.
10. Бердиева М. Т., Абдагалиев Ш. Ж., Оросакхунуова С. К. Рациональное использование отходов лесной промышленности // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2021. № 4. С. 161–163.
  11. Суворова Ю. А., Галаюра В. С. Перспективные технологии утилизации древесных отходов / Тамбовский государственный технический университет. 2022. С. 203–205.
  12. Самбетбаева А. К., Курманбекова Э. Б., Шалтабаева С. Т. Перспективные направления утилизации отходов сельского хозяйства и лесозаготовок // Разработка энергоресурсосберегающих и экологически безопасных технологий лесопромышленного комплекса: материалы Международной научной конференции ученых и студентов. Воронеж, 28 сентября 2022 г. С. 93–98. DOI: 10.58168.DESEFTTI2022\_93–98.
  13. Попик В. А. Утилизация отходов деревоперерабатывающих производств / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова. 2023. С. 33–36.
  14. Золотарев А. С. Разработка современных экологичных теплоизоляционных материалов на основе переработки отходов растениеводства // Научный журнал молодых ученых ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. 2022. № 5. / С. 45–50.
  15. Плотников Н. П., Челышев И. Н. Пути утилизации отходов деревообрабатывающих производств // Труды Братского гос. ун-та. Сер. Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 97–99.
  16. Николаева А. Г., Смородин С. Н. Исследование теплотехнических характеристик отходов целлюлозно-бумажных предприятий. СПб.: Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2020. С. 58–63.
  17. Питель Т. С., Золотарев А. С. Разработка современных экологичных строительных материалов на основе рециклинга растительных отходов. 2022. С. 215–222.
  18. Барнаханова К. Т., Усупов М. М. Использование отходов кожевенного производства и древесины / Таразский региональный университет им. М. Х. Дулати. 2023. С. 144–148.
  19. Хабибова А. К., Мамедова А. М. Получение цементопилочных плит на основе отходов переработки древесины / Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности. 2021. С. 359–364.
  20. Гилев В. Ю., Горохова С. М. Физические и водно-физические свойства почв: уч.-мет. пособие. Пермь: Прокрость, 2024. 75 с. ISBN 978-5-94279-635-8.
  21. TU 39.00.11-007-53898886-2023. Man-made construction soil “GTS”. Moscow, 2023. 15 p.
  22. Soil filtration coefficient: tables and calculation methods [website]. URL: <https://xn--e1aaitdso4b.xn--p1ai/articles/koeffitsient-filtratsii-gruntov-tablitsy> (accessed: 28.10.2025).
  23. Engineering reference book: [website]. Moscow, 2006. URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsDensity/DensityTable/?ysclid=mcvobifvk1714484401> (accessed October 5, 2025).
  24. GeologyLab: [website]. Moscow, 2013. URL: <https://geologylab.ru/stati/vlazhnost-grunta> (accessed on October 5, 2025).
  25. Resolution of the Government of the Russian Federation of May 29, 2025 No. 781 “On Amendments to the Rules for Handling Production and Consumption Waste.” Moscow, 2025.
  26. GOST R 56847–2015. Cellulose Production Processes. Waste generation standards: national standard of the Russian Federation: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 29, 2015. No. 2235-st: introduced for the first time on 2016 07–01; OJSC Ilim Group. Moscow: Standartinform, 2016. 16 p.
  27. GOST 12536–2014. Soils. Methods for laboratory determination of particle size (grain) and microaggregate composition: interstate standard: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 12, 2014 No. 2022-st: introduction date 2015 07–01 OJSC Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction. Moscow: Standartinform, 2015. 23 p.
  28. GOST 5180–2015. Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics: interstate standard: official publication: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 3, 2015 No. 1694-st: put into effect: date of introduction 07/22/2015 JSC “Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction”. Moscow: Standartinform, 2019. 23 p.
  29. Berdieva M. T., Abdagaliyev Sh. Zh., Orosakhunova S. K. Rational use of forest industry waste // Science, New Technologies and Innovations of Kyrgyzstan. 2021. No. 4. pp. 161–163.
  30. Suvorova Yu. A., Galayura V. S. Promising Technologies for Wood Waste Utilization / Tambov State Technical University. 2022. Pp. 203–205.
  31. Sambetbaeva A. K., Kurmanbekova E. B., Shaltabaeva S. T. Promising Directions for Agricultural and Logging Waste Utilization. *Development of Energy-Saving and Environmentally Safe Technologies for the Forestry Complex*: Proceedings of the International Scientific Conference of Scientists and Students. Voronezh, September 28, 2022. pp. 93–98. DOI: 10.58168.DESEFTTI2022\_93–98.
  32. Popik V. A. Waste Utilization from Wood Processing Industries / St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov. 2023. Pp. 33–36.

## References

1. Information and technical reference book on the best available technologies ITS 17–2024. Production and consumption waste disposal. Moscow: NDT Bureau, 2024. 198 p.



14. Zolotarev A. S. Development of modern environmentally friendly thermal insulation materials based on the processing of plant waste // Scientific journal of young scientists of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Oryol State Agrarian University. 2022. No. 5. Pp. 45–50.
15. Plotnikov N. P., Chelyshev I. N. Ways of recycling wood-working waste // Transactions of Bratsk State University. Series: Natural and engineering sciences. 2021. Vol. 1. Pp. 97–99.
16. Nikolaeva A. G., Smorodin S. N. Study of thermal characteristics of pulp and paper mill waste. St. Petersburg: Higher School of Technology and Energy SPBUGPTD, 2020. Pp. 58–63.
17. Pitel T. S., Zolotarev A. S. Development of modern environmentally friendly building materials based on the recycling of plant waste. 2022. Pp. 215–222.
18. Barnakhanova K. T., Usupov M. M. Use of tannery and wood waste / Taraz Regional University named after M. H. Dulati. 2023. Pp. 144–148.
19. Khabibova A. K., Mamedova A. M. Production of cement-sawdust boards based on wood processing waste / Azerbaijan State University of Oil and Industry. 2021. Pp. 359–364.
20. Gilev V. Yu., Gorokhova S. M. Physical and water-physical properties of soils: teaching aid. Perm: Prokrost, 2024. 75 p. ISBN 978-5-94279-635-8.

### ■ Информация об авторах

**Лысак Оксана Павловна**, студентка Института технологии Высшей школы технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: 0009-0001-5676-112X, e-mail: [olysak@bk.ru](mailto:olysak@bk.ru).

**Епифанов Андрей Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет технологий и дизайна; ORCID: 0000-0002-3429-9835; SPIN-код: 713846; AuthorID: 57197813774; e-mail: [epifandr@yandex.ru](mailto:epifandr@yandex.ru).

### ■ Information about the authors

**Lysak Oksana Pavlovna**, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: 0009-0001-5676-112X, e-mail: [olysak@bk.ru](mailto:olysak@bk.ru).

**Epifanov Andrey Valeryevich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Environmental Protection and Sustainable Natural Resource Management of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: 0000-0002-3429-9835; SPIN-code: 713846; AuthorID: 57197813774; e-mail: [epifandr@yandex.ru](mailto:epifandr@yandex.ru).



Обзорная статья

УДК 66.096:004.04

DOI 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_73-80

# ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Амаду Диалло<sup>1</sup>, Дмитрий Александрович Ковалёв<sup>2</sup>, Леон Абрамович Русинов<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна

© Диалло А., Ковалёв Д. А., Русинов Л. А., 2026

Автор-корреспондент: Д. А. Ковалёв, e-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru

## АННОТАЦИЯ

Надежность и безопасность сложных технологических процессов (химических, целлюлозно-бумажных, нефтехимических и т. п.) в значительной степени зависят от возможности быстрого обнаружения, локализации и идентификации нарушений. Эффективность стратегий диагностики, будь то основанных на моделях или непосредственно на данных, неразрывно связана с конфигурацией сети датчиков. Задача заключается в определении оптимального количества и мест размещения датчиков, позволяющих гарантировать наблюдаемость, диагностируемость и информативность системы при минимизации инвестиционных и эксплуатационных затрат. В данной статье приведен сравнительный анализ основных методологий, используемых для определения оптимального состава и расположения датчиков на контролируемом технологическом процессе. Разнообразие методов отражает сложность и многомерность рассматриваемой проблемы, решение которой должно обеспечить высокую эффективность и надежные результаты диагностики, наблюдаемость, отказоустойчивость и минимизацию затрат. Анализ вывел фундаментальную разницу между методами, основанными на моделях, и методами, основанными на данных. Из анализа следует, что ни один метод не превосходит другие по всем характеристикам. Выбор зависит от контекста применения: наличия и качества доступной модели, размера и сложности системы, вычислительных ресурсов и времени, выделенного на оптимизацию, от природы диагностируемых нарушений и критичности требуемой эффективности и точности диагностики. Перспективным направлением представляется комбинирование этих методов для объединения их преимуществ. Например, простая модель может быть использована для предварительного отбора подмножества кандидатных датчиков, на котором будет применен более требовательный к вычислениям метод машинного обучения. Количественный анализ диагностируемости, который уже интегрирует стохастические аспекты, выиграл бы от совмещения с техниками кластеризации для сокращения пространства поиска конфигураций.

**Ключевые слова:** оптимальное размещение датчиков, диагностика нарушений, методы основанные на моделях, методы основанные на данных, генетические алгоритмы

**Для цитирования:** Диалло А., Ковалёв Д. А., Русинов Л. А. Оптимизация состава и расположения датчиков для диагностики нарушений состояния технологических процессов // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 73–80. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_73-80



# OPTIMIZATION OF THE SENSOR SELECTION AND PLACEMENT FOR PROCESS FAULT DIAGNOSIS

Diallo Amadu<sup>1</sup>, Kovalev Dmitriy Alexandrovich<sup>2</sup>, Rusinov Leon Abramovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University),

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University of Industrial Technology and Design, St. Petersburg, Russia

**Corresponding author:** D. A. Kovalev, e-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru

## ABSTRACT

The reliability and safety of complex technological processes (chemical, pulp-and-paper, petrochemical, etc.) largely depend on the ability to quickly detect, localize, and identify faults. The effectiveness of diagnosis strategies, whether model-based or directly data-driven, is inextricably linked to the configuration of the sensor network. The task involves defining the optimal quantity and locations of sensors to guarantee system observability, fault detectability, and measurement informativeness, with simultaneous minimization of capital and operating expenses. This paper presents a comparative review of principal methodologies for optimal sensor selection and placement in process monitoring systems. The variety of methods reflects the complexity and multidimensionality of the problem being solved, the solution of which must ensure high diagnostic effectiveness, reliable results, observability, fault tolerance, and cost minimization. The analysis highlighted a fundamental difference between model-based methods and data-driven ones. The analysis shows that no single method outperforms the others in all characteristics. The choice depends on the application context: the availability and quality of an accessible model, the size and complexity of the system, the computational resources and time allocated for optimization, the nature of the faults being diagnosed, and the criticality of the required diagnostic efficacy and precision. A promising direction seems to be the combination of these methods to synergize their advantages. For example, a simple model can be used for the preliminary selection of a candidate sensor subset, on which a more computationally demanding machine learning method will then be applied. Quantitative fault diagnosability assessment that already accounts for stochastic elements could be enhanced by integration with clustering methods to prune the search space of possible configurations.

**Keywords:** optimal sensor placement, fault diagnosis, model-based methods, data-driven methods, genetic algorithms

**For citation:** Diallo A., Kovalev D. A., Rusinov L. A. Optimization of the sensor selection And placement for process fault diagnosis, Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 73–80. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_73-80

## ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность характеризуется растущей степенью автоматизации и повышенной сложностью технологических процессов [1]. К этим системам, будь то химические, целлюлозно-бумажные, нефтехимические или энергетические, предъявляются строгие требования к эффективности, качеству, безопасности и соблюдению экологических норм. В этом контексте любой отказ, вызванный деградацией компонента, неисправностью исполнительного механизма или аномальным отклонением переменной состояния (давление, температура, расход и т. д.), может иметь серьезные экономические и экологические последствия [2].

Для предотвращения этих рисков диагностика нарушений (Fault Diagnosis) стала важным элементом в системах управления технологическими процессами [3]. Ее цель тройственна: обнаружить возникновение нарушения, локализовать его и идентифицировать вышедший из строя компонент. Эффективность любой стратегии диагностики, будь то основанной на модели (model-based) или на данных (data-driven),

обусловлена доступной информацией. Эта информация предоставляется сетью датчиков, развернутой на процессе. Неисправный, неправильно размещенный или отсутствующий датчик может сделать нарушение необнаруживаемым или неидентифицируемым, сводя на нет эффективность алгоритмов диагностики.

Однако установка большого количества датчиков связана со значительными затратами на приобретение, установку и техническое обслуживание. И наоборот, недостаточное количество датчиков ставит под угрозу способность системы правильно обнаруживать, локализовать и идентифицировать нарушения. Проблема оптимальной установки датчиков как раз и направлена на нахождение компромисса между этими ограничениями путем определения минимального количества датчиков и их эффективного местоположения для обеспечения диагностируемости и надежности системы [4],[5] (1993, 1995). Таким образом, оптимальное количество датчиков — это наименьшее их число, которое одновременно удовлетворяет ограничениям наблюдаемости, диагностируемости



и требуемой точности, соблюдая при этом предопределенный бюджет.

В связи со сложностью этой проблемы было разработано множество методов. Их можно классифицировать на две основные группы. Первая объединяет методы, основанные на моделях, которые используют априорное знание о процессе в виде математических моделей (линейных или нелинейных, статических или динамических). В эту категорию входят классические подходы оптимизации, такие как алгоритм «ветвей и границ» (Branch and Bound), которые гарантируют оптимальное решение, но быстро становятся неприменимыми для больших систем. Метаэвристические методы, такие как генетические алгоритмы, позволяют решать задачи большей размерности, принимая субоптимальные решения. Наконец, более новые подходы, например, количественный анализ диагностируемости, вводят реалистичную меру достоверности, учитывая шум и неопределенности, что позволяет достичь компромисса между стоимостью и робастностью диагностики.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Методы оптимального размещения датчиков варьируются в зависимости от конкретных целей, но их также можно объединить в две группы: методы, основанные на моделях, и безмодельные методы [6, 7]. В первом случае используется аналитическая модель (статическая или динамическая), а во втором — используются априорные знания. Некоторые методы размещения датчиков могут быть отнесены к обоим вышеупомянутым категориям, как, например, использование генетического алгоритма (ГА), т. е. фактически речь идет о комбинированных или гибридных методах.

Обнаружение и диагностика нарушений в значительной степени базируются на подходах, основанных на моделях, эффективность которых заключается в использовании предварительных знаний об исследуемой системе. Классическая методология обычно следует трем этапам:

- (i) сравнение реальных измерений и прогнозов, полученных по модели, вычисление на этой основе их разностей (остатков), которые и являются потенциальными индикаторами наличия нарушений в ходе процесса;
- (ii) анализ ненулевого значения этих остатков, чтобы различить отклонения, связанные с возмущениями, шумами или неточностями, от тех, которые вызваны реальными нарушениями;
- (iii) локализация и идентификация предполагаемых нарушений.

Этот подход, хотя и эффективный, основан на предположении о наличии моделей рассматриваемой системы, что на практике наблюдается не часто [6].

Вторая группа — это методы, основанные на данных (data-driven). Они становятся незаменимыми, когда аналитическое моделирование процесса слишком сложно, слишком дорого или просто невозможно. Они опираются на прямое использование операционных данных и алгоритмы машинного обучения (Machine Learning). Обучение с учителем может использоваться для оценки важности каждой переменной и каждого потенциального места установки датчика. Обучение без учителя с помощью техник кластеризации позволяет группировать датчики со схожими сигнатурами, что кардинально сокращает пространство поиска. Наконец, обучение с подкреплением предполагает автономное обучение оптимальной политике размещения путем взаимодействия с симулятором или реальной средой.

В данной статье приведен сравнительный обзор этих методов для проектирования эффективных систем диагностики.

Из безмодельных методов следует отметить, основанные на статистических подходах. Эти методы позволяют оценить согласованность данных и обнаружить аномальное поведение без требования исчерпывающих знаний о системе. Однако даже в этом случае большинство методов остаются зависимыми от некоторого моделирования или априорной информации об изучаемом процессе, что дополнительно подчеркивает важность подходов, основанных на моделях [7].

Генетический алгоритм (ГА) относится к метаэвристическим алгоритмам, которые основаны на имитации процессов биологической эволюции; он имитирует дарвиновскую теорию выживания в природе наиболее приспособленных [8]. Однако в большинстве применений использование ГА происходит при предварительном снижении размерности решаемой проблемы, что позволяет существенно увеличить скорость и надежность получения решения. Наиболее широко используемым для этого методом является метод главных компонент (МПК, PCA).

Такое сочетание ГА с МПК использовано, например, в работе [9], где рассмотрена установка, состоящая из реактора и стриппера, на которой было размещено 13 датчиков в местах, признанных важными, а затем измерялись 13 переменных при некоторых условиях проявления нарушений хода технологического процесса. Из 13 измеряемых переменных были выбраны 8, затронутые нарушениями. Затем пространство поиска было сокращено благодаря уникальному отбору возмущенных переменных процесса. Этот выбор был сделан, когда



было обнаружено, что датчики, размещенные в других точках, добавляли шум вместо информации. Алгоритм был применен с начальной популяцией из 130 особей. Лучшая особь последнего поколения была выбрана как решение.

Другой случай был решен в предположении, что стоимость датчиков близка к максимальной стоимости отказов. Решение заключается в размещении 4 датчиков, признанных достаточными для эффективного функционирования процесса. После завершения каждого варианта оптимизации результаты тестировались с помощью моделирования.

Разработанный метод для проектирования оптимальных сетей датчиков на основе МГК анализа и использования генетических алгоритмов имеет несколько значительных преимуществ, но также и некоторые ограничения.

Среди преимуществ отметим тот факт, что стратегия применения МГК нацелена не только на уменьшение затрат за счет минимизации числа используемых датчиков, но и на уменьшение потенциальных потерь, связанных с пропуском критических нарушений [9]. Такой целостный подход позволяет обеспечить лучшую окупаемость системы мониторинга. Кроме того, использование генетических алгоритмов предлагает эффективное решение при больших пространствах поиска. Это делает метод применимым к сложным системам со многими переменными [10].

Рассмотренный вариант опирается на статическую версию МГК, что ограничивает способность обнаруживать определенные типы развивающихся или переходных нарушений. Кроме того, определение порогов обнаружения основано на произвольной или внешней оценке (например, безопасности), что может сильно влиять на результаты. К этому добавляется отсутствие критериев для измерения степени возможной избыточности датчиков, что может привести к потере эффективности или ненужному дублированию [11]. Наконец, хотя генетические алгоритмы эффективны, их реализация может быть очень затратной по времени вычислений, особенно для очень больших систем с многочисленными комбинациями датчиков [12].

Расширение статической версии МГК до динамической позволило бы лучше улавливать переходные и развивающиеся нарушения. Также было бы целесообразно разработать явные метрики для количественной оценки избыточности датчиков, что позволило бы не допускать этого, гарантируя оптимальное покрытие.

Количественный анализ диагностируемости — это методология, которая позволяет присваивать численные

значения показателям диагностики нарушений протекания технологического процесса, предоставляя таким образом меру ее способности обнаруживать и изолировать нарушения сверх простой качественной оценки типа «да/нет». Она использует математические модели и методы, основанные на данных, для оценки сложности диагностики отказов в различных условиях, учитывая такие факторы, как шум и неопределенности модели. Это позволяет разработчикам принимать обоснованные решения относительно конфигурации системы управления и схемы размещения датчиков для достижения требуемого уровня диагностируемости, гарантируя таким образом надежность и эффективность [13, 14].

Рассмотрим некоторые варианты использования количественного анализа диагностируемости. В работе [13] этот анализ прямо использовался для определения оптимального размещения датчиков. Основная цель состояла в том, чтобы для заданной модели и доступного набора датчиков найти набор с минимальной стоимостью, который соблюдает требуемые показатели диагностируемости, определенные этой моделью. Для этого нужно было оценить, в какой степени нарушения являются «различимыми» и между собой, и с номинальным состоянием в зависимости от доступных измерений. Эта мера различимости опирается на статистическую разницу между распределениями сигналов остатков в каждом сценарии нарушения.

Конкретно, метод придает каждой конфигурации датчиков численное значение, которое отражает способность к дискриминации. Чем выше это значение, тем более способна система правильно идентифицировать нарушения даже при наличии шума. Оптимизация размещения становится таким образом проблемой поиска набора датчиков, который минимизирует стоимость, гарантируя при этом, что способность к идентификации превышает predetermined порог.

Для решения этой проблемы были предложены две стратегии. Первая — это полный перебор, который гарантирует оптимальность, но быстро становится неприемлемым, когда количество потенциальных датчиков велико. Вторая — это «жадный» (greedy) алгоритм, намного более эффективный с точки зрения вычислений: он выбирает датчики инкрементально, добавляя на каждом шаге тот, который приносит наибольший прирост диагностируемости, до достижения требуемого порога.

Эта методология, таким образом, вводит более реалистичные операционные рамки для оценки диагностируемости систем, поскольку она учитывает как качество датчиков, так и качество модели. Предложенный «жадный» алгоритм быстр и эффективен, что делает метод применимым к системам среднего размера [15]. Тем



не менее, несколько ограничений остаются: предположения о линейности и гауссовском шуме ограничивают применимость к определенным промышленным системам, зависимость от параметров (длина временного окна, профили нарушений) может влиять на результаты, т. е. «жадный» алгоритм, хотя и эффективный, не предоставляет гарантии оптимальности [16].

Наконец, намечаются перспективы расширения исследований, направленных на нелинейные системы [17] и негауссовский шум [18], на разработку робастной оптимизации при наличии неопределенностей различного рода, а также на интеграцию множественных целей (стоимость, надежность, энергопотребление и т. п.).

Алгоритмы branch-and-bound (B&B, «ветвей и границ») — это фундаментальная и широко используемая методология для получения точных решений NP-трудных (Non-deterministic Polynomial time) проблем оптимизации. Эта техника часто квалифицируется как алгоритм; однако, возможно, более уместно сказать, что B&B инкапсулирует семейство алгоритмов, которые все разделяют общую базовую процедуру решения. Эта процедура неявно перечисляет все возможные решения рассматриваемой проблемы, сохраняя частичные решения, называемые подзадачами, в древовидной структуре [19].

В работе [20] предложен метод оптимального размещения датчиков, основанный на алгоритме «ветвей и границ». Для реализации метода сначала было разработано математическое описание, которое характеризует номинальное поведение каждого компонента и определяет структуру и взаимосвязи. Затем было проведено построение Матрицы Сигнатур Нарушений (Fault Signature Matrix, FSM) и далее Гипотетической Матрицы Сигнатур (Hypothetical Signature Matrix, HSM) в предположении, что каждая не измеряемая переменная имеет гипотетический датчик. Затем были определены степени покрытия и дискриминативности датчиков и, наконец, было осуществлено проектирование алгоритма «ветвей и границ». Авторы [20] проверили алгоритм с помощью иллюстративного примера с простой системой (схема умножителя-сумматора).

Метод в первую очередь нацелен на базовый случай поиска минимального набора датчиков среди всех возможных (гипотетических) датчиков. Тем не менее, метод также способен учитывать другие критерии оптимальности размещения датчиков, такие как минимизация стоимости, а также предусмотрена возможность дополнительного добавления датчиков к уже функционирующей системе для улучшения диагностируемости.

Однако эти случаи требуют модификации предложенного метода, которая объяснена в статье неявно. Кроме того, валидация метода выполнена на простом примере;

эффективность работы системы на сложных промышленных системах не продемонстрирована. Метод имеет потенциально высокую сложность, если матрица HSM очень велика, и неявно обрабатывает случаи зашумленных или неопределенных измерений.

Таким образом, для улучшения метода представляется целесообразным провести интеграцию критериев многоцелевой оптимизации (стоимость, надежность, техническое обслуживание), а также расширить область применения на крупномасштабные системы (химические процессы и т. д.), адаптировать к случаям с неидеальными датчиками.

Как указывалось выше, подходы, основанные на моделях, страдают от ограничений, связанных с доступностью и точностью априорных знаний о системе. Чтобы преодолеть эти ограничения, были разработаны так называемые безмодельные методы, или методы, управляемые данными. Они опираются исключительно на измерения параметров системы и позволяют, таким образом, диагностировать ее состояние путем прямого анализа собранных данных [6, 7].

Эти подходы в первую очередь задействуют техники машинного обучения, распознавания образов и, в более широком смысле, методы искусственного интеллекта (ИИ). В отличие от методов, исходящих из классической автоматки, которые основываются на численной обработке и использовании дифференциальных уравнений, подходы, основанные на ИИ, принимают символическую логику. Они, в частности, заключаются в решении комбинаторных проблем, представлении знаний здравого смысла и моделировании человеческих рассуждений для обработки неопределенностей и сложности систем [6]. В этом контексте ИИ появляется как дополнительный инструмент, особенно уместный для управления и диагностики, обогащающий спектр доступных техник.

В контексте определения оптимального размещения датчиков интересно использование метода машинного обучения (МО) с учителем [21]. В работе [22] этот подход использован для определения оптимального размещения датчиков в жидкостных потоках. Идея состоит в использовании способности алгоритмов МО измерять важность входов для выбора наиболее влиятельных датчиков. Метод использовался для определения положения датчиков на крыле летательного аппарата при моделировании профиля крыла и показал хорошие результаты, например, сократив время вычислений более чем в 10 раз. Несмотря на ряд преимуществ, у метода есть ограничения: зависимость от данных обучения, отсутствие физической интерпретируемости. Кроме того, валидация остается, по существу, численной, требующей экспериментов в аэродинамической трубе или в реальных промышленных условиях.



Обучение без учителя (кластеризация) совместно с другими методами использовалось для проблемы оптимального размещения датчиков в области мониторинга экологичности рабочей среды в офисном здании [23], а в работе [19] рассмотрен гибридный метод, интегрирующий кластеризацию и используемый для оптимального размещения датчиков, предназначенных для обнаружения и локализации утечек в сетях распределения воды. Их подход опирается на два основных этапа. На первом этапе строится матрица чувствительности к утечкам (FSM) [24] на основе моделирования. Каждый столбец этой матрицы представляет эффект утечки, в то время как каждая строка соответствует отклику потенциального датчика в терминах давления. На втором этапе применяется алгоритм Evidential C-Means (ECM) [25] для группировки датчиков-кандидатов согласно схожести их чувствительности к утечкам. Этот процесс позволяет кардинально сократить пространство поиска, переходя от 311 исходных датчиков к 25 представительным датчикам, сгруппированным в пять кластеров по пять элементов в каждом. Затем на этом сокращенном подмножестве выполняется полный перебор для выбора пяти оптимальных датчиков, максимизируя индекс локализуемости, который измеряет способность дифференцировать различные утечки из векторов чувствительности. Пример применения к зоне учета сети большого города иллюстрирует эффективность этого подхода. Вычислительная сложность была сокращена примерно в 440 000 раз по сравнению с полным перебором по полному набору датчиков. Кроме того, окончательный выбор пяти датчиков позволил гарантировать обнаружение всех 448 утечек с особенно высоким индексом локализуемости. Наконец, робастность подхода была подтверждена высокой степенью сохранения результатов, которые изменялись менее чем на 2% за 500 выполнений алгоритма ECM.

Однако, несмотря на указанные преимущества, некоторые ограничения остаются. Финальное решение зависит от качества начальной кластеризации и не гарантирует строгой оптимальности. Кроме того, метод чувствителен к выбору параметров кластеризации, особенно количеству кластеров и количеству представительных датчиков, удержанных на кластер. Он также опирается на упрощающие предположения, такие как фиксированная величина смоделированных утечек, и не учитывает шум измерений или неопределенности, связанные со спросом. Наконец, рассматриваются только датчики давления, что ограничивает разнообразие используемой информации. Для преодоления этих ограничений можно предложить несколько путей улучшения, в частности, сочетание кластеризации с генетическими алгоритмами (см. выше) или роевыми алгоритмами оптимизации [26], что могло бы дополнительно улучшить эффективность и стабильность полученных решений.

Обучение с подкреплением (RL) было применено с целью оптимального размещения датчиков для мониторинга в системах защищенного выращивания, в работе [27]. В этом случае каждое местоположение датчика соответствует «руке бандита», цель — определить позиции, максимизирующие измеряемую информацию (температура и влажность). Для решения этой проблемы авторы использовали алгоритм Томпсона Сэмплинга [28], основанный на бета-распределении, который балансирует исследование между тестированием новых местоположений и использованием выбранных датчиков, уже идентифицированных как полезные. Данные, собранные за 7 месяцев, охватывающих четыре сезона, анализировались ежемесячно. Было определено, что ни один датчик не был оптимальным одновременно для температуры и влажности, следовательно датчики «два в одном» не подходят. Кроме того, наблюдались важные сезонные вариации: наиболее релевантные датчики менялись в зависимости от месяца, делая необходимым адаптивный подход. Интересно, что результаты противоречат распространенным практикам размещения датчиков в центре теплиц, боковые позиции часто оказывались более информативными.

Положительными сторонами метода являются его **автономность** (RL обучается непосредственно из среды, без необходимости в размеченных данных), **адаптивность** (учет сезонных вариаций) и **эффективность**. Однако исследование ограничилось двумя переменными (температура и влажность), оставляя в стороне другие критические факторы, такие как CO<sub>2</sub>, солнечная радиация или поток воздуха. Наконец, поскольку датчики размещены согласно предопределенной сетке и фиксированы, алгоритм не может оптимизировать вне этого дискретного пространства или адаптироваться к эволюционирующим средам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрены и проанализированы основные методы, посвященные важной проблеме оптимального размещения датчиков для диагностики возможных нарушений в технологических процессах. Разнообразие методов отражает сложность и многомерность проблемы, решение которой должно обеспечить высокую эффективность и надежные результаты диагностики, наблюдаемость, отказоустойчивость и минимизацию затрат.

Анализ высветил фундаментальную разницу между методами, основанными на моделях, и методами, основанными на данных. Первые, такие как генетический алгоритм с МГК, количественный анализ диагностируемости или «ветвление и границы», предлагают формальную и строгую методологию. Их сила заключается



в их способности гарантировать теоретические свойства (такие как наблюдаемость или изолируемость) и предоставлять оптимальные или близкие к оптимуму решения для систем умеренного размера. Однако их применение определяется доступностью и точностью модели процесса, что часто трудно и дорого получить, особенно в случае сложных систем. Кроме того, их вычислительная сложность может стать существенным препятствием для использования этих методов в случае очень больших систем.

Методы, основанные на данных, опирающиеся на машинное обучение (с учителем, без учителя, с подкреплением), являются мощной альтернативой. Они используют непосредственно доступные данные, не требуя подробного моделирования. Их гибкость, адаптируемость и способность работать при большой размерности объектов контроля делают их перспективными инструментами для современных систем. Тем не менее, они имеют свои сложности: сильная зависимость от количества и качества массива данных для обучения, иногда отсутствие физической интерпретируемости результатов и, наконец, сложности с валидацией, которая часто должна выполняться на реальной системе.

Из этого анализа следует, что ни один метод не превосходит другие по всем характеристикам. Выбор зависит от контекста применения: наличия и качества доступной модели, размера и сложности системы, вычислительных ресурсов и времени, выделенного на оптимизацию, от природы диагностируемых нарушений и критичности требуемой эффективности и точности диагностики.

Перспективным направлением представляется комбинирование этих методов для объединения их преимуществ. Например, простая модель может быть использована для предварительного отбора подмножества кандидатов датчиков, на котором будет применен более требовательный к вычислениям метод машинного обучения. Количественный анализ диагностируемости, который уже интегрирует стохастические аспекты, выиграл бы от совмещения с техниками кластеризации для сокращения пространства поиска конфигураций.

В заключение нужно подчеркнуть, что оптимальное размещение датчиков остается активной и важной областью исследований для промышленности. Синергия между методами из классической автоматики и потенциал искусственного интеллекта позволит проектировать более надежные, эффективные и экономичные системы диагностики, способные гарантировать безопасность и рентабельность технологических процессов.

## Список литературы (References)

1. Gaudron, P., Mouline, A. Les enjeux de l'industrie 4.0. *Management international*. 2017. Vol. 21. № 2. Pp. 165–169. <https://doi.org/10.7202/1052695ar>.
2. Summers, A. E. Techniques for assigning a target safety integrity level. *ISA Transactions*. 1998. Vol. 37. № 2. Pp. 95–104.
3. Mouzakitis, A. Classification of Fault Diagnosis Methods for Control Systems. *Measurement and Control*. 2013. Vol. 46. № 10. Pp. 303–308. <https://doi.org/10.1177/0020294013510471>.
4. Ali, Y., Narasimhan, S. Sensor network design for maximizing reliability of bilinear processes. *AIChE Journal*. 1996. Vol. 42. № 9. Pp. 2563–2575.
5. Hassani, S., Dackermann, U. A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement. *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 6. P. 3293. <https://doi.org/10.3390/s23063293>.
6. Khemliche, M. Procédé d'identification des défaillances dans les systèmes par placement de capteurs sur le modèle Bond-graph: *Thesis*. 2018.
7. A data driven method for optimal sensor placement in multi-zone buildings. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 243. P. 110956. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110956>.
8. Katoch, S., Chauhan, S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*. 2021. Vol. 80. A review on genetic algorithm. № 5. Pp. 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.
9. Musulin, E., Bagajewicz, M. J., Puigjaner, L. Design of Sensor Networks to Optimize PCA Monitoring Performance. *IFAC Proceedings Volumes*. 2003. Vol. 36. № 5. Pp. 687–692. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(03\)80559-X](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(03)80559-X).
10. Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. 50 p.
11. Vergara, J. R., Estévez, P. A. A review of feature selection methods based on mutual information. *Neural Computing and Applications*. 2014. Vol. 24. № 1. Pp. 175–186. <https://doi.org/10.1007/s00521-013-1368-0>.
12. Eiben, A. E., Smith, J. E. Introduction to Evolutionary Computing: Natural Computing Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. 294 p.
13. Eriksson, D. Using quantitative diagnosability analysis for optimal sensor placement / D. Eriksson, M. Krysander, E. Frisk // *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 45. № 20. P. 940–945. <https://doi.org/10.3182/20120829-3-MX-2028.00196>.
14. Data-driven method for the quantitative fault diagnosability analysis of dynamic systems / F. Fu, D. Wang, L. Li [et al.] // *IET Control Theory & Applications*. 2019. Vol. 13. № 8. Pp. 1197–1203. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2018.5378>.
15. Chvatal, V. A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem / V. Chvatal // *Mathematics of Operations Research*. 1979. <https://doi.org/10.1287/moor.4.3.233>.
16. Introduction to algorithms / eds. T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. 3. ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2009. 1292 p.



17. Boubaker, O. Systèmes non-linéaires: Cours et exercices avec solutions. Systèmes non-linéaires / O. Boubaker, A. Lassoued publisher: Édition Marketing Ellipses. Édition Marketing Ellipses, 2023. 240 p.
18. Signal Detection in Correlated Non-Gaussian Noise Using Higher-Order Statistics / E. Palahina, M. Gamcová, I. Gladíšová [et al.] // Circuits, Systems, and Signal Processing. 2018. Vol. 37. № 4. P. 1704–1723. <https://doi.org/10.1007/s00034-017-0623-5>.
19. Branch-and-bound algorithms: A survey of recent advances in searching, branching, and pruning / D. R. Morrison, S. H. Jacobson, J. J. Sauppe, E. C. Sewell // *Discrete Optimization*. 2016. Vol. 19. Branch-and-bound algorithms. Pp. 79–102. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2016.01.005>.
20. Fijany, A., Vatan, F. A New Method for Sensor Placement Optimization. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. P. 3715. <https://doi.org/10.2514/6.2005-3715>
21. Supervised and Unsupervised Learning for Data Science: Unsupervised and Semi-Supervised Learning / eds. M. W. Berry, A. Mohamed, B. W. Yap. 1. Cham: Springer International Publishing, 2020. VIII, 187 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22475-2>.
22. Semaan, R. Optimal sensor placement using machine learning. *Computers & Fluids*. 2017. Vol. 159. Pp. 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.10.002>.
23. Yoganathan, D., Kondepudi, S., Kalluri, B., Manthapuri, S. Optimal sensor placement strategy for office buildings using clustering algorithms. *Energy and Buildings*. 2018. Vol. 158. Pp. 1206–1225.
24. Hillier, F. S., Lieberman, G. J. Duality Theory. *Introduction to Operations Research*. McGraw-Hill Education, 2021. Pp. 200–224.
25. Masson, M.-H., Denoeux, T. ECM: An evidential version of the fuzzy c-means algorithm. *Pattern Recognition*. 2008. Vol. 41. ECM. № 4. Pp. 1384–1397. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.08.014>.
26. Wang, D., Tan, D., Liu, L. Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*. 2018. Vol. 22. № 2. Pp. 387–408. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>.
27. A Reinforcement Learning Approach for Optimal Placement of Sensors in Protected Cultivation Systems / D. D. Uyeh, B. I. Bassey, R. Mallipeddi [et al.] // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 100781–100800. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3096828>.
28. A Tutorial on Thompson Sampling / D. J. Russo, B. V. Roy, A. Kazerouni [et al.] // *Foundations and Trends® in Machine Learning*. 2018. Vol. 11. № 1. Pp. 1–96. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1707.02038>.

## ■ Информация об авторах

**Диалло Амаду**, аспирант кафедры автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета); 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 24–26/49 лит. А; e-mail: [amdiallo95@gmail.com](mailto:amdiallo95@gmail.com).

**Ковалёв Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики, Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий

и дизайна; 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, Россия; SPIN-код: 3884–5685, AuthorID: 943016, e-mail: [d.a.kovalyov@yandex.ru](mailto:d.a.kovalyov@yandex.ru).

**Русинов Леон Абрамович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета); 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 24–26/49 лит. А; SPIN-код: 3646–5277, AuthorID: 48094, e-mail: [lrusinov@yandex.ru](mailto:lrusinov@yandex.ru).

## ■ Information about the authors

**Diallo Amadou**, PhD student of the Department of Chemical Process Automation of the Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), 26, Moskovski ave., St. Petersburg, Russia, 190013; e-mail: [amdiallo95@gmail.com](mailto:amdiallo95@gmail.com).

**Kovalyov Dmitry Alexandrovich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Productions of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University

of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN-code: 3884–5685, AuthorID: 943016, e-mail: [d.a.kovalyov@yandex.ru](mailto:d.a.kovalyov@yandex.ru).

**Rusinov Leon Abramovich**, Dr. Sci. In Engineering, Professor, Head of the Department of Chemical Process Automation of the Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University), 26, Moskovski ave., St. Petersburg, Russia, 190013; SPIN-code: 3646–5277, AuthorID: 48094, e-mail: [lrusinov@yandex.ru](mailto:lrusinov@yandex.ru).



# АВТОМАТИЗАЦИЯ ДОЗИРОВАНИЯ И СМЕШИВАНИЯ ФЛОКУЛЯНТА

Владимир Анатольевич Шаряков, Ольга Леонидовна Шарякова,  
Федор Денисович Петров

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

© Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Петров Ф. Д., 2026

Автор-корреспондент: О. Л. Шарякова, e-mail: o\_l\_shar@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

В статье проанализированы особенности функционирования шнекового оборудования технологического процесса получения смеси флокулянтов в промышленности. Для получения состава из нескольких флокулянтов заданного качества необходимо обеспечить загрузку бункера определенным объемом предсмеси и процесс перемешивания флокулянтов с постоянной скоростью для равномерности и нужной концентрации. На основании анализа этих особенностей сформулированы требования к системе автоматического управления электроприводами шнековых механизмов устройства подачи и смешивания сыпучих материалов. Для синтеза системы управления процессом дозирования и смешивания флокулянта представлены функциональные схемы работы шнекового элеватора, обеспечивающие точность регулирования уровня загрузки предсмеси в бункер, и шнекового смесителя, обеспечивающие равномерное смешивание сыпучего продукта. Асинхронный двигатель с частотным преобразователем является основным двигателем в электроприводах исполнительных механизмов шнеков; скорость смешивания возможно регулировать в широком диапазоне в зависимости от заданных режимов работы смесителя и состава смеси флокулянтов. Для обеспечения плавности регулирования скорости подачи смеси и точности дозирования предлагается использовать двухконтурное управление приводом шнекового элеватора, сочетающее настройку внутреннего контура скорости на оптимум по модулю с применением пропорционального регулятора и релейный алгоритм во внешнем контуре положения по уровню загрузки продукта в бункер. Для обеспечения первого порядка астатизма системы регулирования предложена настройка на симметричный оптимум контура скорости шнекового смесителя, которая гарантирует стабилизацию скорости смешивания в установившемся режиме и незначительность ошибки в переходных процессах при линейном изменении уровня смеси.

**Ключевые слова:** флокулянт, смеситель, шнек, дозирование, электропривод, настройка на оптимум по модулю, настройка на симметричный оптимум, релейный алгоритм, асинхронный двигатель, частотное управление

**Для цитирования:** Шаряков В. А., Шарякова О. Л., Петров Ф. Д. Автоматизация дозирования и смешивания флокулянта. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 81–89. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_81-89

## AUTOMATION OF FLOCCULANT DOSING AND MIXING

Vladimir Anatolyevich Sharyakov, Olga Leonidovna Sharyakova, Fyodor Denisovich Petrov

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

Corresponding author: O. L. Sharyakova, e-mail: o\_l\_shar@mail.ru

## ABSTRACT

The article analyzes the operational features of auger equipment in the industrial process for producing flocculant mixtures. Producing a consistent, high-quality blend of multiple flocculants requires precise loading of the premix hopper and a constant mixing speed to ensure homogeneity and correct concentration. The analysis of these operational specifics has led to the formulation of requirements for the automatic control system governing the electric drives of the auger mechanisms within the bulk material feeding and mixing apparatus. Functional schematics of the auger elevator and auger mixer are presented to support the design of the automated dosing and mixing control system. The elevator schematics ensure accurate premix level control in the hopper, while the mixer schematics are aimed at achieving homogeneous blending of the powder product. The induction motor with a variable frequency drive is the primary motor in the electric actuators of the auger mechanisms. It allows the mixing speed to be adjusted over a wide range,



depending on the specified operating modes of the mixer and the composition of the flocculant mixture. A cascaded (dual-loop) control scheme for the auger elevator drive is proposed to achieve smooth feed rate control and accurate metering. The inner speed control loop is tuned via the modulus optimum method using a proportional (P) controller, while the outer level control loop utilizes a relay-based algorithm to regulate the product fill height in the receiving hopper. To achieve first-order astatism in the control system, tuning the auger mixer speed loop for symmetric optimum has been proposed. This approach guarantees mixing speed stabilization in the steady-state regime and ensures minimal error during transient processes when the mixture level changes linearly.

**Keywords:** flocculant, mixer, auger, dosing, electric drive, tuning to optimum by modulus, tuning to a symmetric optimum, relay algorithm, induction motor, frequency control

**For citation:** Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Petrov F. D. Automation of flocculant dosing and mixing. Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 81–89. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_81-89

## ВВЕДЕНИЕ

Флокулянты играют незаменимую роль в процессах разделения твердой и жидкой фаз в различных производственных отраслях. Применение флокулянтов в бумажной промышленности позволяет улучшить процесс осаждения целлюлозных волокон и удаление примесей из воды, что повышает качество бумаги и снижает потребление воды и энергии. Для снижения расхода и повышения эффективности применения химических реагентов возникает необходимость в создании универсальной смеси флокулянтов. Смешивание нескольких видов флокулянтов позволяет создать универсальный реагент, который эффективно работает, помогает значительно снизить общий расход химических реагентов, упрощает управление технологическим процессом — вместо обеспечения точной дозировки и контроля двух отдельных реагентов производится контроль одной смеси, что снижает сложность операций и уменьшает вероятность ошибок [1]–[4].

Существующая система автоматизации шнекового смесителя требует постоянного контроля и личного присутствия технического персонала. Применение современных систем автоматизации процесса получения смеси флокулянтов позволяет повысить точность и быстродействие технологического процесса, обеспечить равномерность смешивания и снять нагрузку с обслуживающего персонала [5].

В настоящее время перемещение двух флокулянтов обычно производят вручную или с помощью полуавтоматических систем, что может привести к недостаточной точности и нестабильности процесса. Оператор вручную включает подачу смеси в смеситель, уровень наполнения продукта оператор производит, ориентируясь на смотровое окно, что затрудняет контроль необходимого уровня смеси в бункере и регулирования параметров перемешивания.

Автоматизации дозирования и смешивания флокулянтов является способом достижения требуемых технико-экономических параметров объекта, а именно: стабилизации уровня продукта в бункере смесителя в заданных пределах и скорости смешивания продукта в смесителе для получения однородной смеси [6].

Основным оборудованием для смешивания флокулянтов (рисунок 1) являются шнековый элеватор, предназначенный для предварительного смешивания и транспортировки продукта в смеситель, и смеситель, который осуществляет процесс перемешивания твердых сыпучих или порошкообразных предсмесей, состоящих из нескольких ингредиентов в разных пропорциях с различной удельной массой. Смешивание компонентов происходит мягко, без разрушающего воздействия.

Цель работы — рассмотреть возможность применения стандартных настроек регуляторов в контурах регулирования, обеспечивающих точность отработки заданных значений при ступенчатом и линейном изменении возмущающих воздействий.

Методы исследования: определение основных контуров регулирования в технологических процессах дозирования и смешивания флокулянтов; построение функциональных схем системы регулирования уровня флокулянта в бункере смесителя и системы

регулирования скорости вращения смесителя; построение алгоритмических структур дозирования продукта в бункер и регулирования скорости вращения шнекового смесителя; выбор типов регуляторов и определение их настроек.

## ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- выявить контуры регулирования в системах дозирования продукта в бункер и регулирования скорости вращения шнекового смесителя;



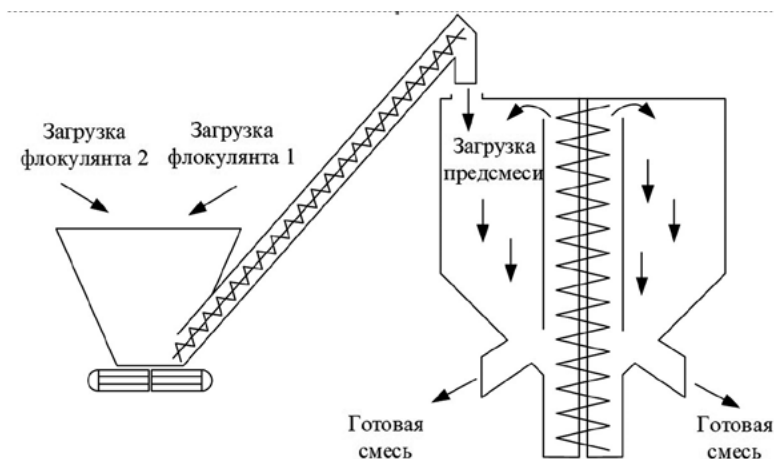


Рисунок 1. Функциональная схема дозирования и смешивания флокулянта

Figure 1. Functional diagram of flocculant dosing and mixing

- определить передаточные функции элементов систем регулирования уровня флокулянта в бункере смесителя и системы регулирования скорости вращения смесителя;
- обосновать структуры регуляторов и предложить стандартные настройки регуляторов в рассматриваемых системах автоматического управления.

Для автоматизации процесса смешивания при помощи шнекового элеватора и шнекового смесителя требуется система автоматического управления (САУ), которая обеспечивает оптимальное смешивание компонентов, высокую точность и максимальную эффективность работы оборудования. Основные требования к такой системе: поддержание стабильного процесса смешивания для получения однородной смеси, контроль уровня продукта, своевременное управление включением и выключением шнекового элеватора для поддержания заданного уровня смеси в бункере, возможность настройки различных параметров (скорость вращения, время смешивания) для адаптации к различным рецептурам, видам сырья и условиям производства. В результате анализа технологического процесса и его условий было выявлено, что для оптимизации необходимо регулировать скорость вращения шнека в смесителе и управлять подачей продукта в смеситель с помощью шнекового элеватора для обеспечения заданного уровня продукта в бункере.

Для контроля уровня продукта используется ёмкостной датчик, установленный в бункере. Он измеряет уровень на основе изменения ёмкости, вызванного присутствием материала. На основании информации, полученной от датчика уровня, происходит включение или останов электродвигателя шнекового элеватора. При достижении заданного максимума уровня продукта в смесителе

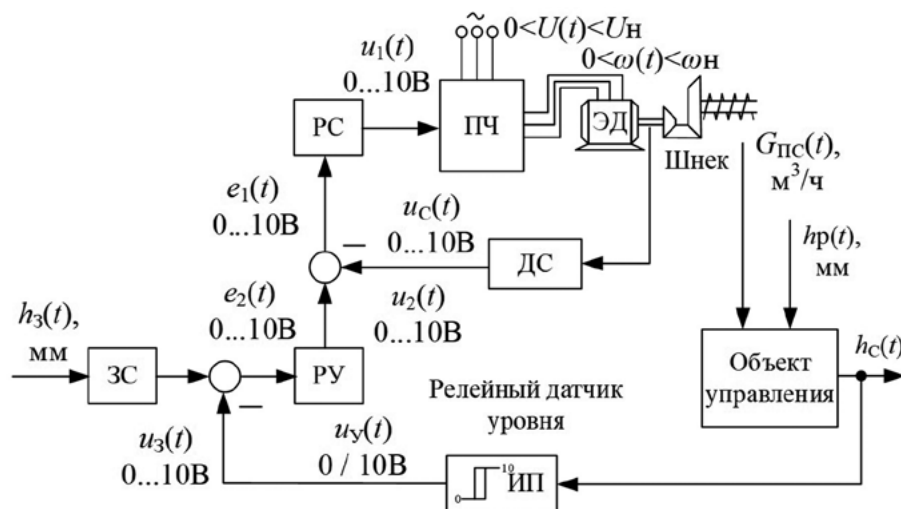
происходит отключение электродвигателя шнекового элеватора, предотвращая переполнение или недостаток материала. Это автоматизирует процесс загрузки смесителя, обеспечивает точное управление подачей продукта, снижает ручной труд и повышает безопасность.

$$u_y = \begin{cases} 10V & \text{если } h_c < h_3 \\ 0V & \text{если } h_c = h_3 \end{cases} \quad (1)$$

Система регулирования уровня продукта в бункере смесителя представляет собой сочетание двух способов управления. Для обеспечения заданной скорости подачи смеси контур скорости настраивают на оптимум по модулю [7]. Такая настройка обеспечит возможность регулирования скорости подачи смеси в бункер. Включение и отключения питания электропривода шнекового элеватора происходит по сигналу от датчика уровня, реализуя релейный закон управления.

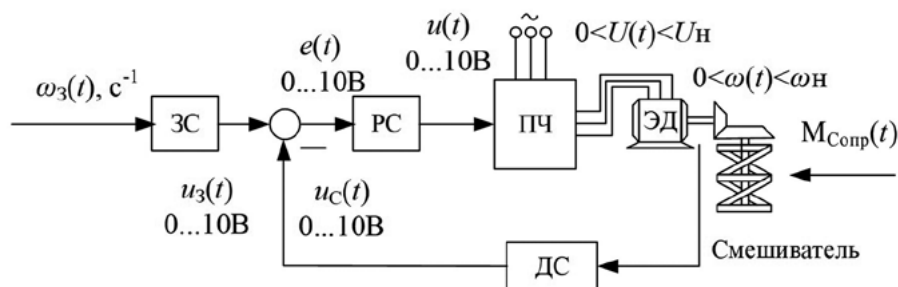
Функциональная схема системы регулирования уровня продукта в бункере смесителя представлена на рисунке 2.

Вертикальный шнековый смеситель используется для равномерного смешивания различных материалов. Основные компоненты этого устройства включают электродвигатель, механизм передачи вращения от двигателя к исполнительному органу и сам шнек, который смешивает материалы. Применение асинхронного двигателя с управлением от частотного преобразователя в приводе шнека обеспечивает высокую точность и гибкость регулирования скорости, плавный пуск и останов, снижая механические нагрузки и экономя энергию. Скорость смешивания обеспечивает равномерность готовой смеси, сама скорость меняется в зависимости от продукта. Выполнение этого требования достигается за счет системы автоматического регулирования скорости электропривода [8].



**Рисунок 2.** Функциональная схема системы регулирования уровня продукта в бункере смесителя: ЗС – задатчик сигнала; РУ – регулятор уровня; РС – регулятор скорости; ПЧ – преобразователь частоты; ЭД – асинхронный электродвигатель; Ред – редуктор; ОУ – объект управления; ИП – релейный датчик уровня;  $h_3(t)$  – задание уровня предсмеси;  $u_3(t)$  – сигнал задания;  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  – ошибка регулирования;  $u_1(t)$ ,  $U(t)$  – напряжение питающее электродвигатель;  $G_{пс}(t)$  – подача предсмеси;  $h_p(t)$  – расход готовой смеси;  $h_c(t)$  – уровень смеси;  $u_y(t)$  – выходной сигнал датчика уровня;  $u_c(t)$  – выходной сигнал датчика скорости

**Figure 2.** Functional diagram of the product level control system in the mixer hopper: SG – setpoint generator; LC – level controller; SC – speed controller; FC – frequency converter; IM – induction motor; RU – reduction unit; CO – control object; LS – level switch;  $h_3(t)$  – premix level setting;  $u_3(t)$  – setpoint signal;  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$  – control error;  $u_1(t)$ ,  $U(t)$  – voltage supplying the electric motor;  $G_{пс}(t)$  – premix feed;  $h_p(t)$  – flow rate of the finished mixture;  $h_c(t)$  – level mixture;  $u_y(t)$  – level sensor output signal;  $u_c(t)$  – speed sensor output signal



**Рисунок 3.** Функциональная схема системы регулирования скорости вращения смесителя

**Figure 3.** Functional diagram of the mixer rotation speed control system

Функциональная схема регулирования скорости шнекового смесителя представлена на рисунке 3.

В соответствии с функциональной схемой контура регулирования уровня продукта в бункере смесителя на рисунке 4 показана алгоритмическая схема системы управления уровнем продукта в бункере смесителя.

Рассмотрим передаточные функции элементов системы [9].

### 1. Передаточная функция преобразователя частоты.

В электроприводах шнекового механизма транспортирования продукта и вертикального шнекового смесителя

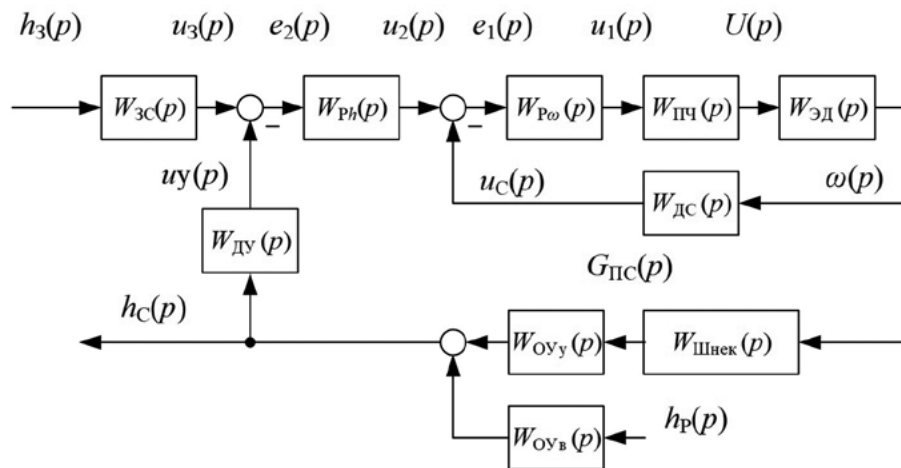
применяется асинхронный двигатель и частотный преобразователь.

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_{пч} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

где  $K_{пч}$  — коэффициент передачи преобразователя;  $T_{пч}$  — постоянная времени преобразователя.

Передаточная функция электродвигателя, согласно [10, 11]:

$$W_{эд}(p) = \frac{\omega(p)}{U(p)} = \frac{K_{эд}}{T_{эм} \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{T_m \cdot p}, \quad (3)$$



**Рисунок 4.** Алгоритмическая структура дозирования флокулянта в смеситель:  $W_{3c}(p)$  – передаточная функция задатчика сигнала;  $W_{ph}(p)$  – передаточная функция регулятора уровня;  $W_{p\omega}(p)$  – передаточная функция регулятора скорости;  $W_{пч}(p)$  – передаточная функция преобразователя частоты;  $W_{эд}(p)$  – передаточная функция электродвигателя;  $W_{шнек}(p)$  – передаточная функция шнека;  $W_{оуу}(p)$  – передаточная функция объекта управления по управляющему воздействию;  $W_{оув}(p)$  – передаточная функция объекта управления по возмущающему воздействию;  $W_{дс}(p)$  – передаточная функция датчика скорости;  $W_{дв}(p)$  – передаточная функция датчика уровня

**Figure 4.** Algorithmic structure of flocculant dosing into the mixer:  $W_{3c}(p)$  – setpoint generator signal function;  $W_{ph}(p)$  – level controller signal function;  $W_{p\omega}(p)$  – speed controller signal function;  $W_{пч}(p)$  – frequency converter signal function;  $W_{эд}(p)$  – electric motor signal function;  $W_{шнек}(p)$  – auger signal function;  $W_{оуу}(p)$  – signal function of the control object for the control action;  $W_{оув}(p)$  – signal function of the control object for the disturbing effect;  $W_{дс}(p)$  – signal function датчика скорости;  $W_{дв}(p)$  – speed mixture level sensor signal function

где  $K_{эд} = \frac{2 \cdot M_k}{S_k \cdot \omega_{1H}}$  – коэффициент передачи электро-  
двигателя;

$T_{эм} = \frac{1}{(S_k \cdot \omega_{1H})}$  – электромагнитная постоянная элек-

тродвигателя;

$S_k$  – критическое скольжение;

$\omega_{1H}$  – номинальная частота вращения поля статора;

$T_M$  – механическая постоянная времени, определяемая приведенным моментом инерции электродвигателя.

**2. Передаточная функция шнека.** Так как в редукторе происходит преобразование скорости в перемещение, т. е. происходит интегрирование, редуктор будет описываться интегрирующим звеном:

$$W_{шнек}(p) = \frac{G_c(p)}{\omega(p)} = \frac{K_{шнек}}{p}, \quad (4)$$

где  $K_{шнек}$  – коэффициент передачи шнека, который характеризует производительность.

**3. Передаточная функция объекта управления** может быть описана с помощью уравнения

$$W_{оу}(p) = \frac{h(p)}{G_c(p)} = \frac{K_{оу}}{p} = \frac{1}{T_{оу} \cdot p}, \quad (5)$$

где  $K_{оу}$  – коэффициент передачи объекта управления;  $T_{оу}$  – постоянная времени объекта управления.

#### 4. Передаточная функция датчика скорости:

$$W_{дс}(p) = \frac{u_c(p)}{\omega(p)} = \frac{K_{дс}}{T_{дс} \cdot p + 1}, \quad (6)$$

где  $u_c(p)$  – выходное напряжение датчика скорости электродвигателя, В;

$\omega(p)$  – скорость электродвигателя,  $c^{-1}$ .

#### 5. Передаточная функция датчика уровня продукта в бункере:

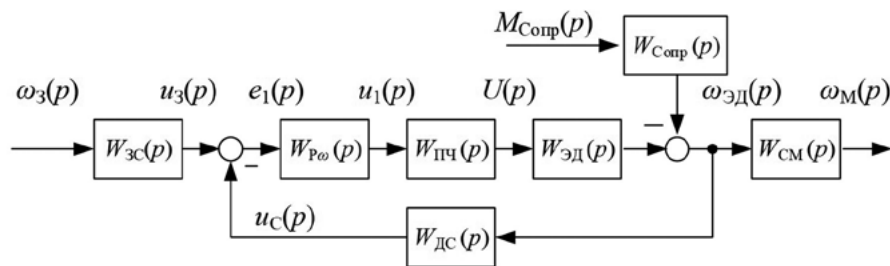
$$W_{дв}(p) = \frac{u_c(p)}{h_c(p)} = K_{дв}, \quad (7)$$

где  $u_c(p)$  – выходное напряжение датчика уровня в бункере смесителя, В;

$h_c(p)$  – регулируемая величина уровня продукта в бункере, мм.

Контур скорости в приводе подачи смеси содержит интегрирующее звено. Поэтому при настройке этого контура на оптимум по модулю необходимо применить пропорциональный регулятор (П-регулятор) с передаточной функцией [7, 9, 12–14]:





**Рисунок 5.** Алгоритмическая структура регулирования скорости вращения шнекового смесителя (обозначения см. в комментариях к рисунку 4)

**Figure 5.** Algorithmic structure for auger agitator speed control (see the legend in the comments to Figure 4)

$$\begin{cases} W_{P1}(p) = \beta_1 \\ \beta_1 = \frac{T_{O1}}{2 \cdot T_{\mu_1} \cdot \prod_{i=1}^n K_{i1}} \\ T_{O1} = T_M \quad T_{\mu_1} = T_{ЭМ} + T_{ПЧ} + T_{ДС} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $T_{O1}$  — большая постоянная времени первого контура;

$T_{\mu}$  — суммарная малая постоянная времени первого контура;

$K_{i1}$  — коэффициенты передачи звеньев, входящих в первый контур.

$$\begin{cases} W_{PC}(p) = \beta_C \cdot \frac{\tau_C \cdot p + 1}{\tau_C \cdot p} \\ \beta_C = \frac{T_{OC}}{2 \cdot T_{\mu_C} \cdot \prod_{i=1}^n K_{iC}} \\ T_{OC} = T_M \quad T_{\mu_C} = T_{ЭМ} + T_{ПЧ} + T_{ДС} \quad \tau_C = 4 \cdot T_{\mu_C} \end{cases}, \quad (9)$$

где  $T_{OC}$  — большая постоянная времени контура регулирования скорости;  $T_{\mu_C}$  — суммарная малая постоянная времени первого контура;  $K_{iC}$  — коэффициенты передачи звеньев, входящих в контур регулирования скорости.

Для обеспечения равномерного перемешивания смеси флюккуланта система регулирования скорости смесителя содержит контур регулирования скорости, что обеспечивает поддержание заданной частоты вращения смесителя в широком диапазоне регулирования при изменении массы и плотности получаемой смеси.

Алгоритмическая структура смешивания флюккуланта представлена на рисунке 5.

Передаточная функция смесителя:

$$W_{CM}(p) = \frac{\omega_{CM}(p)}{\omega_{ЭД}(p)} = K_{CM}. \quad (9)$$

В контуре скорости значительны возмущения, обусловленные возникновением момента сопротивления на валу двигателя при смешивании флюккулантов. Контур скорости содержит интегрирующее звено. В этом случае целесообразным является настройка контура скорости на симметричный оптимум с использованием ПИ-регулятора [7, 9, 12–15].

Передаточная функция ПИ регулятора скорости имеет вид:

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Настройка контура скорости шнекового элеватора на оптимум по модулю обеспечивает точность регулирования, высокое быстродействие и перерегулирование, не превышающее 5%. Применение частотного управления асинхронного двигателя позволяет регулировать скорость подачи предсмеси в бункер.

Настройка контура скорости шнекового смесителя на симметричный оптимум обеспечивает первый порядок астатизма по возмущению, что приводит к нулевой ошибке регулирования в установившемся режиме работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор типов регуляторов и их настроек в электроприводе при автоматизации производственного процесса обоснован требованиями к режимам работы установки, наличием возмущающих воздействий и видом передаточных функций, представляющих объект регулирования, он также тесно связан с особенностями функционирования всей технологической цепочки. Поэтому применение П-регулятора с настройкой на ОМ в контуре скорости шнекового элеватора подачи сыпучего материала в бункер с объектом управления

типа интегрирующее звено и отсутствием возмущений позволяет обеспечить высокое быстродействие, плавность регулирования подачи и точность стабилизации уровня смеси в бункере. Несмотря на то, что в контуре регулирования скорости шнекового смесителя объектом управления также является интегрирующее звено, целесообразно использовать ПИ-регулятор с настройкой на СО, так как именно такая настройка позволяет решить основную задачу стабилизации выходной регулируемой переменной при наличии значительных возмущений. Значительные возмущения обусловлены самим технологическим процессом — постоянной подачей продукта вплоть до заданного уровня, в результате чего на валу исполнительного двигателя возникает момент сопротивления, равный номинальному моменту двигателя. В этом случае настройка на СО обеспечивает точное регулирование скорости вращения электродвигателя, что приводит к равномерности смешивания флокулянтов и предотвращает перегрузки системы.

### Список литературы

1. Ардуанова А. М. Выбор коагулянтов и флокулянтов для локальной очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства / А. М. Ардуанова, И. С. Глушанкова // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 5. С. 40–46. DOI 10.35776/VST. 2022.05.05. EDN HUCABZ.
2. Mohammadreza Kamali, Seyedeh Azadeh Alavi-Borazjani, Zahra Khodaparast, Mohammadreza Khalaj, Akram Jahanshahi, Elisabete Costa, Isabel Capela. Additive and additive-free treatment technologies for pulp and paper mill effluents: Advances, challenges and opportunities // Water Resources and Industry. 2019. No. 21. P. 1–22.
3. Программа для определения количества очищенной сточной воды от нормы расхода флокулянта / Э. Н. Бикмеев, Л. З. Касьянова, А. А. Исламутдинова, Э. К. Аминова // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 14–15 мая 2024 года. Уфа: ООО «Информреклама», 2024. С. 316–319. EDN NIYMKU.
4. Карпухина Е. В. Повышение эффективности использования полимерных флокулянтов в очистке сточных вод / Е. В. Карпухина, М. В. Бузаева, И. А. Макарова // Актуальные проблемы техносферной безопасности: Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей, Ульяновск, 20–24 мая 2024 года. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2024. С. 120–122. EDN ADTYMY.
5. Мухамбетов Д. З. Проблемы автоматизации дозирования сыпучих материалов / Д. З. Мухамбетов, И. Ю. Тюрин, А. А. Лушников // Инновационные технологии: опыт, проблемы, перспективы развития, Тверь, 25 октября 2023 года. Тверь: Тверская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 367–369. EDN PFWSTE.
6. Горобченко С. Л. Методика выбора исполнительных устройств по точности регулирования в технологических схемах целлюлозно-бумажного производства / С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалев // Трубопроводная арматура и оборудование. 2024. № 2 (131). С. 26–28. EDN AMXFKD.
7. Аналитическая настройка регуляторов в каскадной системе автоматического регулирования / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 4. С. 137–144. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_4\_20. EDN LQZTQE.
8. Application of linear asynchronous motors for high-speed ground transport / S. T. Akhatov, V. G. Solonenko, N. M. Makhmetova [et al.] // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2021. Vol. 2, No. 446. P. 21–36. DOI 10.32014/2021.2518-170X. 31. EDN RDAJWE.
9. Ковалев Д. А. Моделирование объектов управления: Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения курсовой работы / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна Высшая школа технологии и энергетики, 2023. 153 с. EDN WPMYWP.
10. Янгиров И. Ф. Математическая модель асинхронного двигателя с полым ротором и улучшенными механическими характеристиками / И. Ф. Янгиров // Технология машиностроения. 2023. № 9. С. 10–13. EDN QNNWXX.
11. Усольцев А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
12. Синтез двухконтурной системы автоматического управления уровнем воды парового котла / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2022. № 3. С. 136–142. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_3\_24. EDN SURVKI.
13. Аналитическая настройка регуляторов в каскадной системе автоматического регулирования разряжением / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, В. А. Лебедева // Современная наука и инновации. 2023. № 3 (43). С. 36–47. DOI 10.37493/2307-910X. 2023.3.4. EDN RBRXIZ.
14. Разработка имитационной модели системы автоматического управления уровнем зелёного щёлоча в бачке-растворителе плава содорегенерационного котлоагрегата / Д. А. Ковалев, В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, М. А. Рубцова // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. № 67 (93). С. 74–78. DOI 10.36807/1998-9849-2023-67-93-74-78. EDN EYNWWD.
15. A Low Dynamic Deviation and High Robustness Position Control Strategy Based on Virtual Reference / T. Liu,



Q. Tong, Q. Zhang, K. Liu // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 32290–32300. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3161748. EDN JOTPWN.

## References

1. Arduanova, A. M. Selection of coagulants and flocculants for local wastewater treatment of pulp and paper production / A. M. Arduanova, I. S. Glushankova // Water supply and sanitary engineering. 2022. No. 5. pp. 40–46. DOI 10.35776/VST.2022.05.05. EDN HUCABZ.
2. Mohammadreza Kamali, Seyedeh Azadeh Alavi-Borazjani, Zahra Khodaparast, Mohammadreza Khalaj, Akram Jahanshahi, Elisabete Costa, Isabel Capela. Additive and additive-free treatment technologies for pulp and paper mill effluents: Advances, challenges and opportunities // Water Resources and Industry. 2019. No. 21. P. 1–22.
3. A program for determining the amount of purified wastewater from the flocculant consumption rate / E. N. Bikmeev, L. Z. Kasyanova, A. A. Islamutdinova, E. K. Aminova // Actual problems and directions of development of organic and inorganic synthesis technologies: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Sterlitamak, May 14–15, 2024. Ufa: Informreklama LLC, 2024. pp. 316–319. EDN NIYMKU.
4. Karpukhina, E. V. Improving the efficiency of using polymer flocculants in wastewater treatment / E. V. Karpukhina, M. V. Buzaeva, I. A. Makarova // Actual problems of technosphere security: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates, Young Scientists, and Teachers, Ulyanovsk, May 20–24, 2024. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2024. pp. 120–122. EDN ADTYMY.
5. Mukhambetov D. Z. Problems of automation of dosing of bulk materials / D. Z. Mukhambetov, I. Yu. Tyurin, A. A. Lushnikov // Innovative technologies: experience, problems, development prospects, Tver, October 25, 2023. Tver: Tver State Agricultural Academy, 2023. pp. 367–369. EDN PFWSTE.
6. Gorobchenko, S. L. Method of selecting actuators for the accuracy of regulation in technological schemes of pulp and paper production / S. L. Gorobchenko, D. A. Kovalev // Pipeline fittings and equipment. 2024. № 2 (131). Pp. 26–28. EDN AMXFKD.
7. Analytical adjustment of regulators in a cascade automatic control system / D. A. Kovalev, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, V. A. Lebedeva // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. 2022. No. 4. pp. 137–144. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_4\_20. EDN LQZTQE.
8. Application of linear asynchronous motors for high-speed ground transport / S. T. Akhatov, V. G. Solonenko, N. M. Makhmetova [et al.] // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2021. Vol. 2, No. 446. P. 21–36. DOI 10.32014/2021.2518-170X. 31. EDN RDAJWE.
9. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L. Modeling of control objects: An educational and methodical manual intended for course work. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design Higher School of Technology and Energy, 2023. 153 p. EDN WPMYWP.
10. Yangirov, I. F. Mathematical model of an asynchronous motor with a hollow rotor and improved mechanical characteristics / I. F. Yangirov // Technology of mechanical engineering. 2023. No. 9. pp. 10–13. EDN QNNWXX.
11. Usoltsev A. A. Frequency control of asynchronous motors: A textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University of ITMO, 2006. 94 c
12. Synthesis of a two-circuit automatic water level control system for a steam boiler / D. A. Kovalev, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, V. A. Lebedeva // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1: Natural and Technical Sciences. 2022. No. 3. pp. 136–142. DOI 10.46418/2079-8199\_2022\_3\_24. EDN SURVKI.
13. Analytical adjustment of regulators in a cascade system of automatic discharge control / D. A. Kovalev, V. A. Sharyakov, O. L. Sharyakova, V. A. Lebedeva // Modern science and innovation. 2023. № 3 (43). Pp. 36–47. DOI 10.37493/2307-910X. 2023.3.4. EDN RBRXIZ.
14. Kovalev D. A., Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Rubtsova M. A. Development of a simulation model of an automatic control system for the level of green liquor in a solvent tank for melting a sodaregeneration boiler unit // Proceedings of the St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2023. № 67 (93). Pp. 74–78. DOI 10.36807/1998-9849-2023-67-93-74-78. EDN EYNWWD.
15. A Low Dynamic Deviation and High Robustness Position Control Strategy Based on Virtual Reference / T. Liu, Q. Tong, Q. Zhang, K. Liu // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 32290–32300. DOI 10.1109/ACCESS.2022.3161748. EDN JOTPWN.



## ■ Информация об авторах

**Шаряков Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2943-676X>, SPIN-код: 7762-0173, AuthorID: 1097174, SCOPUS Author ID: 57205264449, e-mail: v\_a\_shar@mail.ru.

**Шарякова Ольга Леонидовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации тех-

нологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5932-2766>, SPIN-код: 6251-2565, AuthorID: 391713, SCOPUS Author 57205263930, e-mail: o\_l\_shar@mail.ru.

**Петров Фёдор Денисович**, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com.

## ■ Information about the authors

**Sharyakov Vladimir Anatolyevich**, PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Automation of Technological Processes and Productions of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2943-676X>, SPIN-code: 7762-0173, AuthorID: 1097174, SCOPUS Author ID: 57205264449, e-mail: v\_a\_shar@mail.ru.

**Sharyakova Olga Leonidovna**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Technological Processes and Productions of

the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5932-2766>, SPIN-code: 6251-2565, AuthorID: 391713, SCOPUS Author 57205263930, e-mail: o\_l\_shar@mail.ru.

**Petrov Fyodor Denisovich**, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com.



# КРОНА И ЦБП 20 ЛЕТ ВМЕСТЕ

*«Связаны одной целью, скованы одной цепью»*

Институт комплексного развития и обучения «КРОНА» был образован в 2006 году как структурное подразделение Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (в прошлом ЛТИ-ЦБП). После объединения с университетом технологии и дизайна в 2015 году СПбГТУРП приобрёл новый статус — структурное подразделение объединённого университета — «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» и новое название — «Высшая школа технологии и энергетики». Ни статус, ни функциональные обязанности Института «КРОНА» при этом не претерпели изменений. Основным направлением деятельности «КРОНЫ» было и остаётся предоставление производственным компаниям дополнительных профессиональных образовательных услуг.

Первоначально проекты «КРОНЫ» были полностью ориентированы на целлюлозно-бумажную промышленность, где потребителями наших разработок являлись специалисты предприятий ЦБП России и постсоветского пространства (Белоруссия, Казахстан, Узбекистан, Украина, Молдавия, Литва, Латвия, Эстония).

Со временем «КРОНА» расширила свои интересы в сторону смежных с ЦБП отраслей промышленности, таких как гофропроизводство и полиграфия, а также в сферу топливно-энергетического комплекса (так как второй базовой специализацией нашего университета является промышленная энергетика). Кроме того, наличие в университете факультетов автоматизации, механики, экономики, экологии позволило создавать как межотраслевые проекты, так и сквозные, не завязанные на конкретную отрасль промышленности. В связи с этим тематика программ Института «КРОНА» в значительной степени преобразовалась из отраслевой в политехническую. При этом лучшие образцы отраслевых программ остались в разделе ежегодных регулярных проектов.

В первый год своего существования «КРОНА» вышла и на международную арену. Так, Институтом «КРОНА» был организован и проведен международный семинар по теме «Содорегенерационные котлы и выпарка», имевший среди

российских участников большой положительный резонанс. В семинаре приняли участие представители компаний из США, Канады, Финляндии, Германии, которые поделились с российскими специалистами последними научными исследованиями и «ноу-хау» в области регенерационного цикла производства целлюлозы. Наряду с этим, сотрудники «КРОНЫ» совершили несколько зарубежных поездок в Финляндию и Германию, где установили контакты со специалистами целлюлозно-бумажного производства в научных центрах, университетах и учебных центрах отраслевого профиля.

В последующие годы международная деятельность «КРОНЫ» получила достаточно широкое развитие. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, в Санкт-Петербурге (Ленинграде) территориально располагались Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности (ЛТИ ЦБП, впоследствии СПбГТУРП, ныне ВШТЭ), Всероссийский научно-исследовательский институт бумаги (ВНИИБ), Центральный научно-исследовательский институт бумагоделательного машиностроения (ЦНИИ БумМаш), Государственный институт по проектированию предприятий целлюлозно-бумажной промышленности — Гипробум, Завод бумагоделательного машиностроения им. 2-ой Пятилетки, Институт Энергобумпром, Пусконаладочная компания ЦБП. Во-вторых, в окрестностях города было построено несколько крупных целлюлозно-бумажных предприятий: Светогорский ЦБК, Сясьский ЦБК, Выборгский ЦБК, Приозерский целлюлозный завод, Санкт-Петербургский картонно-полиграфический комбинат, Бумажная фабрика «Коммунар», завод «Картонтоль», Санкт-Петербургская бумажная фабрика (филиал АО «ГОЗНАК»), Бумажная фабрика технических бумаг, несколько гофропредприятий и других бумажных производств. В-третьих, вследствие первых двух факторов в нашем мегаполисе обосновались почти все имеющиеся в России представительства зарубежных компаний, которые реализуют в России свои бизнес-интересы в соответствии с их профилем (ЦБП). С партнерами «КРОНА» установила деловые отношения, а особенно тесные взаимодействия осуществлялись со следующими



*Международный семинар по теме  
«Содорегенерационные котлы и выпарка»*



компаниями: Valmet Technologies (Финляндия), VOITH Paper (Германия), Andritz OY (Австрия-Финляндия), BASF (Германия), Kemira (Финляндия), KWI (США), Wellons (США), ABB (Швеция), BANMARK (Дания), Elof Hansson (Швеция), Parcel SPb (Чехия), Sulzer Pumps (Швейцария), KBR EAST (США), Ital-T (Италия), ALBANY International (Швеция), BTG (Австрия), Honeywell (США), GRUNDFOS (Дания), Spirax-Sarco (Англия), CLEXTAL (Франция), IBS (Австрия), PULMAC (Канада), Allimand (Франция), VAPOR (Финляндия), Nalco (США).

Деловые отношения были установлены и с научными и образовательными организациями: Атланта (штат Джорджия, США), Институт науки и технологии бумаги; Грац (Австрия), Технологический университет Граца; Дармштадт (Германия), Технический университет Дармштадта; Йозенсуу (Финляндия), Институт природных ресурсов Финляндии; Лаппеенранта (Финляндия), Лаппеенрантский технологический университет; Минск (Беларусь), Белорусский государственный технологический университет; Мюнхен (Германия), Мюнхенский университет прикладных наук; Рига (Латвия), Рижский технический университет; Лаппеенранта (Финляндия), Сайменский университет прикладных наук; Торонто (Канада), Университет Торонто; Уппсала (Швеция), Шведский университет сельскохозяйственных наук; Центр бумажников города Гёрнсбах (Германия); PTS, Мюнхен (Германия); ВТТ, Хельсинки, Юваскюля (Финляндия).

Благодаря этим факторам Санкт-Петербург оказался мировой столицей в области целлюлозно-бумажного производства, так как нигде в мире в одном месте нет такой концентрации отраслевых организаций.

К сожалению, в последние годы эти научный и международный кластеры полностью распались. В Санкт-Петербурге осталось всего несколько организаций, специализирующихся в ЦБП. Поэтому значение каждой из них для отрасли значительно возросло.

Институт «КРОНА» за 20 лет сформировался как многофункциональный и специализированный центр в области ЦБП, так и универсальный межотраслевой и многоотраслевой центр профессионального общения. Мы осуществляем не только техническое и бизнес-обучение, и повышение квалификации специалистов и руководителей, но и оказываем услуги предприятиям в сфере аналитики, консалтинга, развития производства, рекрутинга, научного профессионального консультирования и многого другого.

За 20 лет работы мероприятия в Институте «КРОНА» посетили более 10 тысяч специалистов разного профиля. Несколько тысяч повысили свою квалификацию на рабочих местах во время выездных мероприятий спикеров Института «КРОНА». В качестве экспертов в мероприятиях

Института «КРОНА» приняло участие свыше 100 лучших в своих сферах специалистов из разных стран мира. Мы установили тесные деловые профессиональные и личные контакты с экспертами-представителями Австрии, Бельгии, Бразилии, Беларуси, Германии, Израиля, Италии, Канады, Китая, Латвии, США, Финляндии, Франции, Чехии, Швеции, Швейцарии. К сожалению, в настоящее время международная деятельность приостановлена, но мы оптимисты и надеемся на её восстановление.

Более 200 российских экспертов-спикеров и партнёров Института «КРОНА» можно разделить на три основные подгруппы:

I. Специалисты и руководители проектных, инжиниринговых, консалтинговых, пуско-наладочных и других сервисных компаний.

II. Самые высококвалифицированные работники промышленных предприятий.

III. Фрилансеры — лучшие специалисты в своих областях, представляющие свои услуги на образовательном рынке в форме индивидуальных предпринимателей.

Институт «КРОНА» за время своего существования накопил более 30 различных форм своей работы. Это и курсы повышения квалификации в Институте, с выездом на предприятия, и программы переподготовки, специализированные семинары, конференции, «конференции наоборот», тренинги, индивидуальные занятия, как по инициативе «КРОНЫ», так и по заказам предприятий. Деловые игры, экскурсии, консультации, конкурсы, опросы, круглые столы, мозговые штурмы, вебинары on-line, телекоммуникационные мосты, изготовление и использование анимационных видеофильмов, электронных тренажеров, учебных пособий, выставки, мастер-классы, лабораторные работы, переговоры, неформальные формы общения, печатные и электронные публикации, реклама, специализированные презентации компаний, сетевые формы общения и обмена опытом, и многое другое.

Институт «КРОНА» неоднократно принимал участие и в различных выставках, симпозиумах, конгрессах в России и за рубежом, а также в нескольких государственных образовательных президентских программах и проектах.

За прошедшие два десятилетия Институтом «КРОНА» установлены тесные деловые контакты со всеми предприятиями ЦБП и гофроиндустрии России и ближнего зарубежья. Мы находимся с ними в тесном деловом общении. Контакты осуществляются как с линейными инженерами, так и с руководителями и их заместителями всех специальностей предприятий. Многие из них принимали участие в различных мероприятиях Института «КРОНА».



Свыше 100 лучших специалистов из разных стран мира

Курсы повышения квалификации, конференции, тренинги

## Директора отраслевых предприятий в гостях у «КРОНЫ»



Очень помогают в работе и личные контакты с первыми лицами — директорами предприятий. Несмотря на свою занятость, часть из них наносили визиты и участвовали в разной форме в наших мероприятиях.

У истоков создания Института «КРОНА» стоял А. Н. Иванов, который изначально и до сегодняшнего дня непрерывно возглавляет Институт «КРОНА». За двадцать лет в институте «КРОНА» с разной продолжительностью трудились более 30 человек, и к настоящему времени сформировался оптимальный трудовой коллектив опытных профессионалов в своём деле, который является коллективом единомышленников.

Особое внимание в своей деятельности Институт «КРОНА» уделяет обновлению и совершенствованию своих программ обучения и форм работы. Среди механизмов, помогающих двигаться в правильном направлении является: мониторинг и анализ обратной связи от участников мероприятий, получаемой путём анкетирования и устных опросов, а также предложения, рекомендации и пожелания, поступающие непосредственно от предприятий. Мы стараемся учитывать и конкретные пожелания, и критические замечания при обновлении и составлении новых программ.

За прошедшее время Институт «КРОНА» создано и реализовано более 50 различных программ повышения квалификации. Часть из них оказалась разовыми, а большинство стали регулярными с ежегодным или периоди-

ческим проведением как на территории института, так и с выездом на предприятия, а также в различных формах электронной трансляции.

Повышенное внимание Институт «КРОНА» уделяет созданию и распространению электронных учебных пособий, изготавливаемых как по собственной инициативе, так и по заказу предприятий.



Огромный вклад в формирование и развитие программной части семинаров и конференций и их реализацию в Институте «КРОНА» внёс один из лучших специалистов в области ЦБП в нашей стране Александр Семёнович Смолин, который всю свою жизнь работал в отраслевых научных организациях, а последние годы своей жизни (до 2020 г.) возглавлял кафедру Технологии бумаги и картона в нашем университете.

Институт «КРОНА» выражает благодарность всем своим партнёрам за многолетнее сотрудничество и надеется на развитие и углубление наших очень важных и всем нужных отношений.

## Сотрудники «КРОНЫ»



Иванов А. Н.



Симонова Е. И.



Сафрошкин И. В.



Иванова Л. Н.

План работы  
Института «КРОНА»  
на 2026 год  
можно увидеть  
по QR-коду



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

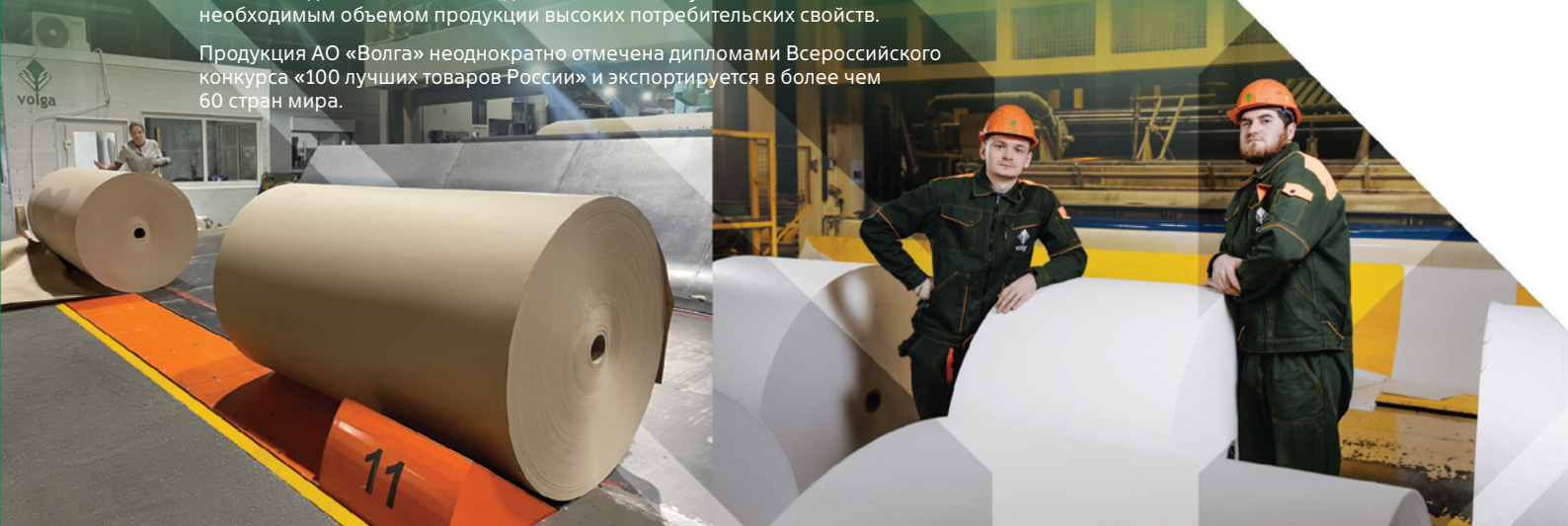
## АО «ВОЛГА»

Один из крупнейших бумажных комбинатов в России. Предприятие специализируется на производстве легкого и ультралегкого тарного картона, а также выпускает бумагу для упаковки и печати.

Комбинат расположен на берегу реки Волга в г. Балахна Нижегородской области, в 450 км от Москвы. История компании берет свое начало в 1928 году, когда была запущена первая бумагоделательная машина. С тех пор предприятие развивалось и модернизировалось с учетом глобальных тенденций в целлюлозно-бумажной отрасли.

В 2024 году запущена бумагоделательная машина № 6 и линия макулатурной массы ММ-500. Это позволило увеличить производственную мощность комбината до 500 тыс. тонн в год и обеспечить покупателей АО «Волга» необходимым объемом продукции высоких потребительских свойств.

Продукция АО «Волга» неоднократно отмечена дипломами Всероссийского конкурса «100 лучших товаров России» и экспортируется в более чем 60 стран мира.



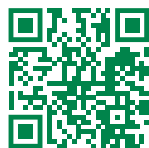
## БЛАГОДАРНОСТЬ

*От имени акционерного общества «Волга» благодарим Вас и весь педагогический коллектив Института «КРОНА» за качественные и востребованные знания в области развития целлюлозно-бумажной промышленности России, за высокий профессионализм преподавателей, а также за отличную организацию всех программ по повышению квалификации кадров ЦБП.*

*Выражаем признательность за отлично проведенную работу по повышению квалификации наших специалистов, прошедших обучение на Ваших семинарах.*

*Мы высоко ценим совместную работу с Вами и желаем Институту «КРОНА» творческих успехов и процветания! Надеемся на дальнейшее взаимовыгодное развитие наших отношений.*

*Начальник управления  
по работе с персоналом  
АО «Волга»  
М. Г. Сидягин*



Акционерное общество «Волга»  
606407, Нижегородская область,  
г. Балахна, ул. Горького, д. 1  
Тел. +7 (800) 3002844  
e-mail: [info@volga-paper.ru](mailto:info@volga-paper.ru)  
[www.volga-paper.ru](http://www.volga-paper.ru)

## СОТРУДНИЧЕСТВО

Сотрудничество АО «Волга» с Институтом «Крона» длится уже более 10 лет.

В рамках корпоративных договоров 2022–2025 гг. 119 сотрудников нашей компании прошли обучение по дополнительным профессиональным программам:

- ◆ Управленческие навыки руководителя среднего звена
- ◆ Контроль качества продукции ЦБП в гофроиндустрии
- ◆ Повышение эффективности работы теплоэнергетических хозяйств
- ◆ Диагностика и надежность
- ◆ Технология бумаги и картона
- ◆ Эффективные продажи гофрокартона и гофротары
- ◆ Школа гофровика
- ◆ Эффективный HR
- ◆ Метрологическое обеспечение производственных процессов
- ◆ Школа механика
- ◆ Техническое обслуживание и ремонт оборудования
- ◆ Очистка сточных вод
- ◆ Вода: подготовка, использование, очистка
- ◆ Системы электроснабжения и автоматического регулирования технологических процессов на промышленных предприятиях. Опыт внедрения, эксплуатации, модернизации
- ◆ Пароконденсатные системы БДМ/КДМ и гофроагрегатов

Кроме того, в 2023 году Институтом «Крона» для АО «Волга» был разработан электронный учебный курс «Основы технологии упаковочных материалов».



**Светогорский ЦБК**

## ФЛАГМАН ЦЕЛЛЮЛЗНО-БУМАЖНОЙ ОТРАСЛИ В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Светогорский ЦБК — производитель офисной бумаги SvetoCopy и Ballet, офсета, картона, химико-термомеханической массы (ХТММ и БХТММ) и другой продукции. Это системообразующее предприятие — один из самых современных целлюлозно-бумажных комбинатов в России, входит в рейтинг лучших промышленных предприятий Северо-Запада\* и удостоено сертификатом «Отличное место работы»\*\*.

Офисная бумага SvetoCopy по итогам 2025 года в пятый раз стала лауреатом Всероссийского конкурса Программы «100 лучших товаров России». В 2026 году бренду SvetoCopy исполняется 30 лет.

Светогорский ЦБК экологически ответственное предприятие. Компания уделяет большое внимание лесовосстановлению, высаживает три сеянца взамен одного заготовленного дерева. Комбинат имеет комплексное экологическое разрешение (КЭР), которое подтверждает, что

предприятие работает в соответствии с установленными экологическими нормами и стандартами, деятельность компании ведется в рамках наилучших доступных технологий (НДТ).

В конце 2025 года Светогорский ЦБК объявил о начале производства картона для бумажных стаканчиков. На российском рынке, по оценкам экспертов, около 85% подобного картона — это импортное сырье, в основном из Китая и Турции; отмечается нехватка отечественных поставщиков. Светогорский ЦБК будет производить трехслойный немелованный картон плотностью 200, 235, 265, 280 г/м<sup>2</sup> из стопроцентного первичного волокна. Также компания начинает выпуск картонной основы (капсток) и картона для обечайки, чтобы клиентам было удобно заказывать все сразу у одного поставщика. Важным преимуществом также является предложение «готового» продукта — ламинированного картона, что существенно упрощает работу производителям стаканчиков. Картон

\* Светогорский ЦБК входит в **top-15** рейтинга промышленных предприятий Северо-Запада, подготовленного редакцией специальных проектов газеты «Деловой Петербург».



[www.sveto-paper.com](http://www.sveto-paper.com)

**\*\*** Два года подряд Светогорский ЦБК проводил исследования вовлеченности персонала на платформе Harry Job. По итогам 2024 и 2025 годов компания получила сертификат «Отличное место работы».

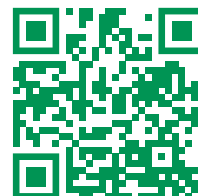
производится на БДМ и ламинируется партнером Светогорского ЦБК, компанией «СветоПак».

На Светогорском ЦБК в производство был запущен еще один новый продукт — белый лайнер, который представляет собой гладкую верхнюю часть для гофрированных коробок. Лайнер предназначен для нанесения печати и усиления прочности коробок.

Ярким событием начала 2025 года стало открытие современного корпоративного музея компании «Светогорский ЦБК». В нем можно проследить весь путь целлюлозно-бумажного производства, узнать любопытные факты о комбинате и Светогорске. Главной жемчужиной экспозиции является макет бумагоделательной машины № 4, который позволяет почувствовать масштаб и мощь производства Светогорского ЦБК. При этом, ключевая ценность компании — это безопасность сотрудников и подрядчиков, и этой теме в музее отведено особое место.

Компания «Светогорский ЦБК» заинтересована в том, чтобы через музей не только сохранять и транслировать исторические вехи развития ЦБК, но и формировать интерес к работе на комбинате у подрастающего поколения и молодежи. Кроме того, ведется активное сотрудничество с местной школой и «Политехническим колледжем» г. Светогорска, а также профильными высшими учебными заведениями. Ежегодно привлекаются выпускники высших и средних учебных заведений, которым наставники из Светогорского ЦБК помогают погрузиться в профессиональную жизнь крупной производственной компании.

Студенты учебных заведений могут пройти практику и стажировку в профильных департаментах. В компании успешно реализуются программы целевого обучения для студентов колледжей и вузов, а также работает программа привлечения молодых талантов «ВЗЛЁТ».



Оригинальное теоретическое исследование  
УДК 676.056.521.1  
DOI 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_96-101

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССЕ КОНТАКТНО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ КАРТОНА

Екатерина Николаевна Громова

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

© Громова Е. Н., 2026

*e-mail: gromova.gturp@mail.ru*

## АННОТАЦИЯ

Сушка капиллярно-пористых коллоидных материалов, таких как бумага и картон, представляет собой сложный тепломассообменный процесс. Неоправданная интенсификация этого процесса может привести к ухудшению качества конечной продукции (короблению, расслаиванию) из-за развития чрезмерных внутренних напряжений, вызванных неравномерным распределением влаги и температуры по толщине материала. Целью данной работы является разработка упрощенной критериальной модели для расчета поля влагосодержания в процессе сушки плоских материалов с учетом влияния градиента температуры, который создает дополнительное сопротивление переносу влаги. В основе исследования лежит модификация дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с учетом эффекта термовлагопроводности. Путем аппроксимации профилей температуры и влагосодержания параболическими функциями автор выводит критериальную зависимость, вводя эффективный коэффициент теплопроводности, учитывающий термоградиентный эффект. Экспериментальные исследования контактно-конвективной сушки картона при различных температурных режимах подтвердили асимметричность полей температуры и влагосодержания. Полученные кинетические кривые сушки и данные по изменению критерия Фурье были использованы для верификации предложенной модели. На их основе выведено рабочее уравнение для практического расчета перепада влагосодержания в переплетном картоне. Разработанная математическая модель предоставляет инструмент для оптимизации режимов сушки целлюлозно-бумажных материалов. Она позволяет количественно оценить влияние градиента температуры на влагоперенос и обоснованно выбирать технологические параметры для минимизации внутренних напряжений и предотвращения дефектов, что в конечном итоге способствует повышению качества продукции и энергоэффективности производства.

**Ключевые слова:** сушка картона, тепломассоперенос, теория подобия, контактно-конвективная сушка, кинетика сушки

**Для цитирования:** Громова Е. Н. Исследование тепломассопереноса в процессе контактно-конвективной сушки картона // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 96–101. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_96-101

## STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PROCESS OF CONTACT-CONVECTIVE DRYING OF CARDBOARD

Ekaterina Nikolaevna Gromova

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

*e-mail: gromova.gturp@mail.ru*

## ABSTRACT

Drying of capillary-porous colloidal materials, such as paper and cardboard, is a complex coupled heat and mass transfer process. Unwarranted intensification of this process can lead to a deterioration in the quality of the final



product (warping, delamination) due to the development of excessive internal stresses caused by uneven distribution of moisture and temperature throughout the thickness of the material. The aim of this work is to develop a simplified criterion-based model for calculating the moisture content field during the drying of flat materials, taking into account the influence of the temperature gradient, which creates additional resistance to moisture transfer. The study is based on a modification of the differential equation for unsteady moisture conduction, taking into account the effect of thermogradient mass transfer. A criterion-based relationship is derived by approximating the temperature and moisture content profiles with parabolic functions, introducing an effective moisture conductivity coefficient that accounts for the thermal gradient effect. Experimental studies of contact-convective drying of cardboard under various temperature conditions confirmed the asymmetry of the temperature and moisture content fields. The obtained kinetic drying curves and data on the change in the Fourier criterion were used to verify the proposed model. Based on this data, a working equation was derived for the practical calculation of the moisture content difference in book board. The developed mathematical model provides a valuable tool for optimizing drying schedule for cellulosic materials. The model allows for quantifying the influence of the temperature gradient on moisture transfer and for rationally selecting process parameters to minimize internal stresses and prevent defects. Ultimately, this contributes to improved product quality and enhanced energy efficiency of the production process.

**Keywords:** cardboard drying, heat and mass transfer, similarity theory, contact-convective drying, drying kinetics

**For citation:** Gromova E. N. (2026) Study of heat and mass transfer in the process of contact-convective drying of cardboard, Technology and Energy, vol. 1, no. 1, pp. 96–101. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_96-101

## ВВЕДЕНИЕ

Сушка капиллярно-пористых коллоидных материалов является не только теплофизическим, но и технологическим процессом, при протекании которого изменяются физико-механические свойства материала. Так, неоправданная интенсификация процесса сушки приводит к ухудшению качественных показателей материала (коробление, расслаивание и т. д.). Причина ухудшения свойств готового изделия — развитие объемно-напряженного состояния влажного тела высушиваемого материала свыше предельно допустимого, обусловленного реологическими свойствами материала [1, 2]. Основной источник возникновения такого состояния — неравномерное распределение влагосодержания и температуры по толщине

не бумажного полотна. Поэтому для оптимизации процесса сушки необходимо знать перепады влагосодержания в центре материала и на его поверхности и разность температур по толщине материала ( $t_n - t_u$ ).

Нестационарное поле влагосодержания при сушке бумаги и картона описывается уравнением влагопроводности, а поле температуры — уравнением теплопроводности. Их аналитическое решение представляет значительные трудности. Поэтому цель данной работы — найти упрощенную критериальную зависимость для расчета поля влагосодержания в процессе сушки плоских материалов при наличии градиента температуры.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно [3]–[5], что градиент температуры оказывает дополнительное сопротивление переносу влаги от центральных слоев материала к поверхности. Поэтому при наличии градиента температуры  $\partial t / \partial x$  перепад влагосодержания ( $u_u - u_n$ ) больше, чем в случае, когда градиент температуры отсутствует.

Запишем дифференциальное уравнение нестационарной влагопроводности с учетом термовлагопроводности для одномерной задачи при условии, что градиент давления отсутствует ( $\partial p / \partial x = 0$ ):

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \delta_t \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right); \quad (1)$$

где  $\alpha_m$  — коэффициент массопроводности материала;  $\delta_t$  — термоградиентный коэффициент;

$\tau$  — длительность сушки;  
 $x$  — координата.

Аппроксимируем распределение температуры и влагосодержания по толщине тела:

$$u(x) = u_u - \frac{x^2}{R^2} (u_u - u_n); \quad (2)$$

$$t(x) = t_u - \frac{x^2}{R^2} (t_u - t_n). \quad (3)$$

Здесь  $u_u$  и  $t_u$  — влагосодержание и температура в центре материала;

$u_n$ ,  $t_n$  — влагосодержание и температура на поверхности материала;

$R$  — толщина материала.

Дифференцируя уравнения (2) и (3), получим:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{2}{R}(u_u - u_n); \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = -\frac{2}{R}(t_u - t_n). \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{(t_u - t_n)}{(u_u - u_n)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (6)$$

подставляя (6) в уравнение (1) получим

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \delta_i \frac{(t_u - t_n)}{(u_u - u_n)} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

или

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \alpha_m (1 - Pn) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (8)$$

где  $Pn = \delta_i \frac{(t_u - t_n)}{(u_u - u_n)}$  — критерий Поснова, определяемый

как относительный перепад влагосодержания тела, вызванный разностью температур.

Введем понятие эффективного коэффициента теплопроводности  $\widetilde{\alpha}_m$ , учитывающего наличие коэффициента  $\delta_i$ :

$$\widetilde{\alpha}_m = \alpha_m (1 - Pn), \quad (9)$$

тогда уравнение (1) принимает более простую форму:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \widetilde{\alpha}_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad (10)$$

равенство (10) можно записать в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = 2\widetilde{\alpha}_m \frac{u_u - u_n}{R^2}, \quad (11)$$

что позволяет определить перепад между центральным и поверхностным слоями непосредственно из кривой сушки, зная коэффициент  $\widetilde{\alpha}_m$ .

Выражение (10) можно представить также в критериальной форме

$$\frac{Ki}{2(1 - Pn)} = \frac{u_u - u_n}{u_0 - u_p}. \quad (12)$$

Здесь  $Ki = \frac{j_m R}{\alpha_m u_0 \rho_0}$  — критерий Кирпичева для периода

постоянной скорости сушки; для второго периода кри-

терий Кирпичева будет равен:  $Ki = \frac{R^2 \partial u}{\alpha_m u_0 \partial \tau}$ .

Для периода постоянной скорости сушки, когда

$\frac{\partial u}{\partial \tau} = const$ , можно записать следующую критериальную

зависимость:

$$\frac{u_0 - u_{(\tau)}}{u_0 - u_p} = \frac{\widetilde{Fo}_m Ki}{1 - Pn} \quad (13)$$

или

$$\frac{u_0 - u_{(\tau)}}{u_u - u_n} = 2\widetilde{Fo}_m, \quad (14)$$

где  $\widetilde{Fo}_m = \frac{\widetilde{\alpha}_m \tau}{R^2}$  — эффективный массообменный крите-

рий Фурье.

Уравнение (10) можно представить в критериальной форме и для второго периода сушки, используя предложенную А. В. Лыковым линейную зависимость [6]

скорости сушки  $\frac{\partial u}{\partial \tau}$  во втором периоде от среднего

влагосодержания:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -N \frac{u - u_p}{u_k - u_p}. \quad (15)$$

Такую же зависимость получим, если используем степенное выражение, предложенное П. А. Жучковым [7] для описания второго периода сушки при показателе  $n$ , близком к единице. Подставив (15) в (11), найдем:

$$\frac{u_u - u_n}{u_{(\tau)} - u_p} = \frac{N_\tau}{2(u_k - u_p) \widetilde{Fo}_m}. \quad (16)$$

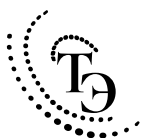
Величина  $N$  в уравнении (16) соответствует данному влагосодержанию  $u_{(\tau)}$  и является величиной постоянной при любом режиме сушки [8, 9].

Следовательно, с помощью формулы (16) можно рассчитать влагосодержание в центре и на поверхности материала при любых значениях текущего влагосодержания.

Опыты по определению полей влагосодержания при контактно-конвективной сушке проводились на кафедре промышленной теплоэнергетики в условиях, приближенных к производственным. Картон высушивали при температуре цилиндров от 90 до 150 °С. В процессе эксперимента замеряли температуру центрального и периферийного слоев образца картона, а также среднее и послойное влагосодержание материала.

На рисунке 1 представлено изменение температуры центрального и периферийного слоев переплетного картона в циклах различных периодов сушки.

Из диаграммы следует, что при контактно-конвективной сушке в течение всего процесса температура в слоях материала непрерывно изменяется: во время соприкосновения с греющей поверхностью температура во всех слоях возрастает. При этом максимальную температуру приобретает контактный слой. На конвективном



участке температура во всех слоях снижается, причем максимальная скорость охлаждения характерна для периферийных слоев. В конце второго периода сушки средняя температура периферийных слоев начинает превышать среднюю температуру контактного слоя. Это обусловлено тем, что на участке свободного хода происходит более глубокое охлаждение периферийных слоев, то есть центральный слой аккумулирует теплоту и не успевает остыть.

Средняя за цикл температура в центре и на поверхности образца определялась методом графического интегрирования:

$$\bar{t} = \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau_u} t d\tau. \quad (17)$$

Образец высушивался в течение определенного времени при заданном режиме, после чего взвешивался. Затем образец расслаивался на элементарные слои, которые снова взвешивались и досушивались до абсолютно сухой массы в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С. Влажность элементарного слоя определялась по уравнению:

$$u = \frac{M_{вл} - M_{сух}}{M_{сух}}, \quad (18)$$

где  $M_{вл}$  и  $M_{сух}$  — масса слоя образца во влажном и абсолютно сухом состоянии.

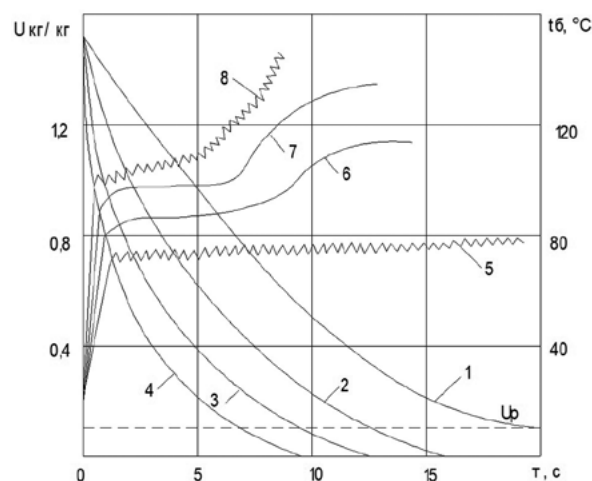
Влажность в центре и на поверхности образца определялась по известной методике [9]–[11].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали проведенные исследования, распределение влажности и температуры в процессе односторонней контактной сушки несимметрично в связи с тем, что одна из поверхностей материала находится в соприкосновении с греющей поверхностью, а противоположная — с окружающим воздухом. Градиент температуры возрастает в направлении свободной поверхности материала.

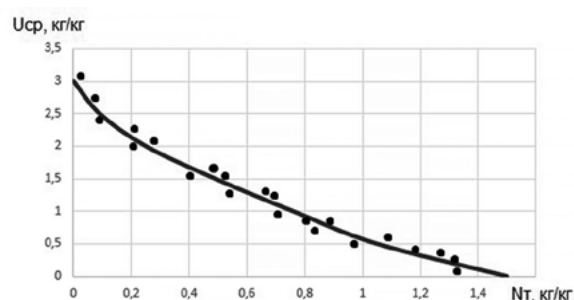
При сушке картона на многоступенчатых установках, при некотором допущении для приближенного метода расчета, зависимости  $u=f(x)$  и  $t=f(x)$  можно аппроксимировать в виде параболы и для обработки экспериментальных данных применить предложенные выше критериальные уравнения.

На рисунке 2 представлена обобщенная кинетическая кривая сушки переплетного картона контактным способом, а на рисунке 3 — график изменения критерия Фурье  $\overline{Fo}_m$  в процессе контактной сушки. Графики построены на основании полученных экспериментальных данных.

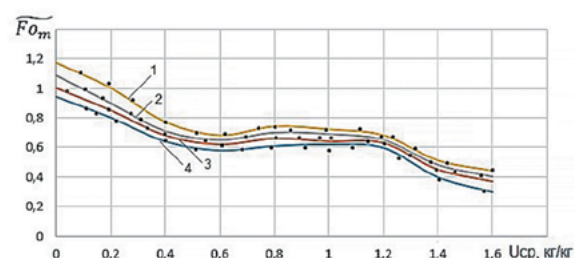


**Рисунок 1.** Кинетические кривые и термограммы контактно-конвективной сушки картона: 1, 2, 3, 4 — кривые влагосодержаний; 5, 6, 7, 8 — кривые температур. Режимы сушки: 1 и 5 —  $t_{rp}=80$  °С; 2 и 6 —  $t_{rp}=110$  °С; 3 и 7 —  $t_{rp}=140$  °С; 4 и 8 —  $t_{rp}=170$  °С

**Figure 1.** Kinetic curves and thermograms of contact-convection drying of cardboard: 1, 2, 3, 4 — moisture content curves; 5, 6, 7, 8 — temperature curves. Drying schedule with various heating surface temperature  $t_{hs}$ : 1 и 5 —  $t_{hs}=80$  °С; 2 и 6 —  $t_{hs}=110$  °С; 3 и 7 —  $t_{hs}=140$  °С; 4 и 8 —  $t_{hs}=170$  °С



**Рисунок 2.** Кинетическая кривая сушки переплетного картона  
**Figure 2.** Kinetic drying curve of book board



**Рисунок 3.** Изменения критерия Фурье в процессе контактной сушки: 1 —  $t_{rp}=90$  °С; 2 —  $t_{rp}=110$  °С; 3 —  $t_{rp}=130$  °С; 4 —  $t_{rp}=150$  °С  
**Figure 3.** Changes in the Fourier criterion during contact drying: 1 —  $t_{rp}=90$  °С; 2 —  $t_{rp}=110$  °С; 3 —  $t_{rp}=130$  °С; 4 —  $t_{rp}=150$  °С

Для переплетного картона формулу (16) можно записать в виде:

$$u_u - u_n = \frac{N_{(t)}}{2,4} \cdot \frac{u_{(t)}}{Fo_m}. \quad (19)$$

Зная текущее влагосодержание  $u_{(t)}$ , с помощью графиков (рисунки 2 и 3) можно определить величины  $N_{(t)}$  и  $Fo_m$  и по формуле (18) рассчитать перепад влагосодержаний  $\Delta u = u_u - u_n$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученного уравнения (16) представляется возможным рассчитать перепады влагосодержания по толщине картона при наличии в материале градиента температуры, что необходимо при выборе режимов контактной сушки влажных целлюлозно-бумажных материалов. Таким образом, разработанная математическая модель позволяет количественно оценить влияние температурного поля на процесс влагопереноса. Это открывает возможность для оптимизации технологических параметров сушки (таких как температура нагревательной поверхности, продолжительность цикла и давление прижима), направленной на минимизацию внутренних напряжений и предотвращение дефектов (расслоения, коробления) за счет выравнивания влажностного профиля [12]. В конечном итоге, использование уравнения (16) способствует созданию энергоэффективных и высококачественных процессов сушки в целлюлозно-бумажном производстве.

## Список литературы

1. Chen X., Zheng Q., Dong Y. (2021). Theoretical Estimation of Evaporation Heat in Paper Drying Process Based on Drying Curve. *Processes*, 9 (7), p. 1117. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9071117>.
2. Stenström S. (2019). Drying of paper: A review 2000–2018. *Drying Technology*, 38 (7), pp. 825–845. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1596949>.
3. Бойков Л. М. Энергосбережение и ускорение сушки бумаги и картона / Л. М. Бойков. СПб.: ВШТЭ ГУПТД, 2018. 279 с.
4. Прохоров Д. А., Дубовый В. К. Влияние температур сушки на свойства бумаги из сульфатной небеленой хвойной целлюлозы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 242. С. 232–241. DOI 10.21266/2079–4304.2023.242.232–241.
5. Прохоров Д. А., Дубовый В. К. Исследование влияния температурных режимов сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 3 (393). С. 173–184. DOI 10.37482/0536-1036-2023-3-173-184.
6. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
7. Громова Е. Н. Тепломассообмен на участках свободного хода при сушке бумаги на многоцилиндровых

контактно-конвективных установках / Е. Н. Громова, В. Ю. Лакомкин, А. Г. Николаева // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 6. С. 2636–2640.

8. Ольшанский А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 156–168. DOI 10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168.
9. Громыко И. Г. Влияние влагосодержания бумаги на ее структурные свойства / И. Г. Громыко, А. Н. Кудряшова, Х. А. Бабаханова // Труды БГТУ. Серия 4: Принт-и медиатехнологии. 2025. № 1 (291). С. 12–18. DOI 10.52065/2520-6729-2025-291-2.
10. Sampath K., Reynolds L., Huang H., Ramaswamy S. (2024). Experimental analysis of conductive drying of paper and board. *Drying Technology*, 42 (11), pp. 1709–1729. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2385809>.
11. Yan Y., Wang W., Pan Z., Yang Z., Li J., Yao Z., Qi Y. (2025) Drying characteristics and numerical simulation of tissue paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, Vol. 40 (Issue 2), pp. 345–356. <https://doi.org/10.1515/npprj-2025-0010>
12. Луканин П. В. Концепция модернизации энерготехнологических комплексов в ЦБП / П. В. Луканин, В. Г. Казаков, Л. О. Зверев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 4. С. 178–191. DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191.

## References

1. Chen, X., Zheng, Q. and Dong, Y. (2021). Theoretical Estimation of Evaporation Heat in Paper Drying Process Based on Drying Curve. *Processes*, 9 (7), p. 1117. <https://doi.org/10.3390/pr9071117>.
2. Stenström, S. (2019). Drying of paper: A review 2000–2018. *Drying Technology*, 38 (7), pp. 825–845. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1596949>.
3. Boikov, L. M. Energy saving and acceleration of drying of paper and cardboard. St. Petersburg, VSHTÉ GUPTD, 2018, 279 p.
4. Prokhorov, D. A., Dubovy, V. K. (2023) Influence of drying temperatures on the properties of paper from sulfate unbleached coniferous pulp. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*, 242, pp. 232–241. <https://doi.org/10.21266/2079–4304.2023.242.232–241>.
5. Prokhorov, D. A., Dubovy, V. K. (2023) Investigation of the influence of temperature drying conditions on the properties of paper from sulphated bleached coniferous and deciduous cellulose. *News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 3 (393), pp. 173–184. doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-173-184>.
6. Lykov A. V. Theory of drying. Moscow: Energy, 1968, 472 p.
7. Gromova, E. N., Lakomkin, V. Y., Nikolaeva, A. G. (2019) Heat and mass transfer in freewheeling areas during paper drying on multi-cylinder contact-convective installations.



- Engineering and Physics Journal*, vol. 92, no. 6, pp. 2636–2640. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02078-3>.
8. Olshansky, A. I., Zhernosek, S. V., Gusarov, A. M. (2022) Investigation of heat and mass transfer in the processes of heat treatment and drying of thermal insulation materials. *Power Engineering. Proceedings of Higher Educational institutions and Energy associations of the CIS*, vol. 65, no. 2, pp. 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168>.
  9. Gromyko, I. G., Kudryashova, A. N., Babakhanova, H. A. (2025) The influence of moisture content of paper on its structural properties. *Proceedings of BSTU. Series 4: Print and media technologies*, 1 (291), pp. 12–18. <https://doi.org/10.52065/2520-6729-2025-291-2>.
  10. Sampath, K., Reynolds, L., Huang, H. and Ramaswamy, S. (2024). Experimental analysis of conductive drying of paper and board. *Drying Technology*, 42 (11), pp. 1709–1729. <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2385809>.
  11. Yan, Y., Wang, W., Pan, Z., Yang, Z., Li, J., Yao, Z. and Qi, Y. (2025) Drying characteristics and numerical simulation of tissue paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, vol. 40 (Issue 2), pp. 345–356. <https://doi.org/10.1515/npprj-2025-0010>
  12. Lukanin P. V., Kazakov V. G., Zverev L. O. (2022) The concept of modernization of energy technology complexes in the pulp and paper industry. *News of higher educational institutions. Energy problems*, vol. 24, no. 4, pp. 178–191. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-178-191>.

### ■ Информация об авторе

**Громова Екатерина Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета

промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, Россия; SPIN-код: 7964–6782, AuthorID: 940225, ORCID 0009-0001-6506-5118, email: [gromova.gturp@mail.ru](mailto:gromova.gturp@mail.ru).

### ■ Information about the author

**Ekaterina Nikolaevna Gromova**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Thermal Power Engineering Productions of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University

of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN-code: 7964–6782, AuthorID: 940225, ORCID 0009-0001-6506-5118, email: [gromova.gturp@mail.ru](mailto:gromova.gturp@mail.ru).



# РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ СКОЛЬЗЯЩИЕ ОПОРЫ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Олег Александрович Борткевич<sup>1</sup>, Владимир Германович Злобин<sup>2</sup>,  
Валерий Викторович Пеленко<sup>2</sup>, Владимир Геннадьевич Екимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «ПромЭС», г. Кострома

<sup>2</sup> Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета  
промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> АНО «Промбезопасность — Северо-Запад», Санкт-Петербург

© Борткевич О. А., Злобин В. Г., Пеленко В. В., Екимов В. Г., 2026

Автор-корреспондент: О. А. Борткевич, e-mail: mail@pipelinesystems.ru

## АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается альтернативный тепловизионному метод учета тепловых потерь, основанный на расчете стационарного теплового потока от трубопровода через корпус опоры. Целью исследования определено выявление влияния типа конструкции опор трубопроводов тепловых сетей на тепловые потери через скользящие опоры. Задачами являются количественная оценка численными методами и сравнительный анализ тепловых потерь в случае подопорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой. Предметом исследования является процесс теплообмена между поверхностью скользящей опоры и подопорной конструкцией. В качестве объектов исследования рассмотрено два варианта размещения опоры: в первом варианте моделируется металлическая траверса, во втором варианте — железобетонная. Расчет проведен для конкретных объектов, а именно для скользящих опор трубопровода Ду 700 мм в случае подопорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой. Методы исследования базируются на использовании теоретических подходов: вычислительная математика, численный анализ. Для проведения расчетов стационарного теплового потока через корпус опоры трубопровода использована программа ЗЕНИТ-95. Результаты численного эксперимента показали, что при использовании железобетонных траверс стоек опор тепловые потери через поверхность скользящей опоры на 69 % меньше, чем при использовании металлической траверсы. Расчеты проведены для граничных условий четвертого рода на поверхности контакта. Тепловые потери составили  $Q = 440$  Вт при средней температуре поверхности скользящей опоры трубопровода Ду 700 мм  $+50$  °С для металлической траверсы; тепловые потери составили  $Q = 135$  Вт при средней температуре поверхности скользящей опоры трубопровода Ду 700 мм  $+67$  °С для железобетонной траверсы.

**Ключевые слова:** тепловая сеть, трубопровод, опоры, температурное поле, теплообмен, тепловые потери

**Для цитирования:** Борткевич О. А., Злобин В. Г., Пеленко В. В., Екимов В. Г. Расчет тепловых потерь через скользящие опоры трубопроводов тепловых сетей. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 102–110. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_102-110

## CALCULATION OF HEAT LOSS THROUGH SLIDING SUPPORTS OF HEATING NETWORK PIPELINES

Oleg Alexandrovich Bortkevich<sup>1</sup>, Vladimir Germanovich Zlobin<sup>2</sup>, Valeriy Viktorovich Pelenko<sup>2</sup>,  
Vladimir Gennadievich Ekimov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО "PromES", Kostroma city

<sup>2</sup>Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg

<sup>3</sup>ANO Prombezopasnost — Severo-Zapad, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: O. A. Bortkevich, e-mail: e-mail@pipelinesystems.ru



## ABSTRACT

This paper presents an alternative method to the thermographic method for assessing heat losses based on calculating the steady-state heat flux from the pipeline through the support structure. The aim of the study is to determine the influence of the design type of heating network pipeline supports on heat losses through slip surfaces. The research tasks are the numerical quantification and comparative analysis of heat losses for a support structure configured as a column fitted with either a metallic or a reinforced concrete traverse. The subject of the study is the heat transfer process between the slipping surface of the support and the underlying structure. As research objects, two support arrangement options are considered: the first model simulates a metal traverse, and the second — a reinforced concrete one. The analysis was carried out for specific cases: slip supports on a DN 700 mm pipeline, where the underlying structure is a column fitted with a metal or a reinforced concrete traverse. The research methods are based on theoretical approaches: computational mathematics and numerical analysis. The ZENIT-95 program was used to calculate the stationary heat flux through the pipeline support housing. The numerical experiment results demonstrated a 69% reduction in heat loss through the support's slipping surface when employing reinforced concrete traverses instead of metal ones. Calculations were performed for fourth-type boundary conditions on the contact surface. For the metal traverse, the heat loss was  $Q = 440$  W at an average sliding surface temperature of  $+50$  °C for the DN 700 mm pipeline support. For the reinforced concrete traverse, the heat loss was  $Q = 135$  W at an average sliding surface temperature of  $+67$  °C for the same pipeline.

**Keywords:** heating network, pipeline, supports, temperature field, heat exchange, heat loss

**For citation:** Bortkevich O. A., Zlobin V. G., Pelenko V. V., Ekimov V. G. (2026) Calculation of heat loss through sliding supports of heating network pipelines. *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 102–110, DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_102-110

## ВВЕДЕНИЕ

Нормативной документацией на проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [1] принято учитывать тепловые потери опор трубопроводов как местные потери, с использованием повышающего коэффициента к потерям через тепловую изоляцию. В настоящее время существует большое количество разных видов опор, тепловые потери каждой из них индивидуальны и определить их возможно только при проведении тепловизионного обследования, что является трудоемким и дорогостоящим процессом. Другим вариантом учета тепловых потерь может служить расчет стационарного теплового потока от трубопровода через тепловую изоляцию [15, 16] и корпус опоры [14]. Проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей в настоящее время производят согласно рекомендациям в работе [1]. Для выбора тепловой изоляции оборудование разделяют по следующим параметрам:

- время работы в год: до 5000 ч / более 5000 ч;
- расположение оборудования в помещении / на открытом воздухе;
- рабочая среда с положительной / отрицательной температурой;
- тип прокладки трубопровода — канальная / бесканальная и т. д.

В зависимости от перечисленных параметров и условий, а также соразмерно диаметру трубопровода

нормы плотности теплового потока (Вт/м) выбирают по таблицам 2–12 [1] и умножают на коэффициент «К». Введение этого коэффициента учитывает изменение стоимости теплоты и теплоизоляционной конструкции в зависимости от района строительства и способа прокладки трубопровода. При этом для тепловых сетей при выборе тепловой изоляции расчетную температуру принимают по таблице 15 [1].

Для определения фактических тепловых потерь теплоты необходимо проведение тепловизионного обследования существующей теплотрассы, требующее существенных финансовых расходов. Учитывая, что при проведении проектирования теоретически возможно выполнить расчет тепловых потерь каждой опоры, в том числе в зависимости от конфигурации подпорных конструкций (рисунки 7), есть смысл избежать значительных финансовых и технических затрат. Таким образом, выбранная тема исследования «Расчет тепловых потерь через скользящие опоры трубопроводов тепловых сетей» представляется актуальной. Необходимо подчеркнуть, что при выполнении подобных теоретических вычислительных расчетов не следует ограничиваться только местом контакта опоры и поверхности скольжения. В целях повышения точности результатов численного анализа при расчетах необходим учет геометрии и внешних условий строительных конструкций.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Предметом** изучения в данной работе является процесс теплообмена между поверхностью скольжения опоры и подпорной конструкцией. В качестве объектов исследования рассмотрено два варианта размещения опоры — в первом варианте моделируется металлическая траверса, во втором варианте — железобетонная траверса. Расчет проведен для конкретных объектов, а именно для скользящих опор трубопровода Ду 700 мм в случае подпорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой. **Методы** исследования базируются на использовании теоретических подходов, таких, как, формализация, математическое моделирование, вычислительная математика, численный анализ. Для проведения расчетов стационарного теплового потока через корпус опоры трубопровода использована программа ЗЕНИТ-95.

В статье исследован теплообмен между поверхностью скольжения опоры и подпорной конструкцией, который корректно осуществляется с учетом коэффициента теплопередачи в контакте металл-металл [3, 5]. При этом необходимо отметить, что характер и степень влияния влаги на процесс теплообмена зависит от свойств воды. Обессоленная вода является относительно плохим проводником теплоты, поэтому её нахождение в контактной зоне может снизить интенсивность общей теплопередачи. При наличии в воде растворённых солей, её теплопроводность может возрасти. Кроме того, так как вода может испаряться при нагревании, то это приводит к конвективному переносу теплоты, в результате которого общая теплопередача может или интенсифицироваться, или уменьшаться в зависимости от конкретных условий [6]. В связи с тем, что и корпус опоры, и поверхность скольжения покрываются антикоррозионным покрытием и окрашиваются, то вода в шероховатую поверхность контакта поступает только после истирания слоев краски [7], что может быть учтено в математической модели расчета [11]–[13]. Предлагаемый подход к теоретическому анализу процесса теплообмена посредством численного эксперимента позволяет учитывать наличие дополнительного контактного термического сопротивления, что составляет определенную новизну.

Таким образом, целью исследования определено выявление количественного влияния типа конструкции опор трубопроводов тепловых сетей на тепловые потери через скользящие опоры.

Задачами исследования являются количественная оценка температурного поля в опорной конструкции трубопровода численным методом, установление интенсивности процесса теплообмена между поверхностью скольжения

опоры и подпорными элементами, сравнительный анализ тепловых потерь в случае подпорной конструкции, представляющей стойку с металлической или железобетонной траверсой, а также формирование исходных данных для расчета.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для проведения корректных расчетов стационарного теплового потока через корпус опоры трубопровода и получения адекватных результатов использована программа ЗЕНИТ-95 — продукт научно-технического предприятия «ДИП», предназначенный для выполнения проектных и научно-исследовательских расчетов разнообразных пространственных конструкций на персональных ЭВМ методом конечных элементов, в том числе для расчета тепловых полей при стационарных и нестационарных условиях. Отличительной особенностью программы от отечественных и зарубежных аналогов является возможность решения как традиционных задач в рамках допущения о малых возмущениях, так и сложных нелинейных задач в условиях больших возмущений.

В работе рассматривается участок подпорной конструкции (траверса) длиной 2400 мм (рисунок 2). Поверхность теплообмена с колонной задана через металлические пластины 500×160 мм на траверсе в местах расположения стоек (рисунки 1, 2).

При этом приняты следующие допущения:

- температура стенки трубы принимается равной температуре теплоносителя;
- теплота от трубы к элементам конструкции передается без потерь;
- отсутствует теплообмен между боковыми сторонами корпуса опоры и внешней средой, так как часть опоры находится под тепловой изоляцией;
- все конструктивные части модели рассматриваются как единое целое, то есть рассматривается идеальный тепловой контакт между ними, когда температура двух тел, соприкасающихся друг с другом и тепловые потоки одинаковы (граничные условия четвертого рода).

Схема направления распространения теплового потока и распределения температур приведена на рисунке 5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения численного эксперимента рассмотрена скользящая опора для трубы Ду 700 мм, Серия 5.903–13 (рисунок 1). Предусмотрено три варианта высоты опоры: 185, 235 и 285 мм. Нужный вариант опоры можно подобрать на основании толщины теплоизоляционного материала. В настоящей статье рассмотрим опоры



высотой 185 мм. Опора приварная (седло) приваривается к трубе вдоль оси с двух сторон, поверхность скольжения имеет площадь  $S_{ск}=0,17 \text{ м}^2$ . При этом, часть поверхности опирается на металлическую пластину траверсы — её площадь  $S_{оп}=0,09 \text{ м}^2$ , другая часть поверхности нависает над пластиной и контактирует с воздухом — её площадь  $S_{в}=0,08 \text{ м}^2$ . Вдоль оси трубы длина опоры составляет  $L=340 \text{ мм}$ , перпендикулярно оси трубы  $B=500 \text{ мм}$ .

Подопорная конструкция может представлять стойку с металлической или железобетонной траверсой или железобетонный фундамент с пластиной скольжения на закладных деталях.

В первом варианте в качестве подопорной конструкции рассмотрим металлическую стойку ОП-102 [7] с траверсой Т6. Траверса представляет собой коробчатое сечение из двух швеллеров 20П, скрепленных между собой металлическими пластинами толщиной 7 мм, закрепляется на стойке через металлические пластины толщиной 16 мм.

Во втором варианте расчета рассматриваем железобетонную траверсу таких же геометрических размеров, как и в первом случае.

Теплота от трубы (рисунок 1) передается через торцы гнутой пластины (рисунок 2, поз. 1) на торцы обеих опорных пластин (рисунок 2, поз. 2) и воздушной прослойке между пластинами, формируя тем самым в конструкции определенное поле температур (рисунок 5).

При размещении на открытом воздухе в теплообмене корпуса опоры и окружающей среды участвует ветер, что приводит к интенсификации конвективного теплообмена с окружающей средой [8]–[10]. В таблице В.2 работы [4] приведены значения коэффициента теплоотдачи. В расчетах принимаем  $\alpha_1 = 11 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ .

Для расчета стационарного теплообмена выбираем поверхность конвективного теплообмена с окружающей средой со среднегодовой температурой  $+5 \text{ °C}$ . При этом коэффициент теплопередачи можно вычислить по методике [4]. Примем его равным  $\alpha_2 = 128 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$ , что существенно больше коэффициента  $\alpha_1$ .

Результаты расчета температурных полей в корпусе опоры для металлической и железобетонной траверсы в программе ЗЕНИТ-95 приведены на рисунках 3 и 4.

Динамика хода формирования поля температур в направлении теплопередачи приведена на рисунке 5.

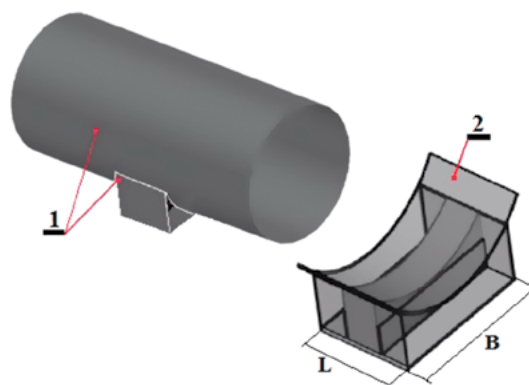


Рисунок 1. Опора трубы Ду 700 мм, Серия 5.903–13: 1 – общий вид, 2 – схема опоры

Figure 1. Pipe support Dy 700 mm, serial number 5.903–13: 1 – general view, 2 – support diagram

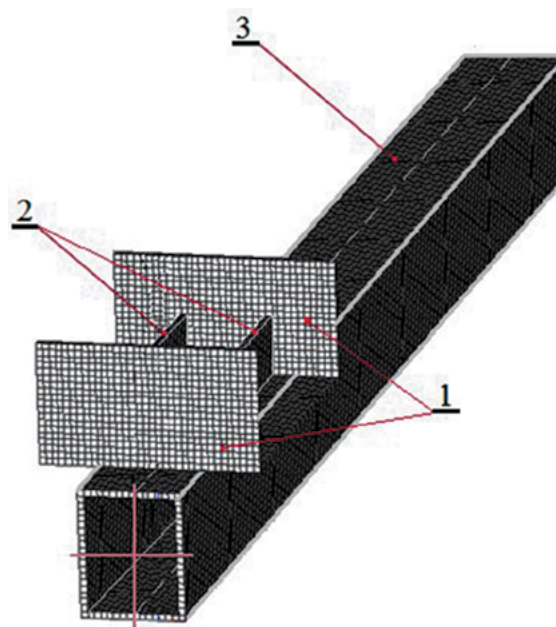
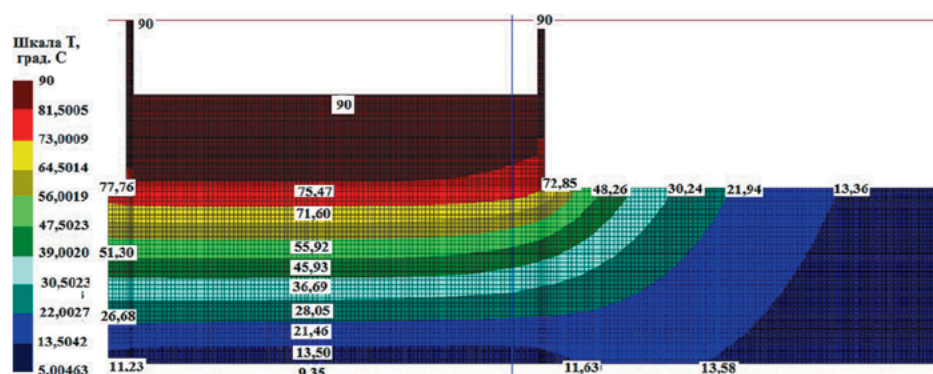


Рисунок 2. Модель опоры на траверсе: 1 – боковые пластины,  $s=8 \text{ мм}$ ; 2 – опорные пластины (2 шт.),  $s=8 \text{ мм}$ ; 3 – траверса, швеллер 20 (2 шт.)

Figure 2. Support model on a traverse: 1 – side plates,  $s=8 \text{ mm}$ ; 2 – support plates (2 pcs.),  $s=8 \text{ mm}$ ; 3 – traverse, channel 20 (2 pcs.)

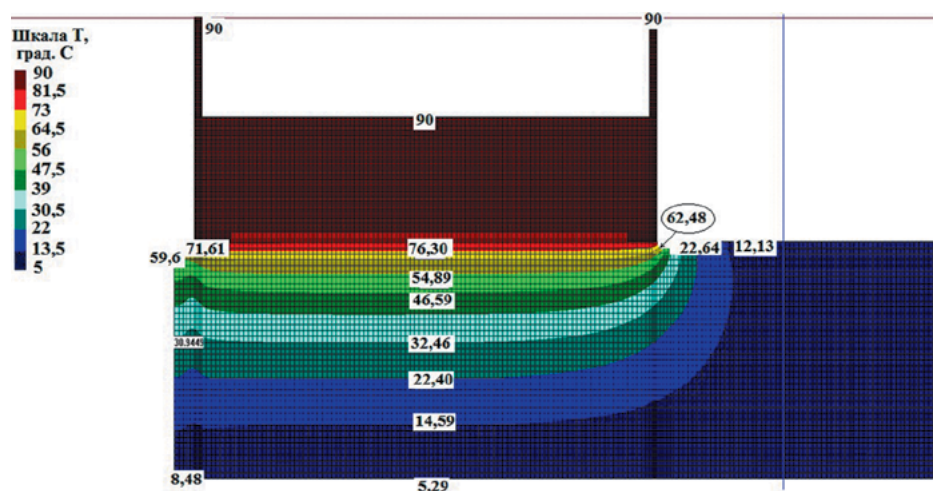
Распределение интенсивности теплового потока на поверхности скольжения опоры с железобетонной и металлической траверсой иллюстрируется цифровыми данными, приведенными на рисунке 6.

Визуализация интенсивности теплового потока через поверхность скольжения опоры при использовании различных материалов траверс приведена также на рисунках 6а и 6б. Количественные результаты численного расчета тепловых потерь приведены в таблице 1.



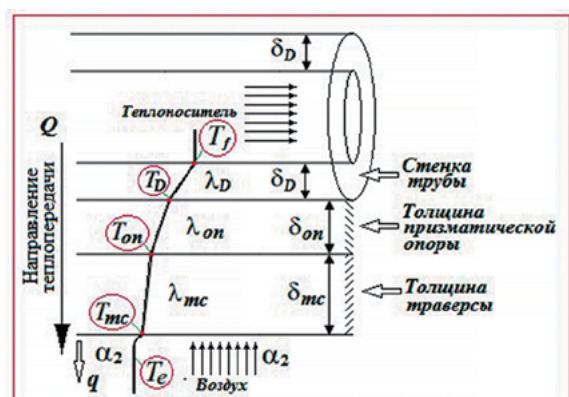
**Рисунок 3.** Температурное поле в корпусе опоры и металлической траверсе. Температура теплоносителя +90 °С, температура окружающей среды +5 °С

**Figure 3.** Temperature pattern in support housing and metal traverse. Heat carrier medium temperature +90 °С, environmental temperature +5 °С



**Рисунок 4.** Температурное поле в корпусе опоры и железобетонной траверсе. Температура теплоносителя +90 °С, температура окружающей среды +5 °С

**Figure 4.** Temperature pattern in support housing and reinforced concrete traverse. Heat carrier medium temperature +90 °С, environmental temperature +5 °С



**Рисунок 5.** Динамика распределения поля температур в направлении теплопередачи

**Figure 5.** Dynamics of the temperature field distribution in the direction of heat transfer

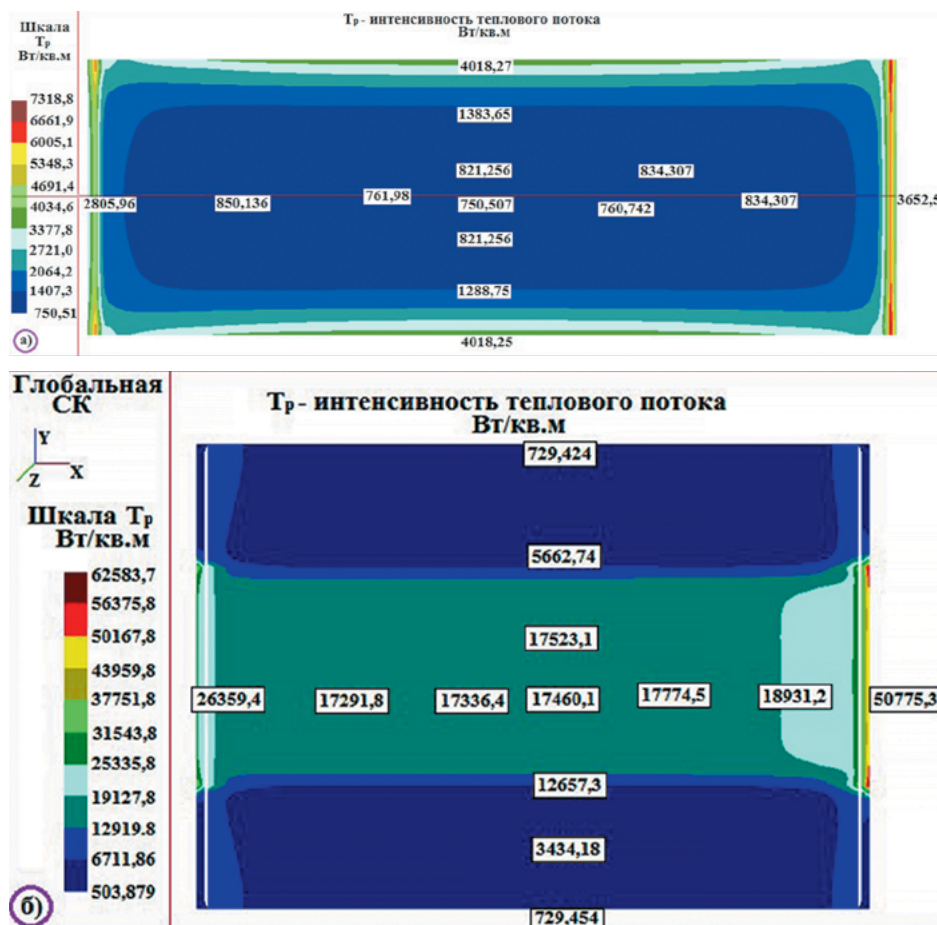
**Таблица 1.** Результаты расчета тепловых потерь через опоры трубопровода в зависимости от материала опорной траверсы

**Table 1.** Results of calculating thermal losses through pipeline supports depending on the material of the support traverse

| Материал траверсы | Суммарные потери, Qоп, Вт | Средняя температура на поверхности контакта, °С |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| Металл Ст3пс      | 440                       | 50                                              |
| Железобетон В20   | 135                       | 67                                              |

Тепловые потери опоры на поверхности определены по результатам расчета как произведение средней интенсивности теплового потока через поверхность скольжения и величины площади поверхности скольжения.

Расчеты проведены для граничных условий четвертого рода на поверхности контакта при следующих условиях:



**Рисунок 6.** Распределение интенсивности теплового потока ( $W/m^2$ ): а) на поверхности скольжения опоры с железобетонной траверсой; б) на поверхности скольжения опоры с металлической траверсой

**Figure 6.** Heat flux intensity distribution ( $W/m^2$ ): а) on the slipping surface of the support with reinforced concrete traverse; б) on the slipping surface of the support with metal traverse

— средняя температура поверхности скольжения опоры трубопровода Ду 700 мм при использовании металлической траверсы составила  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тепловые потери при этом составили величину  $Q=440\text{ Вт}$ ;

— средняя температура поверхности скольжения опоры трубопровода Ду 700 мм при использовании железобетонной траверсы составила  $+67\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тепловые потери составили  $Q=135\text{ Вт}$ .

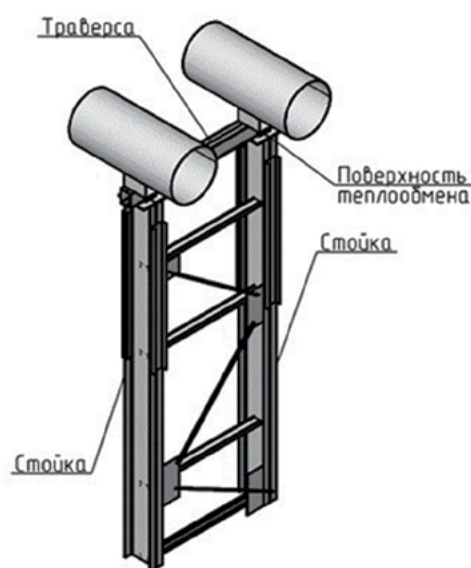
Аналогично расчетам [6], исходя из коэффициента местных потерь [1], расчетные тепловые потери на трубу с опорой при температуре рабочей среды  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  для трубопровода Ду 700 мм составят нижеследующие значения. При этом расчет ведем, исходя из размера опоры вдоль оси трубы  $L=340\text{ мм}$  — под эту величину приведем нормативные потери трубы Ду 700 мм. По нормам плотности теплового потока трубопроводов при расположении на открытом воздухе и числе часов

работы более 5000 (таблица 2 [1],  $Q_n=170\text{ Вт}$ ) тепловые потери составят:

$$Q'_n = Q_n \cdot K_n = 170 \cdot 1,3 = 221\text{ Вт} \quad (1)$$

Здесь  $K_n=1,3$  — коэффициент, учитывающий дополнительные тепловые потери через опоры и арматуру.

Таким образом, тепловые потери трубы с учетом местных тепловых потерь на металлической траверсе, рисунок 6б, превышают нормативные значения ( $Q_{on}=440\text{ Вт}$  больше, чем  $Q'_n=221\text{ Вт}$ ), тепловые потери метра трубы с учетом местных тепловых потерь на железобетонной траверсе, рисунок 6а, не превышают нормативные значения ( $Q_{on}=135\text{ Вт}$  меньше, чем  $Q'_n=221\text{ Вт}$ ). В целях повышения энергоэффективности наружных тепловых сетей рекомендуется применять в качестве траверс отдельно стоящих опор железобетонные изделия, толщину изоляции следует выбирать исходя из расчетных потерь тепла. На рисунке 7 приведен пример одного из вариантов конструкции такой опоры.



**Рисунок 7.** Опора ОП-102 как один из вариантов конфигурации подопорных конструкций

**Figure 7.** OP-102 support as one of its underlying structure configuration options

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат численного эксперимента показал, что при использовании железобетонных траверс стоек опор тепловые потери через поверхность скольжения опоры на 69 % меньше, чем при использовании металлической траверсы:

$$\varphi = \frac{135 - 440}{440} \cdot 100\% = -69\%.$$

Доказана целесообразность использования железобетонных траверс.

Для расчета тепловых потерь через опоры трубопровода следует проводить вычисления с учетом геометрических характеристик и применяемых материалов подопорных конструкций, а также условия контакта соприкасающихся поверхностей и внешней среды.

### Список литературы

- СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов». М., 2012.
- СНиП 2.01.07–85 (2003) Нагрузки и воздействия.
- Василевич Ю. В., Мойсейчик А. Е., Мойсейчик Е. А., Яковлев А. А. Анализ напряженно-деформированного состояния и температурного поля деформируемого растяжением образца // Теоретическая и прикладная механика. 2023. Вып. 38. С. 61–71.

- Геренштейн А. В., Машрабов Н., Королькова Л. И., Геренштейн Е. А. Дифференциально-разностный метод для третьей смешанной задачи одномерной теплопроводности с непостоянными коэффициентами // Актуальные вопросы агроинженерных наук в сфере технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности: теория и практика: материалы национальной научной конференции Института агроинженерии. / Под редакцией С. А. Гриценко. 2020. С. 82–91.
- Губарева К. В., Попов А. И., Зинина С. А., Шульга А. С., Чуянов Д. О. Моделирование процесса теплообмена в пластине с переменными теплофизическими свойствами // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 6. С. 52–57.
- Канарейкин А. И. Процесс стационарной теплопроводности в стержне при наличии внешнего теплообмена // Chronos. 2022. Т. 7. № 4 (66). С. 60–62.
- Канарейкин А. И. Особенность изменения поведения температурного поля в твэлах при переходе от цилиндрического к эллиптическому сечению при граничных условиях первого рода // Научные известия. 2022. № 29. С. 174–177.
- Канарейкин А. И. Теплообмен между нагревательным элементом цилиндрической формы и его оболочкой при граничных условиях четвертого рода. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 3. С. 68–73. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-68-73.
- Канарейкин А. И. Стационарное температурное поле в прямоугольной пластине с переменной теплопроводностью по одной координате. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 99–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-99-104.
- Мойсейчик А. Е., Яковлев А. А. Расчет температуры поверхности и напряженно-деформированного состояния упруго-пластических тел из стали при их нагружении // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественнонаучных и технических дисциплин: сб. докл. Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, посвящ. 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова. БГТУ им. В. Г. Шухова; Белгород, 16–17 мая 2023. Ч. 20. С. 218–224. URL: [https://www.bstu.ru/research/graduation\\_candidacy/otdel\\_oonirs/conf](https://www.bstu.ru/research/graduation_candidacy/otdel_oonirs/conf) (дата доступа: 28.06.2024).
- Мойсейчик Е. А., Мойсейчик А. Е., Яковлев А. А. Визуализация кинетики пластических деформаций в стальных изделиях по инфракрасному излучению / Е. А. Мойсейчик, // Механика машин, механизмов и материалов. 2024. № 3 (68). С. 78–87; а также Мойсейчик, Е. А. Выявление опасных состояний и контроль разрушения в стальных растянутых элементах тепловым // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2023. № 2 (48). С. 22–29.
- Соболев И. С., Бранфилова А. Н. Численное исследование характеристик изоляционного материала трубопроводов // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов конференции. 2020. С. 212–215.



13. Яковлев А. А., Мойсейчик Е. А., Мойсейчик А. Е. Стальная трехслойная ортотропная плита и ее работа при квазистатическом нагружении // Теоретическая и прикладная механика. 2023. Вып. 38. С. 201–206.
14. Chen K. H., Kao J. H., Chen J. H. A new error estimation technique for solving torsion bar problem with inclusion by using BEM // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2020. Vol. 115. Pp. 168–211.
15. Dumont N. A. Complex-variable, high-precision formulation of the consistent boundary element method for 2D potential and elasticity problems // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023. Vol. 152. Pp. 552–574.
16. Hachem E. et al. Deep reinforcement learning for the control of conjugate heat transfer // Journal of Computational Physics. 2021. Vol. 436. P. 110317.
17. Zanolì S. M., Pepe C., Astolfi G., Moscoloni E. Analysis and modeling of steel industry reheating furnace billets temperature. // 2022. 23-rd International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2022. Pp. 337–342.

## References

1. SP 61.13330.2012 “Thermal Insulation of Equipment and Pipelines”, Moscow: 2012.
2. SNiP 2.01.07–85 (2003) Loads and Impacts.
3. Vasilevich Yu. V., Moiseychik A. E., Moiseychik E. A., Yakovlev A. A. Analysis of the Stress-Strain State and Temperature Field of a Specimen Deformed by Tension // Theoretical and Applied Mechanics. 2023. Issue 38. Pp. 61–71.
4. Gerenshtein A. V., Mashrabov N., Korolkova L. I., Gerenshtein E. A. Differential-Difference Method for the Third Mixed Problem of One-Dimensional Heat Conduction with Non-Constant Coefficients. In the collection: Current issues of agricultural engineering in the field of technical service of machines, equipment and life safety: theory and practice. Proceedings of the national scientific conference of the Institute of agricultural engineering. Edited by S. A. Gritsenko. 2020. Pp. 82–91.
5. Gubareva K. V., Popov A. I., Zinina S. A., Shulga A. S., Chuyanov D. O. Modeling of the heat transfer process in a plate with variable thermophysical properties // Scientific Review. Technical sciences. 2020. No. 6. Pp. 52–57.
6. Kanareikin A. I. The process of steady-state heat conduction in a rod in the presence of external heat transfer // Chronos. 2022. Vol. 7. No. 4 (66). Pp. 60–62.
7. Kanareikin A. I. Peculiarity of Change in Temperature Field Behavior in Fuel Elements upon Transition from Cylindrical to Elliptical Cross-Section under Boundary Conditions of the First Kind // Scientific News. 2022. No. 29. Pp. 174–177.
8. Kanareikin A. I. Heat Transfer between a Cylindrical Heating Element and Its Shell under Boundary Conditions of the Fourth Kind // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2023. No. 3. Pp. 68–73. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-68-73.
9. Kanareikin A. I. Stationary temperature field in a rectangular plate with variable thermal conductivity along one coordinate. // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2023. No. 1. Pp. 99–104. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-99-104.
10. Moiseychik A. E., Yakovlev A. A. Calculation of surface temperature and stress-strain state of elastic-plastic steel bodies under loading // Fundamental and applied research in the field of natural sciences and engineering disciplines: collection of reports. Int. scientific and technical. conf. of young scientists, dedicated to the 170th anniversary of V. G. Shukhov's birthday [Electronic resource] / BSTU named after V. G. Shukhov; Belgorod, May 16–17, 2023. Part 20. Pp. 218–224. Access mode: [https://www.bstu.ru/research/graduation\\_candidacy/-otdel\\_oonirs/conf](https://www.bstu.ru/research/graduation_candidacy/-otdel_oonirs/conf). Access date: June 28, 2024.
11. Moiseychik E. A., Moiseychik A. E., Yakovlev A. A. Visualization of the kinetics of plastic deformations in steel products using infrared radiation // Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2024. No. 3 (68). Pp. 78–87; also Moiseychik, E. A. Identification of hazardous conditions and fracture control in steel tension elements using the thermal method / E. A. Moiseychik, A. E. Moiseychik, A. A. Yakovlev // Bulletin of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences. 2023. No. 2 (48). Pp. 22–29.
12. Sobolev I. S., Branfileva A. N. Numerical study of the characteristics of pipeline insulating material // Science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers of the conference. 2020. Pp. 212–215.
13. Yakovlev A. A. Steel three-layer orthotropic plate and its performance under quasi-static loading / A. A. Yakovlev, E. A. Moiseychik, A. E. Moiseychik // Theoretical and Applied Mechanics. 2023. Issue. 38. Pp. 201–206.
14. Chen K. H., Kao J. H., Chen J. H. A new error estimation technique for solving torsion bar problem with inclusion by using BEM // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2020. Vol. 115. Pp. 168–211.
15. Dumont N. A. Complex-variable, high-precision formulation of the consistent boundary element method for 2D potential and elasticity problems / N. A. Dumont // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023. Vol. 152. Pp. 552–574.
16. Hachem E. et al. Deep reinforcement learning for the control of conjugate heat transfer // Journal of Computational Physics. 2021. Vol. 436. P. 110317.
17. Zanolì S. M., Pepe C., Astolfi G., Moscoloni E. Analysis and modeling of steel industry reheating furnace billets temperature. // 2022. 23-rd International Carpathian Control Conference (ICCC). IEEE, 2022. Pp. 337–342.



## ■ Информация об авторах

**Борткевич Олег Александрович**, ООО «ПромЭС», Россия, г. Кострома, Михалёвский бульвар, д. 11 а, пом. 14; e-mail: mail@pipelinesystems.ru.

**Злобин Владимир Германович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 4015-0144, Author ID: 957934; e-mail: zlobin\_v@list.ru.

**Пеленко Валерий Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 6851-4249, Author ID: 714215; e-mail: pelenko1@rambler.ru.

**Екимов Владимир Геннадьевич**, директор АНО «Промбезопасность — Северо-Запад», Россия, Санкт-Петербург, Набережная Обводного канала, 211–213; e-mail: ekimov@prom-exp.ru.

## ■ Information about the authors

**Bortkevich Oleg Alexandrovich**, LLC "PromES", 11 A, suite 14, Mikhalyovsky Boulevard, Kostroma, Russia; e-mail: mail@pipelinesystems.ru.

**Zlobin Vladimir Germanovich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 4015-0144, Author ID: 957934, e-mail: zlobin\_v@list.ru.

**Pelenko Valery Viktorovich**, Doc. Sci in Engineering, Professor, Professor at the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; SPIN code: 6851-4249, Author ID: 714215, e-mail: pelenko1@rambler.ru.

**Ekimov Vladimir Gennadievich**, Director of ANO "Prombezopasnost — Severo-Zapad", 211-213 Obvodny Canal Embankment, St. Petersburg, Russia; e-mail: ekimov@prom-exp.ru.



# ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА ТОПКИ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННОГО КОТЛА

Кристина Геннадьевна Живаева, Сергей Николаевич Смородин,  
Владимир Николаевич Белоусов

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

© Живаева К. Г., Смородин С. Н., Белоусов В. Н., 2026

Автор-корреспондент: К. Г. Живаева, e-mail: zhivaeva\_k@bk.ru

## АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла (СРК), являющегося ключевым элементом технологической цепи регенерации химикатов в целлюлозно-бумажной промышленности. Уточнение параметров теплового расчёта СРК имеет важное значение при проектировании новых и реконструкции действующих котлов. Авторами предложен усовершенствованный вариант методики расчёта, основанный на сочетании действующих методик расчёта топок котлов и данных практических и экспериментальных исследований, выполненных на действующих промышленных установках. В работе подробно рассмотрены закономерности протекания тепловых процессов при сжигании чёрного щёлока. Особое внимание уделено оценке радиационных характеристик среды, определению коэффициентов поглощения и излучения газовой фазы и взвешенных частиц. Рекомендованы зависимости для определения коэффициента поглощения топочной среды, параметра  $M$ , учитывающего влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов и других факторов, коэффициента загрязнения, учитывающего его термическое сопротивление, и коэффициента тепловой эффективности экранов. Данная методика учитывает сочетание факельного и слоевого сжигания щёлока в топке СРК, ступенчатую подачу воздуха в топку, а также рекомендации по расчёту теплообмена в топке. Проведённые поверочные расчёты топок СРК, выполненные по данной методике, показали хорошее согласование с эксплуатационными наблюдениями и литературными источниками, что подтверждает достоверность и практическую применимость разработанной методики. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации содорегенерационных котлов. Работа направлена на повышение энергетической эффективности и экологической устойчивости целлюлозно-бумажных производств.

**Ключевые слова:** регенерация, чёрный щёлок, диспергирование, подсушка, пиролиз, коксование, критерий поглощательной способности, коэффициент поглощения лучей, коэффициент тепловой эффективности, температура газов

**Для цитирования:** Живаева К. Г., Смородин С. Н., Белоусов В. Н. Особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 111–116. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_111-116

## FEATURES OF THE THERMAL DESIGN OF A SODA RECOVERY BOILER FURNACE

Kristina Gennadyevna Zhivaeva, Sergey Nikolaevich Smorodin,  
Vladimir Nikolaevich Belousov

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

Corresponding author: K. G. Zhivaeva, e-mail: zhivaeva@bk.ru

## ABSTRACT

The article discusses the features of thermal calculation of the furnace of a soda recovery boiler (SRB), which is a key element of the technological chain for the regeneration of chemicals in the pulp and paper industry. Accurate



determination of the thermal calculation parameters for a soda-recovery boiler is essential for both new design and retrofit projects. An improved calculation methodology is proposed, based on a combination of existing boiler furnace design methods and data from practical and experimental studies conducted on operational industrial plants. This study provides a detailed examination of the patterns governing thermal processes during black liquor combustion. Special focus is placed on assessing the radiative characteristics of the medium and on determining the absorption and emission coefficients for both the gas phase and suspended particles. Correlations are recommended for determining: the absorption coefficient of the furnace medium; the M-parameter, which accounts for the influence on heat transfer intensity of the relative burner level, the degree of ballasting of the furnace gases, and other factors; the fouling factor, which accounts for its thermal resistance; and the screen thermal efficiency coefficient. The developed method takes into consideration: the combined flame and bed combustion of black liquor in the SRK furnace; the implementation of staged air supply; and the established guidelines for furnace heat transfer calculation. The verification calculations of SRK furnaces performed using this methodology showed good agreement with operational data and literature sources, confirming the reliability and practical applicability of the developed method. The obtained results can be used in the design and modernization of soda-recovery boilers. This work is aimed at improving the energy efficiency and environmental sustainability of pulp and paper mills.

**Keywords:** regeneration, black liquor, dispersion, partial drying, pyrolysis, charring, absorption capacity criterion, radiation absorption coefficient, thermal efficiency coefficient, flue gas temperature

**For citation:** Zhivaeva K. G., Smorodin S. N., Belousov V. N. (2026) Features of thermal calculation of the furnace of a soda recovery boiler, *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 111–116. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_111-116

## ВВЕДЕНИЕ

Содорегенерационный котёл — это энерготехнологический котёл, основной задачей которого является высокоэффективная регенерация химикатов при условии экономичного сжигания щёлока. В связи с этим схема организации топочного процесса основана на сочетании факельного и слоевого способов сжигания, то есть в объёме топки и на поде в слое огарка.

Впрыскивание чёрного щёлока с использованием специальных форсунок, расположенных на высоте 5–7 м, производится в объём топочной камеры. Диспергирование (распыливание) щёлока должно соответствовать принципу факельно-слоевого сжигания. Размеры капель должны быть достаточно крупными, чтобы они не выносились из топки потоком дымовых газов. Вместе с тем, каплям щёлока необходимо высохнуть за время пребывания в топочном объёме и иметь влажность 3–5% при падении в «подушку» огарка. Распыл щёлока оказывает существенное влияние на топочный процесс, а также в значительной мере определяет условия сушки и формирование горящего слоя огарка на поду. Ухудшение распыла и образование струй щёлока приводит к снижению эффективности процесса горения, уменьшению температуры в топке, росту «подушки» огарка, забиванию первичных воздушных сопел. Слишком тонкое диспергирование щёлока ускоряет сушку и выгорание капель в объёме, увеличивает механический унос, затрудняет формирование «подушки» огарка.

Процессы, происходящие в топке при сжигании чёрного щёлока, условно делятся на три стадии [4].

**Первая стадия** — подсушка щёлока под действием горячих топочных газов — осуществляется после впрыскивания щёлока в топку. Одновременно с подсушкой щёлока происходит взаимодействие щёлока с кислыми компонентами дымовых газов.

**Вторая стадия** — пиролиз и коксование органической части щёлока — начинается в объёме топочной камеры при влажности меньше 15%. При пиролизе выделяется значительное количество летучих органических веществ, в том числе и соединений восстановленной серы (сероводород  $H_2S$ , метилмеркаптан  $CH_3SH$ , диметилсульфид  $(CH_3)_2S$  и др.). С удалением остатков влаги скорость пиролиза органической части щёлока увеличивается, и к началу третьей стадии примерно половина начального количества углерода присутствует в виде кокса.

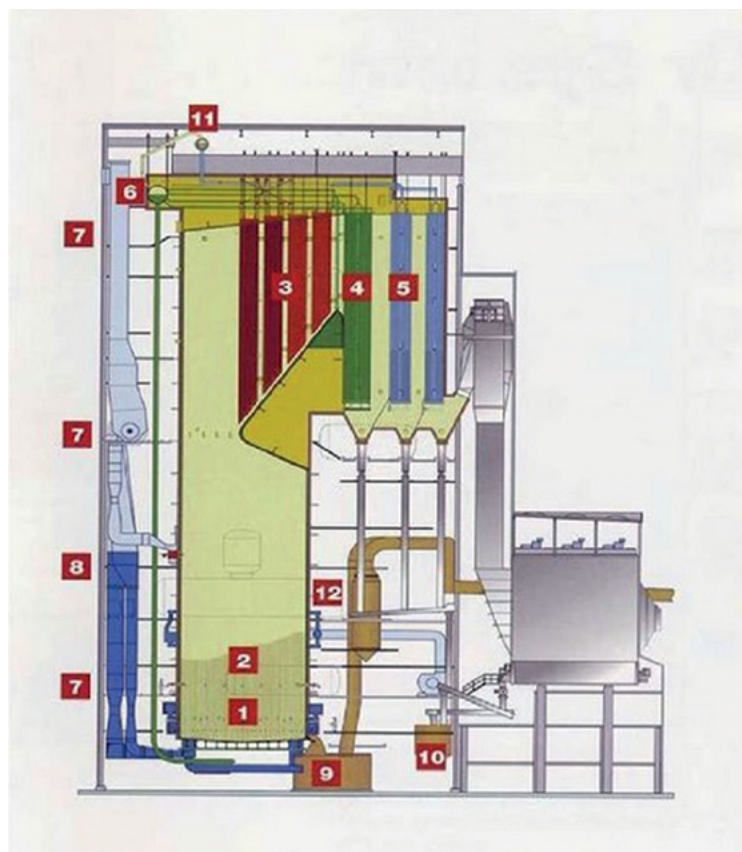
Во время **третьей стадии** на поду топки происходит выжигание кокса и расплавление всех оставшихся минеральных солей. В этой стадии осуществляется восстановление сульфата натрия, добавляемого в щёлок для возмещения производственных потерь химикатов. Расплавленные минеральные соли по лёткам выводятся в бак-растворитель плава.

Восстановление сульфата требует соответствующей восстановительной атмосферы, в связи с чем в нижнюю часть топочной камеры подаётся только часть воздуха, необходимого для горения (до 60%). Остальной воздух вводится в среднюю часть топки, где формируется окислительная зона, необходимая для дожигания летучих органических соединений, образующихся в процессе пиролиза.



**Рисунок 1.** Основные компоненты содорегенерационного котла: 1 — нижняя часть топки с отверстиями для первичного воздуха и расположенными по вертикали отверстиями для вторичного воздуха; а также с пусковыми горелками; 2 — средняя и верхняя часть топки с распылительными щелочовыми форсунками и расположенными по вертикали отверстиями для третичного воздуха; 3 — размещенные с большими промежутками тангенциальные пароперегреватели панельного типа; 4 — вертикальная противоточная парогенерирующая секция; 5 — вертикальные экономайзеры из оребренных труб; 6 — паровой барабан; 7 — вентиляторы воздуха для горения и воздухоподогреды; 8 — воздухоподогреватели; 9 — бак-растворитель; 10 — мешальный чан; 11 — конденсатор пресной воды; 12 — бак питательной воды

**Figure 1.** Main components of a soda recovery boiler: 1 — lower part of the furnace with primary air ports and vertically arranged secondary air ports, as well as start-up burners; 2 — middle and upper sections of the furnace, equipped with black liquor spray nozzles and vertically arranged tertiary air ports; 3 — tangentially oriented panel superheaters, positioned with significant intervals between them; 4 — vertical counterflow steam-generating section; 5 — vertical finned-tube economizers; 6 — steam drum; 7 — combustion air fans and air ducts; 8 — air heaters; 9 — dissolving tank; 10 — blending tank; 11 — fresh water condenser; 12 — feedwater tank



Исходя из стадийности и ступенчатости процесса сгорания и регенерации щёлока во всех агрегатах, принята следующая схема организации топочного процесса:

- Воздух подводится ступенчато.
- Процесс горения протекает в основном в активной зоне топочного объема, расположенной в пределах от пода топки до уровня форсунок. При этом движение распыленного топлива и воздуха оказывается противоточным: капли щёлока падают вниз навстречу восходящему потоку воздуха и продуктов сгорания.
- При испарении влаги из капель образуются хлопья сухого щёлока. Наиболее мелкие частицы уносятся газовоздушным потоком в верхнюю часть топочной камеры и далее в газоходы котла. Более крупные частицы падают на под и сгорают в нижней части топки и в слое огарка.

Теоретическая температура горения щёлока и стабильность факела зависят в основном

от температуры воздуха, влажности щёлока и коэффициента избытка воздуха. В большинстве современных агрегатов коэффициент избытка воздуха в активной зоне топочного объема близок к единице, а температура воздуха, поступающего в топку, находится в пределах 130–180 °С. Влажность щёлока перед форсунками в современных СРК порядка 25–30 % [2, 4].

Сложность организации топочного процесса вызывает проблемы при проектировании топок СРК. В настоящее время отсутствуют утверждённые методики выполнения подобных расчётов. Рекомендуемая методика расчета топок паровых котлов [1], к сожалению, не учитывает сочетания слоевого и камерного сжигания, что имеет место в топках СРК.

Поэтому, авторами предлагается вариант расчёта топки СРК, основанный на теоретических и экспериментальных исследованиях [3].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной радиационной характеристикой продуктов сгорания служит критерий поглощательной способности (критерий Бугера):

$$Bu = kps, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент поглощения топочной среды,  $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$ , рассчитывается по температуре и составу газов на выходе из топки. При его определении



учитывается излучение трехатомных газов и водяных паров ( $\text{RO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) и взвешенных в их потоке частиц сажи, летучей золы и кокса;

$p$  — давление в топочной камере, МПа;

$s$  — эффективная толщина излучающего слоя, м.

При расчёте критерия Ву принимается, что при сжигании основными излучающими компонентами являются газообразные продукты сгорания ( $\text{RO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ), взвешенные в их потоке сажевые частицы, и взвешенные в их потоке частицы золы. Относительное заполнение топочной камеры светящимся пламенем (частицами сажи) характеризуется коэффициентом  $m$ .

При сжигании щёлока в газоплотных котлах  $m=0,3$ ; для негасоплотных котлов  $m=0,6$  [1].

Расчёт проводится по формуле:

$$k = k_e + m \cdot k_c + k_{\text{эл}} \cdot \mu_{\text{эл}}, 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}). \quad (2)$$

Коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания ( $\text{RO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ):

$$k_g = \left( \frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) \cdot (1 - 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot T_m'') \cdot r_n, 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}), \quad (3)$$

где  $r_n = r_{\text{RO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$  — суммарная объёмная доля трехатомных газов и водяных паров в продуктах сгорания;  $T_m''$  — температура газов на выходе из топки, К.

Коэффициент поглощения лучей частицами сажи:

$$k_c = \frac{1,2}{1 + \alpha_m^2} \cdot \left( \frac{C^r}{H^r} \right)^{0,4} \cdot (1,6 \cdot 10^{-3} \cdot T_m'' - 0,5), 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}), \quad (4)$$

где  $\alpha_m^2$  — коэффициент избытка воздуха на выходе из топки;

$T_m''$  — температура газов на выходе из топки, К;

$C^r/H^r$  — соотношение углерода и водорода в рабочей массе топлива.

Коэффициент поглощения лучей частицами золы:

$$k_{\text{эл}} \cdot \mu_{\text{эл}} = \frac{10^4 \cdot A_{\text{эл}}}{\sqrt[3]{(T_m'')^2}} \cdot \frac{\mu_{\text{эл}}}{1 + 1,2 \mu_{\text{эл}} \cdot S}, 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}), \quad (5)$$

где  $\mu_{\text{эл}}$  — концентрация золы в продуктах сгорания, кг/кг.

Коэффициент  $A_{\text{эл}}$  для топок с жидким шлакоудалением принимается для щёлока равным 0,85 [1].

Методика расчёта суммарного теплообмена в топке базируется на приложении теории подобия к топочному процессу. Основными параметрами, определяющими безразмерную температуру газов на выходе из топки, являются критерий радиационного теплообмена

Больцмана ( $Bo$ ) и критерий поглощательной способности Бугера ( $Bu$ ). Вид функциональной зависимости, связывающий между собой эти параметры, установлен на основании опытных данных по теплообмену в топках энергетических котлов [1, 5].

Учёт влияния на теплообмен неизоотермичности температурного поля топки и эффекта рассеяния излучения обеспечивается использованием эффективного значения критерия  $Bu'$  [1].

Эффективное значение критерия Бугера  $Bu'$  определяется по формуле:

$$Bu' = 1,6 \cdot \ln \left( \frac{1,4 Bu^2 + Bu + 2}{1,4 Bu^2 - Bu + 2} \right). \quad (6)$$

Безразмерная температура газов на выходе из топочной камеры:

$$\theta_m'' = \frac{T_m''}{T_a} = \frac{Bo^{0,3}}{MBu'^{0,3} + Bo^{0,6}}, \quad (7)$$

где  $T_a$  — адиабатическая температура горения топлива, К;  $M$  — параметр, учитывающий влияние относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов и других факторов на интенсивность теплообмена.

Формула справедлива в области значений  $\theta_m'' \leq 0,9$ .

Критерий  $Bo$  рассчитывается по формуле:

$$Bo = \frac{\phi B_p (Vc)_{cp}}{\sigma_0 \Psi_{cp} F_{cm} T_a^3}, \quad (8)$$

где  $B_p$  — расчетный расход топлива, кг/с;

$F_{cm}$  — поверхность стен топки, м;

$(Vc)_{cp}$  — средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания 1 кг топлива в интервале температур (кДж/(кг·К));

$\Psi_{cp}$  — среднее значение коэффициента тепловой эффективности экранов;

$\phi$  — коэффициент сохранения тепла;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$  кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела.

Для топок СРК параметр  $M$  целесообразно рассчитывать по формуле как для слоевых топок ( $x_s=0$ ), но с учётом ступенчатого сжигания топлива, когда учитывается зависимость температуры газов на выходе из топки от доли третичного воздуха  $g_{\text{тр.в}}$

$$M = 0,46(1 + \rho)(1 - 0,45 g_{\text{тр.в}}) \sqrt[3]{\frac{V_z}{V_{N_2}^0 + V_{\text{RO}_2}}}, \quad (9)$$



где  $\rho = \frac{R}{F_{cm}}$  — соотношение между поверхностью  $R$  зеркала горения (слоя) и поверхностью стен топки  $F_{cm}$ .

Коэффициент тепловой эффективности экранов равен произведению углового коэффициента экрана  $x$  на коэффициент  $\xi$ , учитывающий тепловое сопротивление загрязнения или закрытие изоляцией

$$\Psi = x \cdot \xi.$$

Коэффициент  $\xi$ , учитывающий снижение тепловосприимчивости экрана при его загрязнении, рекомендуется принимать равным 0,35 (И. Ш. Глейзер принимает 0,282 [2]).

Температура газов на выходе из топки определяется по формуле

$$t_m'' = \frac{T_a}{M \cdot Bu^{0,3} \left( \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \Psi_{cp} \cdot F_{cm} \cdot T_a^3}{\phi \cdot B_p \cdot V_{cp}} \right)^{0,6}} - 273. \quad (10)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренная методика была использована при выполнении тепловых расчетов содорегенерационных котлов, работающих в условиях действующих предприятий. Расчетные значения температуры продуктов сгорания на выходе из топок данных агрегатов были сравнены с производственными данными. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Сравнение результатов с эксплуатационными данными действующих котлов показало расхождение не более 3,5%, что свидетельствует о высокой достоверности разработанной методики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показал опыт выполнения поверочных расчетов действующих котлов, расчетные значения температуры газов на выходе из топки, полученные по данной методике, с достаточной точностью соответствуют реальным значениям температуры.

Проведённые исследования позволили выявить и систематизировать особенности теплового расчёта топки содорегенерационного котла (СРК), отличающие его от существующей методики расчета энергетических и промышленных котлов. Основная специфика методики связана с многостадийным характером сжигания чёрного шёлока, сочетанием факельного и слоевого способов сжигания, а также с наличием в топочном объёме взвешенных частиц кокса, золы и сажи, существенно влияющих на радиационно-конвективный теплообмен.

**Таблица 1.** Результаты экспериментальных исследований температуры газов на выходе из топки

**Table 1.** Results of experimental studies of the flue gas temperature at the furnace outlet

| Предприятие, тип СРК | Температура газов на выходе из топки, °С |        |
|----------------------|------------------------------------------|--------|
|                      | Измерение                                | Расчет |
| АО Усть-Илимский ЛПК |                                          |        |
| СРК 1400             | 897                                      | 924    |
| СРК 1932             | 932                                      | 948    |
| АО Братский ЛПК      |                                          |        |
| СРК 1750, ст. № 12   | 897                                      | 906    |
| СРК 3000, ст. № 14   | 980                                      | 1013   |
| Байкальский ЦБК      |                                          |        |
| СРК 380              | 921                                      | 942    |
| АО Сегежский ЦБК     |                                          |        |
| СРК 770              | 1023                                     | 1012   |
| СРК 625              | 986                                      | 1005   |

Предложенная методика может быть использована в качестве основы для разработки инженерных программ для расчёта и оптимизации тепловых процессов в содорегенерационных котлах.

## Список литературы

1. Тепловой расчёт котлов (Нормативный метод). Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 2016. 127 с.
2. Глейзер И. Ш. Котлы энерготехнологических и тепловых электростанций. М.: Книга, 2010. 245 с.
3. Смородин С. Н. Исследование топочных процессов при сжигании сульфатного щелока в вихревой топке содорегенерационного котлоагрегата с целью повышения ее эффективности: дис.... канд. техн. наук. СПб., 2000. 112 с.
4. Смородин С. Н., Иванов А. Н., Белоусов В. Н. Содорегенерационные котлоагрегаты: учебное пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2010. 164 с.
5. Henrion L., et al. A detailed experimental and modeling comparison of molecular radiative heat transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2022.123136.

## References

1. Thermal Calculation of Boilers (Regulatory Method). 3rd ed., revised and supplemented. St. Petersburg: NPO TsKTI, 2016. 127 p.
2. Gleyzer I. Sh. Boilers of Energy-Technological and Thermal Power Plants. Moscow: Kniga, 2010. 245 p.
3. Smorodin S. N. Study of Furnace Processes During the Combustion of Sulfate Liquor in a Swirl Furnace of a Soda Recovery Boiler Unit to Improve Its Efficiency: PhD Dissertation (Engineering). St. Petersburg, 2000. 112 p.



4. Smorodin S. N., Ivanov A. N., Belousov V. N. Soda Recovery Boiler Units: Textbook. St. Petersburg: SPbGTURP, 2010. 164 p.
5. Henrion L., et al. A detailed experimental and modeling comparison of molecular radiative heat transfer. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 189. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2022.123136.

### ■ Информация об авторах

**Живаева Кристина Геннадьевна**, аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com, e-mail zhivaeva\_k@bk.ru.

**Сморodin Сергей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики

Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

**Белouсов Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

### ■ Information about the authors

**Zhivaeva Kristina Gennadyevna**, PhD student of the Department of Industrial Thermal Power Engineering Productions of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095; e-mail: aleksandrisakevik@gmail.com, e-mail: zhivaeva\_k@bk.ru.

**Smorodin Sergey Nikolaevich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Higher School of Technology and

Power Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Russia, Saint Petersburg, 4 Ivan Chernykh St.; e-mail: pte.gturp@mail.ru.

**Belousov Vladimir Nikolaevich**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering, Higher School of Technology and Power Engineering, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Russia, Saint Petersburg, 4 Ivan Chernykh St.; e-mail: pte.gturp@mail.ru.



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АВАРИЙНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ОТ ОБЪЕМОВ РЕМОНТНО- ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ И ОБОСНОВАНИЕ БЕЗУБЫТОЧНОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ

Антон Ильич Сорокин<sup>1</sup>, Валерий Викторович Пеленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «ОКАН. Промышленное Оборудование»,

<sup>2</sup>Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета  
промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Сорокин А. И., Пеленко В. В., 2026

Автор-корреспондент: А. И. Сорокин, e-mail: s-anton-i@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

В настоящее время критическое состояние трубопроводов систем централизованного теплоснабжения России обуславливает высокий уровень аварийности и значительные сверхнормативные потери тепловой энергии. Существующее хроническое недофинансирование восстановительных работ требует разработки новых экономически обоснованных инструментов для планирования ремонтных кампаний. Целью данного исследования является разработка экономико-математической модели, позволяющей определить объем финансирования профилактических работ, необходимых для достижения целевого уровня надежности тепловых сетей. Предметом исследования были выбраны зависимости параметра потока отказов тепловых сетей от объемов ремонтно-восстановительных работ и внешних эксплуатационных факторов. С помощью статистического метода был проведен анализ данных по аварийности и объемам замены тепловых сетей РФ за период с 2016 по 2020 г., выявлена эмпирическая зависимость, разработана и апробирована модель безубыточного финансирования, а также проанализировано влияние ключевых эксплуатационных факторов на надежность. В результате установлена линейная зависимость снижения параметра потока отказов от увеличения доли заменяемых трубопроводов. На ее основе создана модель для расчета целевого финансирования участка сети, показавшая, что профилактический ремонт в 2,5–3 раза экономически эффективнее ликвидации аварий. Количественно оценено влияние грунтовых вод, блуждающих токов и типа изоляции, что позволяет осуществлять адресное распределение ресурсов. Научная новизна работы заключается в интеграции макростатистического подхода с компонентным анализом для создания практического инструмента управления надежностью в условиях ограниченного бюджета. Практическая значимость заключается в предоставлении эксплуатирующим организациям аргументированного механизма для формирования бюджетных заявок и оптимизации планов ремонтов.

**Ключевые слова:** тепловые сети, надежность, параметр потока отказов, экономическая модель, финансирование, профилактический ремонт, аварийность

**Для цитирования:** Сорокин А. И., Пеленко В. В. Моделирование зависимости аварийности тепловых сетей от объемов ремонтно-восстановительных работ и обоснование безубыточного финансирования. // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 117–123. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_117-123

## MODELING THE DEPENDENCE OF HEATING NETWORK FAILURE RATES ON REPAIR AND RESTORATION WORK VOLUMES AND SUBSTANTIATING BREAK-EVEN FINANCING

Anton Ilyich Sorokin<sup>1</sup>, Valery Viktorovich Pelenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC "OKAN. Promyshlennoye Oborudovaniye", Saint Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: A. I. Sorokin, e-mail: s-anton-i@mail.ru



## ABSTRACT

Currently, the critical state of pipelines in Russia's centralized heating systems results in a high failure rate and significant above-norm heat energy losses. The existing chronic underfunding of remedial maintenance ask of the development of new economically justified tools for planning repair campaigns. The purpose of this study is to develop an economic-mathematical model that allows determining the volume of funding for preventive work necessary to achieve the target reliability level of heating network. The study focused on the dependencies of the failure rate parameter of heating networks on the volume of repair and restoration work and external operational factors. A statistical method was used to analyze data on accidents and the volume of heat network replacements in Russia for the period from 2016 to 2020. An empirical relationship was identified, a break-even financing model was developed and tested, and the impact of key operational factors on reliability was analyzed. The analysis revealed a linear relationship: as the share of replaced pipelines grows, the failure rate decreases proportionally. Based on this dependence, a model was developed to calculate the target financing of a network section, showing that preventive maintenance is 2.5–3 times more economically efficient than emergency repair. The influence of groundwater, stray currents, and insulation type has been quantitatively assessed, enabling targeted resource allocation. The research introduces novelty by combining a macro-level statistical methodology with detailed component analysis, yielding a practical tool for reliability management in resource-constrained environments. The practical significance lies in providing operating organizations with a justified mechanism for forming budget requests and optimizing repair plans.

**Keywords:** heating network, reliability, failure rate parameter, economic model, financing, preventive maintenance, failure rate

**For citation:** Sorokin, A. I., Pelenko, V. V. (2026) Modeling the dependence of heating network failure rates on repair and restoration work volumes and substantiating break-even financing. *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 117–123. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_117-123

## ВВЕДЕНИЕ

В современной России системы централизованного теплоснабжения играют крайне важную роль в жизнеобеспечении населенных пунктов. Однако, по данным информационно-аналитического доклада ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, общая протяженность тепловых сетей, нуждающихся в замене, на конец 2020 года составила 51,5 тыс. км в двухтрубном исчислении, из которых 38,8 тыс. км относятся к категории ветхих (износ свыше 60%) [1]. Такое состояние приводит к значительным потерям тепловой энергии, составляющим в среднем 12–20% при нормативе 5–7%, и высокой аварийности, превышающей 2 повреждения на 1 км трубы в год [1, 7].

Также данная ситуация усугубляется недофинансированием замены изношенных труб. Например, в 2020 г. фактическая замена тепловых сетей в целом по России составила всего 3,37 тыс. км, что является лишь 6,7% от требуемых объемов [1]. Таким образом, в данных условиях **актуальность** исследования обусловлена необходимостью поиска инструментов для обоснования и оптимизации расходов на поддержание работоспособности систем для теплоснабжающих организаций [3, 8].

В связи с этим **целью** настоящего исследования является разработка экономико-математической модели, призванной определить объем финансирования профилактических работ, необходимых

для достижения целевых показателей надежности тепловых сетей.

Для реализации данной цели в работе последовательно решаются следующие **задачи**:

- провести статистический анализ данных по протяженности, аварийности и объемам замены тепловых сетей РФ;
- выявить и формализовать количественную зависимость между интенсивностью потока отказов и долей заменяемых трубопроводов;
- на основе полученной зависимости разработать модель безубыточного финансирования, связывающую параметры надежности с объемом затрат на конкретном участке сети;
- проанализировать влияние ключевых эксплуатационных факторов для последующей приоритизации ремонтов на наиболее рискованных участках.

**Предметом исследования** выступают зависимости параметра потока отказов тепловых сетей от объемов ремонтно-восстановительных работ и внешних эксплуатационных факторов [8, 9].

**Научная новизна** работы заключается в создании комплексного подхода к управлению надежностью тепловых сетей, который объединяет анализ общей статистики с учетом местных условий, что позволяет предложить методику адресного планирования ремонтов.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются статистические данные о состоянии тепловых сетей в Российской Федерации за период с 2016 по 2020 год, включая сведения о протяженности сетей (в разбивке по диаметрам и видам прокладки), протяженности сетей, нуждающихся в замене, объеме замененных трубопроводов, количестве аварий и инцидентов, а также величине тепловых потерь [1, 2].

В качестве основного показателя надежности использован параметр потока отказов ( $K$ , 1/тыс. км\*год) — количество отказов в год, приходящееся на 1 км протяженности трубопроводов. Для обработки данных применялись методы статистического анализа. Аппроксимация данных проводилась с целью получения зависимости [10]. На ее основе методами экономико-математического моделирования была получена формула для планирования финансирования.



Рисунок 1. Динамика протяженности замененных тепловых сетей и нуждающихся в замене, РФ [1]

Figure 1. Dynamics of the length of replaced heating networks and those in need of replacement in Russian Federation [1]

Эффективность модели оценивалась путем сравнительного анализа затрат на ликвидацию аварий и проведения профилактического ремонта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики ключевых показателей подтверждает тенденцию: при практически неизменном объеме ежегодно заменяемых сетей (в среднем 3,3 тыс. км/год) протяженность трубопроводов, нуждающихся в замене, неуклонно растет, увеличившись за 5 лет на 4,1% [1] (рисунок 1).

Аварийность напрямую зависит от нарастания износа [7, 10]. Обработка статистических данных позволила выявить устойчивую зависимость между долей замененных трубопроводов ( $D$ , %) и интенсивностью потока отказов ( $K$ , 1/тыс. км\*год). Аппроксимация данных линейной функцией (рисунок 2) дает следующее уравнение:

$$K = 36 - 2,78 \cdot D. \quad (1)$$

Таким образом, полученная зависимость показывает, что увеличение объема замены всего на 1% от общей протяженности сетей приведет к снижению аварийности на 2,78 отказа на 1000 км трубы в год. Основываясь

на указанной зависимости, можно сделать вывод, что необходимо наращивать объем ремонтно-восстановительных работ [8].

Для возможности использовать данную зависимость как инструмент планирования было введено понятие безубыточного финансирования, при котором затраты на профилактическое обслуживание окупаются за счет предотвращения одной аварии в год. На основе анализа фактических затрат был проведен сравнительный расчет для трубопроводов различного диаметра (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение усредненных затрат на ликвидацию аварии и профилактический ремонт для 1 м трубопровода

Table 1. Comparison of average costs for emergency repair and preventive maintenance per 1 meter of pipeline

| Диаметр трубопровода, мм | Затраты на ликвидацию аварии, руб./м | Затраты на профилактический ремонт, руб./м |
|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 100                      | 12 500                               | 4 800                                      |
| 300                      | 31 000                               | 11 000                                     |
| 500                      | 55 000                               | 19 500                                     |





**Рисунок 2.** Зависимость интенсивности потока отказов (K) тепловых сетей РФ от доли замены (D)

**Figure 2.** Dependence of the failure rate intensity (K) of Russian heating networks on the replacement rate (D)

Как следует из таблицы 1, затраты на ликвидацию аварии в 2,5–3 раза превышают затраты на плановый профилактический ремонт аналогичного участка. Также существенную долю в затратах на ликвидацию аварии составляет социальный и экономический ущерб от перерывов в теплоснабжении [5, 8].

С учетом данной разницы в затратах и зависимости (1) была разработана экономико-математическая модель для определения объема финансирования (Ф, руб.), необходимого для достижения целевого параметра потока отказов ( $K_t$ ) на участке трубопровода протяженностью  $P_r$  (м) и диаметром  $d$  (мм):

$$\Phi = 0,037 \cdot (36 - K_t) \cdot P_r \cdot d. \quad (2)$$

Данная модель позволяет перейти от абстрактной доли замены к конкретному объему финансирования, привязанному к физическим параметрам сети. Для условия безаварийной работы ( $K_t = 0$ ) формула упрощается до:

$$\Phi_0 = 1,33 \cdot d \cdot P_r. \quad (3)$$

Пример практического использования модели для участка магистрального теплопровода диаметром 300 мм и протяженностью 100 м представлен в таблице 2.

**Таблица 2.** Пример расчета требуемого финансирования для обеспечения надежности ( $d=300$  мм,  $P_p=100$  м)

**Table 2.** An example of calculating the required funding to ensure reliability (Pipe diameter=300 mm, pipe range=100 m)

| Целевой параметр потока отказов ( $K_t$ ), 1/тыс. км*год | Расчетный объем финансирования (Ф), руб. |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 10 (высокая надежность)                                  | 288 000                                  |
| 20 (средняя надежность)                                  | 177 000                                  |
| 30 (низкая надежность)                                   | 66 000                                   |

Таким образом, эксплуатирующая организация может варьировать объем финансирования в зависимости от требуемого уровня надежности и имеющихся

бюджетных ограничений, опираясь на четкое количественное обоснование своих решений [8, 9].

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТР ПОТОКА ОТКАЗОВ

Однако разработанная в предыдущем разделе модель является макромоделью, отражающей общую зависимость надежности от объемов замены. Для более точного планирования ремонтов на конкретных участках все же необходимо учитывать эксплуатационные факторы, которые влияют на скорость старения трубопроводов [7, 10]. В качестве ключевых факторов были рассмотрены такие как наличие грунтовых вод, блуждающих токов и тип тепловой изоляции.

После обработки данных диагностики модельной теплотрассы [2, 6] были получены аналитические зависимости параметра потока отказов ( $\lambda$ ) от диаметра трубопровода ( $d_T$ ) для различных условий.

## 1. ВЛИЯНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД И БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

На рисунке 3 представлены зависимости параметра потока отказов для трубопроводов с минераловатной изоляцией, проложенных в разных условиях. Аппроксимация статистических данных полиномами второй степени позволила получить следующие уравнения:

- Для сухих грунтов (без блуждающих токов):

$$\lambda_{\text{сух}} = 0,457 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot d_T + 1,2906 \cdot 10^{-6} \cdot d_T^2. \quad (4)$$

- Для обводненных грунтов:

$$\lambda_{\text{вл}} = 0,5813 - 1,7738 \cdot 10^{-3} \cdot d_T + 1,5192 \cdot 10^{-6} \cdot d_T^2. \quad (5)$$

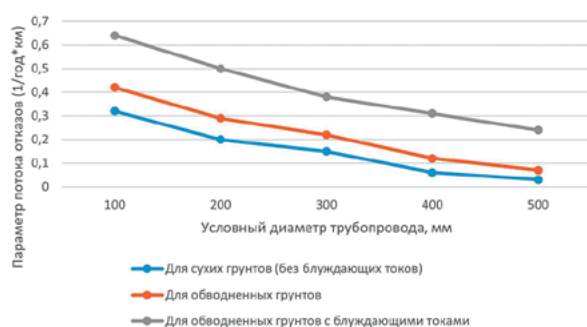
- Для обводненных грунтов с блуждающими токами:

$$\lambda_{\text{вл+бт}} = 0,7916 - 1,6642 \cdot 10^{-3} \cdot d_T + 1,1211 \cdot 10^{-6} \cdot d_T^2. \quad (6)$$

Таким образом, анализ графиков и уравнений показывает, что совокупное воздействие влаги и блуждающих токов оказывает наибольшее разрушающее влияние [6, 7]. Для трубопровода диаметром 300 мм параметр потока отказов в сухом грунте составляет примерно 0,15 1/год\*км, в обводненном грунте возрастает до 0,22 1/год\*км, а при наличии блуждающих токов достигает 0,38 1/год\*км, что более чем в 2,5 раза превышает показатель для благоприятных условий.

## 2. ВЛИЯНИЕ ТИПА ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Качество и тип теплоизоляции являются критически важными для защиты трубы от наружной коррозии [4, 6]. На рисунке 4 приведены сравнительные данные по параметру потока отказов для труб с разными типами



**Рисунок 3.** Зависимость параметра потока отказов от диаметра трубопровода и условий прокладки (наличие грунтовых вод и блуждающих токов) [2, 6]

**Figure 3.** Dependence of the failure rate parameter on pipeline diameter and installation conditions (presence of groundwater and stray currents) [2, 6]

изоляции, эксплуатируемых в сходных грунтовых условиях (обводненный грунт) в течение 20–25 лет.

Были получены следующие аппроксимирующие зависимости:

- Минеральная вата:

$$\lambda_{\text{мв}} = 0,8061 - 1,9874 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{г}} + 1,5427 \cdot 10^{-6} \cdot d_{\text{г}}^2. \quad (7)$$

- Армопенобетон:

$$\lambda_{\text{апб}} = 0,6143 - 1,4641 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{г}} + 1,1154 \cdot 10^{-6} \cdot d_{\text{г}}^2. \quad (8)$$

- Пенополиуретан (ППУ):

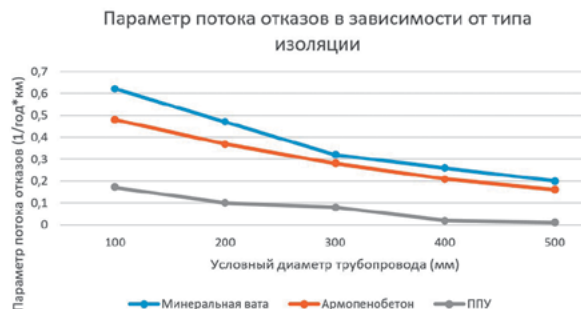
$$\lambda_{\text{ппу}} = 0,2705 - 1,0866 \cdot 10^{-3} \cdot d_{\text{г}} + 1,1192 \cdot 10^{-6} \cdot d_{\text{г}}^2. \quad (9)$$

Как видно из рисунка 4, трубопроводы в изоляции из пенополиуретана (ППУ) демонстрируют значительно более высокую надежность [4]. Для трубы диаметром 300 мм значение  $\lambda$  для ППУ составляет около 0,08 1/год\*км, тогда как для минеральной ваты — около 0,32 1/год\*км. Это обусловлено лучшими влагозащитными свойствами и долговечностью ППУ изоляции заводского нанесения [9].

### 3. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ И ПРИОРИТИЗАЦИЯ РЕМОНТОВ

На основе приведенных данных возможно провести комплексную оценку риска и ранжирования участков тепловой сети по приоритетности замены или обслуживания [7, 10]. Для наглядности результаты сведены в таблицу 3, где представлены расчетные значения параметра потока отказов для трубопровода диаметром 300 мм в различных условиях.

Анализируя данные таблицы 3, можно заметить, что участки сетей с минераловатной изоляцией,



**Рисунок 4.** Сравнение параметра потока отказов для труб с разными типами тепловой изоляции

(для условий обводненного грунта) [4, 6]

**Figure 4.** Comparison of the failure rate parameter for pipes with different types of thermal insulation (under waterlogged soil conditions) [4, 6]

проложенные в обводненных грунтах с блуждающими токами, имеют максимальный параметр потока отказов (0,38) и являются зонами высочайшего риска [6, 7]. Именно эти участки должны в первую очередь включаться в программы замены и обслуживания. При этом переход на современные виды изоляции, такие как ППУ, даже в неблагоприятных условиях позволяет снизить аварийность в 2–3 раза по сравнению с другими материалами [4, 9].

Использование данной компонентной модели с макро-моделью финансирования позволяет не только определить общий объем необходимых средств, но и оптимально распределить их между участками, направив ресурсы на ликвидацию наиболее проблемных сегментов тепловой сети, тем самым максимизировав эффект от каждого вложенного рубля [8, 9].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования решена задача по обоснованию объемов финансирования профилактических работ для управления надежностью тепловых сетей в условиях ограниченных ресурсов.

1. На основе статистических данных по РФ за 2016–2020 гг. [1] установлена эмпирическая зависимость между долей заменяемых трубопроводов и интенсивностью потока отказов, имеющая вид линейной функции  $K = 36 - 2,78 \cdot D$ .

2. Разработана экономико-математическая модель, позволяющая определить объем финансирования, необходимый для достижения целевого уровня надежности на конкретном участке тепловой сети:

$$\Phi = 0,037 \cdot (36 - K_{\text{г}}) \cdot P_{\text{г}} \cdot d.$$



**Таблица 3.** Расчетные значения параметра потока отказов ( $\lambda$ , 1/год\*км) для трубопровода Ду 300 мм в различных эксплуатационных условиях**Table 3.** Calculated values of the failure rate parameter ( $\lambda$ , 1/year\*km) for a Ду 300 mm pipeline under various operating conditions

| Условия эксплуатации                                              | Минеральная вата | Армопенобетон | Пенополиуретан (ППУ) |
|-------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|----------------------|
| Сухие грунты (без блуждающих токов)                               | 0,15             | 0,12          | 0,05                 |
| Обводненные грунты                                                | 0,32             | 0,28          | 0,08                 |
| Обводненные грунты с блуждающими токами                           | 0,38             | 0,31          | 0,14                 |
| Кратность увеличения $\lambda$ (относительно ППУ в сухих грунтах) | в 7,6 раз        | в 6,2 раз     | в 2,8 раз            |

3. Проведен анализ влияния ключевых эксплуатационных факторов (грунтовые воды, блуждающие токи, тип изоляции) на параметр потока отказов [4, 6, 7], что позволяет осуществлять адресное планирование ремонтов на наиболее рискованных участках [10].

4. Доказана экономическая эффективность профилактического ремонта по сравнению с ликвидацией аварий, что подтверждается расчетами, показывающими превышение затрат на аварийный ремонт в 2,5–3 раза [5, 8].

5. Практическая значимость работы заключается в предоставлении инструмента для аргументированного планирования ремонтных кампаний и бюджетных заявок, что способствует повышению обоснованности управленческих решений в сфере эксплуатации тепловых сетей [3, 9].

### Список литературы

1. О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 г.: информационно-аналитический доклад. Москва: ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, 2021. 120 с.
2. Свод правил СП 74.13330.2023 «Тепловые сети. СНиП 3.05.03–85»: дата введения 2024-01-20/ Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. 2024. 23 с.
3. Новак А. В. Российский ТЭК 2022: вызовы, итоги и перспективы // Энергетическая политика. 2023. № 2 (180). С. 5–11.
4. Li H., Wang S., Wang X. et al. A comprehensive review on the failure modes, mechanisms, and analysis of pipeline reliability // Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 141. P. 106676.
5. Wang K., Li Y., Li X. et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis for urban district heating pipelines // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 88. P. 104291.
6. Zhang Y., Liu W., Chen H. et al. A risk-based inspection planning method for urban heating pipelines considering soil corrosion and stray current interference // Tunnelling and Underground Space Technology. 2024. Vol. 143. P. 105532.

7. Ахметова И. Г., Залялова А. Р., Нурисламова А. Р. Надежность тепловых сетей, как фактор устойчивого развития теплоэнергетики // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 95-го заседания Международного научного семинара. Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. С. 341–349.
8. Терентьева А. С. Анализ состояния и прогнозирование развития сектора централизованного теплоснабжения в России в условиях новых инвестиционных механизмов: специальность «5.2.3»: дисс. ... канд. экон. наук / Терентьева Александра Станиславовна; ФГБУН Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской академии наук. Москва, 2024. 147 с.
9. Машков И. А. Экспертный подход как путь к поиску решения проблем неэффективности теплоснабжения // Философия науки: научные обзоры, подготовленные в рамках международной научно-образовательной программы. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. С. 270–280.
10. Чекардовский С. М., Чекардовская И. А., Илюхин К. Н., Мионов В. В., Чекардовский М. Н. Методы и способы комплексных исследований и оценки технического состояния оборудования инженерных систем: монография. Екатеринбург: УрФУ, 2020. 184 с.

### References

1. Federal State Budgetary Institution 'Russian Energy Agency' of the Ministry of Energy of the Russian Federation (2021) *On the state of thermal power engineering and district heating in the Russian Federation in 2020: information and analytical report*. Moscow: FGBU 'REA' Minenergo Rossii.
2. Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation (2024) \*Code of Rules SP 74.13330.2023 'Heat networks. SNiP 3.05.03–85' (Date of introduction 2024-01-20) \*. Moscow.
3. Novak, A. V. (2023) 'Russian fuel and energy complex 2022: challenges, results and prospects', *Energeticheskaya Politika*, 2 (180), pp. 5–11. (In Russian)



4. Li, H., Wang, S., Wang, X. et al. (2022) 'A comprehensive review on the failure modes, mechanisms, and analysis of pipeline reliability', *Engineering Failure Analysis*, 141, p. 106676.
5. Wang, K., Li, Y., Li, X. et al. (2023) 'Life cycle assessment and life cycle cost analysis for urban district heating pipelines', *Sustainable Cities and Society*, 88, p. 104291.
6. Zhang, Y., Liu, W., Chen, H. et al. (2024) 'A risk-based inspection planning method for urban heating pipelines considering soil corrosion and stray current interference', *Tunnelling and Underground Space Technology*, 143, p. 105532.
7. Akhmetova, I. G., Zalyalova, A. R. and Nurislamova, A. R. (2023) 'Reliability of heating networks as a factor in the sustainable development of thermal power engineering', in *Methodological issues of reliability research of large energy systems. Proceedings of the 95th International Scientific Seminar*. Irkutsk: ISEM SB RAS, pp. 341–349. (In Russian)
8. Terentyeva, A. S. (2024) *Analysis of the state and forecasting of the development of the district heating sector in Russia under new investment mechanisms*. PhD thesis. Moscow: INP RAS. (In Russian)
9. Mashkov, I. A. (2022) 'Energetic approach as a way to find a solution to the problems of inefficiency of heat supply', in *Philosophy of Science. Scientific reviews prepared within the framework of the international scientific and educational program*. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, pp. 270–280. (In Russian)
10. Chekardovsky, S. M., Chekardovskaya, I. A., Ilyukhin, K. N., Mironov, V. V. and Chekardovsky, M. N. (2020) *Methods and techniques for comprehensive research and assessment of the technical condition of engineering systems equipment*. Yekaterinburg: Ural Federal University. (In Russian)

### ■ Информация об авторах

**Сорокин Антон Ильич**, инженер проектов АЭС, ООО «ОКАН. Промышленное оборудование», 196006, Россия, Санкт-Петербург, Воздухоплавательная ул., д. 19 литера А, помещ. 30; ORCID: 0009-0008-2450-6504; e-mail: s-anton-i@mail.ru.

**Пеленко Валерий Викторович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; SPIN-код: 6851-4249; Author ID: 714215; e-mail: pelenko1@rambler.ru.

### ■ Information about the authors

**Sorokin Anton Ilyich**, Nuclear Power Plant Project Engineer, LLC "OKAN. Promyshlennoye Oborudovaniye", 19 letter A, room 30, Vozduchoplavatel'naya str., St. Petersburg, 196006, Russia; ORCID: 0009-0008-2450-6504; e-mail: s-anton-i@mail.ru.

**Pelenko Valery Viktorovich**, Doc. Sci in Engineering, Professor, Professor at the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 6851-4249; Author ID: 714215; e-mail: pelenko1@rambler.ru.



Научная статья

УДК 621.31; 621.876.1

DOI 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_124-140

# КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В ЛИФТОВЫХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Владимир Олегович Дронов

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна; ООО «ЦЭПиКС»; Санкт-Петербург, Россия

© Дронов В. О., 2026

e-mail: vvvvdr@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено оценке технико-экономической целесообразности внедрения суперконденсаторных накопителей энергии (НЭ) в монтажную схему лифта в многоквартирных домах для повышения энергоэффективности. Актуальность работы обусловлена высокой пиковой нагрузкой от лифтов на электросети зданий и низкой эффективностью существующих систем рекуперации, возвращающих энергию в сеть без её аккумулирования. Цель статьи — комплексный анализ концепции размещения накопителя в шахте для локализации энергопотоков. На основе инженерных расчётов и моделирования построен «энергопортрет» типового безредукторного лифта (грузоподъёмность 1000 кг, 17 этажей). Проведён сравнительный анализ технологий накопления, обоснован выбор суперконденсаторов как оптимальных для частых циклов заряда-разряда. Рассчитан потенциал рекуперации, выполнено технико-экономическое обоснование с оценкой капитальных затрат, годовой экономии и срока окупаемости. В результате выкладки показано, что интеграция суперконденсаторного блока (на примере отечественных модулей НК-58-125М) в цепь постоянного тока привода позволяет аккумулировать 50 % рекуперированной энергии. Это снижает пиковую нагрузку от лифта на сеть здания на 40–60 % и обеспечивает экономию чистой электроэнергии до 29 % (около 1232 кВт·ч в год на один лифт). Основной экономический эффект достигается за счёт снижения платы за пиковую мощность. Однако срок окупаемости капитальных вложений (~500 тыс. руб.) составляет около 16 лет, что сдерживает массовое внедрение в жилом фонде при текущих тарифах. В целом концепция доказала техническую реализуемость; её потенциал для трансформации лифта из проблемного потребителя в стабилизирующий элемент электросети здания очевиден. Для широкого распространения необходимы снижение стоимости накопителей, расширение спроса на энергоэффективные системы и интеграция решения в проекты энергоэффективных «умных» зданий.

**Ключевые слова:** повышение энергоэффективности, накопители энергии, энергия торможения, суперконденсаторы, рекуперация кинетической энергии, пиковая нагрузка

**Для цитирования:** Дронов В. О. Концепция применения суперконденсаторов в лифтовых установках для повышения энергоэффективности // Технология и энергетика. 2026. № 1 (1). С. 124–140. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_124-140

## THE CONCEPT OF UTILIZING SUPERCAPACITORS IN ELEVATOR SYSTEMS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY

Vladimir Olegovich Dronov

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design; LLC "TsEPiKS";  
St. Petersburg, Russia

e-mail: vvvvdr@mail.ru



## ABSTRACT

This study evaluates the techno-economic viability of deploying supercapacitor energy storage in elevator shafts of apartment buildings to improve energy efficiency. The significance of this research stems from the substantial peak load elevators place on a building's power supply and the inefficiency of current regeneration systems that reinject energy directly into the grid, bypassing storage. The aim of this article is a comprehensive analysis of the concept of placing an energy storage system inside the elevator shaft to localize energy flows. Based on engineering calculations and simulation, an "energy portrait" of a typical gearless elevator (1000 kg load capacity, 17 floors) has been developed. A comparative analysis of energy storage technologies was conducted, justifying the selection of supercapacitors as optimal for frequent charge-discharge cycles. The study involved calculating the regeneration potential and performing a techno-economic analysis, with evaluation of capital costs, annual savings, and the payback period. The presented calculations demonstrate that integrating a supercapacitor bank (using domestic NK-58-125M modules as an example) into the drive's DC link enables the accumulation of up to 100 % of the recoverable energy. This reduces the peak load imposed by the elevator on the building's electrical grid by 40–60 % and yields net electricity savings of up to 29 % (approximately 1,232 kWh per year per elevator). The primary economic benefit is achieved by reducing the charge for peak power demand. However, the payback period for the capital investment (~500 thousand RUB) is approximately 16 years, which hinders its widespread adoption in residential buildings at current tariff rates. Overall, the concept has proven to be technically feasible; its potential to transform an elevator from a problematic consumer into a stabilizing element of the building's electrical grid is evident. To achieve broad deployment, three key requirements must be met: lowering the cost of storage systems, establishing a supportive regulatory environment, and incorporating the solution into smart, energy-efficient building designs.

**Keywords:** energy efficiency improvement, energy storage, braking energy, supercapacitors, kinetic energy recovery, peak load

**For citation:** Dronov V. O. (2026) The concept of utilizing supercapacitors in elevator systems to improve energy efficiency, *Technology and Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 124–140. DOI: 10.46418/3033-7852\_2026\_1\_1\_124-140

## ВВЕДЕНИЕ

Рост энергопотребления и обновление экологических стандартов делают повышение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) ключевой задачей для устойчивого развития городов. Значительную долю в энергобалансе многоквартирных домов составляют инженерные системы, среди которых лифтовое оборудование является одним из наиболее энергоемких потребителей.

Энергетические сети многоэтажных домов периодически испытывают пиковую нагрузку от лифтов, которая резко увеличивает ток, вызывая просадки напряжения у других потребителей дома, перегрев и ускоренный износ кабелей, трансформаторов и коммутационной аппаратуры, что повышает риск аварийных отключений и ведет к финансовым потерям из-за переплат по тарифу за максимальную мощность.

Внедрение современных безредукторных лифтов с рекуперативными приводами лишь частично решает проблему: рекуперированная энергия, сгенерированная лифтом в режиме торможения, возвращается в общедомовую сеть, однако эффективность её использования критически зависит от наличия мгновенного спроса внутри здания. Однако если в момент торможения потребление дома низкое (например, ночью), то эта энергия не усваивается, а рассеивается в виде тепла или возвращается в сеть,

создавая проблемы для её качества. Таким образом, низкая эффективность использования рекуперированной энергии существующими системами является основным технологическим ограничением. В то время как рекуперация выработанной электроэнергии способна уменьшить энергозатраты во время работы лифта до 35 % [1].

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью поиска решений для полной утилизации рекуперированной энергии и снижения пикового давления на электросети.

Предположим, что установка накопителей энергии (НЭ) в шахте лифта может стать оптимальным решением для локализации энергопотоков. Накопитель позволит аккумулировать избытки рекуперированной энергии и использовать их в моменты пикового потребления лифта или других общедомовых нужд, трансформируя лифтовую установку из проблемы для сети в стабилизирующий элемент.

Целью данной статьи является комплексная оценка технико-экономических перспектив и барьеров внедрения накопителей энергии в лифтовых шахтах многоквартирных жилых домов в России.

Для достижения цели поставлены задачи: проанализировать «энергопортрет» лифта, рассчитать

потенциал рекуперации на примере типового объекта, провести сравнительный анализ технологий накопления (технология выбора: суперконденсаторы или аккумуляторы?), оценить капитальные

затраты и потенциальную экономию, а также выявить нормативные и технические препятствия для реализации таких проектов в условиях петербургского ЖКХ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование НЭ непосредственно в лифтовой шахте — решение не новое, в мире уже производят такое оборудование, только в России оно еще не освоено. В этой статье рассмотрены перспективы его использования в жилых домах (например, в Санкт-Петербурге, где второй год идет масштабная кампания по замене устаревших лифтов). Исследование основано на классических инженерных расчётах баланса энергий в системе лифт-противовес. Применялось моделирование рабочего цикла с учётом переменной нагрузки, КПД преобразователей и параметров накопителей. Расчёт рекуперированной энергии и подбор компонентов выполнен по стандартным формулам электротехники и механики, с последующей оценкой экономических показателей (срок окупаемости, снижение пиковой мощности). Все выводы базируются на оценочных параметрах, характерных для типовой эксплуатации в жилом фонде.

Также произведен анализ современного состояния вопроса (литературный обзор). Рассмотрены методы рекуперации энергии, которые используются при проектировании лифтовых систем в жилых зданиях; основные виды НЭ; обоснование выбора накопителя, который наиболее рационально использовать для обозначенных целей. При расчетах технико-экономического обоснования заданы как начальные (из паспорта оборудования) следующие исходные данные для типового лифта в 17-этажном доме:

- Грузоподъёмность,  $Q$  — 1000 кг.
- Масса кабины,  $m_k$  — 1200 кг.
- Масса противовеса,  $m_n = m_k + 0,5Q = 1700$  кг.
- Высота подъёма,  $H$  — 45 м.
- Номинальная скорость,  $v$  — 1,6 м/с.
- Средняя эксплуатационная нагрузка при движении вниз,  $L_{cp}$  — 650 кг.
- Суточное количество рабочих циклов (подъём-спуск),  $N$  — 280.
- КПД привода в двигательном режиме,  $\eta_{ав}$  — 0,85.

## ТЕХНОЛОГИИ НАКОПЛЕНИЯ

Существующие в настоящее время технологии рекуперации и накопления энергии можно разделить на два основных типа: регенеративные приводы с возвратом энергии в сеть и гибридные системы со встроенными накопителями энергии (НЭ). Рассмотрим оба.

1. Лифты с рекуперацией энергии в сеть — это стандарт для большинства премиальных моделей. Преобразователь инвертирует постоянный ток, полученный от двигателя в генераторном режиме, в переменный и отдаёт его обратно в сеть здания. Однако эффективность такой системы падает, если в момент рекуперации в здании нет достаточного текущего потребления. Компании-производители, которые активно продвигают эту технологию: Otis (США): заявлено, что система Otis Gen360 с регенеративным приводом ReGen Drive даёт до 75% экономии энергии по сравнению с традиционными системами; Schindler (Швейцария): приводы Schindler PORT и Schindler 7000 также оснащены системой рекуперации EcoFeed, возвращающей энергию в сеть здания. В Финляндии передовая фирма KONE продолжает внедрять технологию KONE EcoDisc MRL в сочетании с регенеративным приводом [2, 3].

2. Гибридные системы со встроенными накопителями энергии (НЭ) — это следующее поколение решений, где рекуперированная энергия не сбрасывается в сеть, а аккумулируется для последующего использования самим лифтом или общедомовыми системами [4]. Это решает проблему несбалансированности генерации и потребления.

Выделяют два основных типа НЭ: литий-ионные батареи и суперконденсаторы. Сравним их применительно к использованию в качестве НЭ для лифтов.

*Литий-ионные аккумуляторные батареи* (Li-ion) обеспечивают высокую плотность хранения энергии и применяются для резервного питания и сглаживания нагрузок (как и классический автомобильный аккумулятор). Такие батареи использует компания Thyssenkrupp Elevator (Германия) в своей системе ACCEL для горизонтального перемещения, а также в концепциях умных лифтов для оптимизации энергопотоков.

*Суперконденсаторы* (ионисторы) обладают более высокой мощностью, чем Li-ion, мгновенной отдачей энергии и огромным числом циклов заряда-разряда (сотни тысяч), что идеально соответствует частым и коротким циклам работы лифта. Именно они считаются наиболее перспективными для установки непосредственно в шахте [5].

Компания Mitsubishi Electric (Япония) разработала и успешно продает систему ESMO (Energy Saving



Motor), которая представляет собой гибрид регенеративного привода и суперконденсаторного накопителя, установленного в шахте. Эта система запасает до 100% рекуперированной энергии для повторного использования [6]. Другой пример — Sigma Elevator (ОАЭ) внедряет Sigma Pareto MRL в России с опциональной гибридной системой накопления на основе суперконденсаторов, что позволяет снизить пиковую нагрузку на сеть до 20% [7].

Так, ведущие мировые производители переходят от простой рекуперации в сеть к созданию интегрированных энергетических решений. В то время как регенеративные приводы стали де-факто стандартом для новых зданий, пионером в области коммерческого использования именно шахтных накопителей выступает Mitsubishi Electric. Другие компании — лидеры отрасли (Otis, KONE, TK) активно тестируют и предлагают гибридные решения, часто в рамках пилотных проектов «умных» зданий, где лифт становится активным элементом микросети. Для 17-этажных жилых домов оптимальным с технической точки зрения выглядит связка: безредукторный MRL-привод (Machine-Room-Less drive, англ. «привод без машинного помещения») + суперконденсаторный накопитель, обеспечивающая максимальную эффективность использования рекуперированной энергии непосредственно на месте ее возникновения.

В России в городском электротранспорте уже давно принята на вооружение технология рекуперации и накопления энергии (НЭ): кинетическая энергия торможения двигателя собирается различными накопителями. Традиционный бортовой накопитель состоит из блока суперконденсаторов с системой контроля параметров и преобразователя энергии. При правильном подборе емкости используемых суперконденсаторов рекуперированная энергия возвращается в сеть и опосредованно хранится на собственные нужды, а избыточная энергия отсутствует в сети. Стационарные накопители с тиристорно-импульсной системой управления принимают энергию рекуперативного торможения, а полезная рекуперация остается в сети. Испытания бортового накопителя на борту трамвая показали способность производить межпоездный обмен полезной энергией рекуперации при наличии нагрузки в контактной сети и запасать только избыточную энергию рекуперативного торможения; пилотные рейсы проходили в Санкт-Петербурге [8, с. 17]. Группа компаний «Силовые машины» (ныне в составе «Ростеха») разрабатывала и производила суперконденсаторные модули «Квазар» для трамваев и спецтехники. Технически такая платформа потенциально применима и для лифтов, что указывает на наличие в России компетенций в области

создания накопителей. В 2025 г. АО «Мослифт» позиционировалось как единственный среди лифтостроительных заводов в РФ, который разрабатывает и производит рекуператоры электроэнергии на суперконденсаторах (экономия энергии 30%). Серпуховский лифтостроительный завод 10.12.2025 объявил, что с января 2026 г. начнет выпуск лифтов с гибридной системой рекуперации на суперконденсаторах<sup>1</sup>, обещанная экономия энергии — 35%, данных об использовании шахтных накопителей в лифтовом движении другими российскими компаниями-производителями найти не удалось.

#### ЭНЕРГОПОРТРЕТ ЛИФТА: ГРАФИКИ НАГРУЗКИ, ПИКОВАЯ МОЩНОСТЬ, ПОТЕНЦИАЛ РЕКУПЕРАЦИИ

Известно, что мировой современный рынок предлагает для многоэтажных жилых домов (высота подъема ~ 50 метров) преимущественно безредукторные лифты с машинным помещением или без него (MRL). Доминирующим решением стали MRL-лифты с синхронными безредукторными приводами на постоянных магнитах (PMSM), которые отличаются высоким КПД, компактностью и пониженным уровнем шума. Грузоподъемность таких лифтов обычно составляет 630–1000 кг при скорости 1,6–2,5 м/с. Ключевой технологией, определяющей энергоэффективность, является частотно-регулируемый привод с функцией рекуперации.

В Санкт-Петербурге после открытия в 2019 году в г. Колпино совместного российско-белорусского сборочного производства лифтов ООО «МЛМ Невский лифт» современные безредукторные лифты серии «МЛТ» массово устанавливаются в многоэтажных жилых комплексах Санкт-Петербурга (например, ЖК «Новая Охта», «Витебский парк» и др.).

Необходимо указать, что энергопотребление современного безредукторного лифта носит циклический импульсный характер, кардинально отличаясь от стабильной нагрузки. Это видение является альтернативой западным брендам и представляет собой ту самую технологическую базу (безредукторный привод + рекуперация), на которую в перспективе могут быть установлены системы накопления энергии.

Анализ паспортных данных моделей лифтов, массово устанавливаемых в Санкт-петербургских новостройках выше 16 этажей (например, «МЛТ-9» от «Могиливлift-маш»), позволяет построить типовой «энергопортрет». Для этого вначале определим основные параметры необходимой модели лифта.

<sup>1</sup> 10.12.2025, <https://www.metalinfo.ru/ru/news/179471>



В терминах усредненного показателя интенсивности 5-минутного пассажиропотока в жилых домах массовой застройки,  $I=3-6\%$ . Поток имеет двусторонний характер. Величина расчетного 5-минутного пассажиропотока при неравномерной заселенности этажей рассчитывается по формуле:

$$A_5 = \sum_2^n a_i \cdot \frac{I}{100}, \text{ чел/5 мин} \quad (1)$$

где  $I$  — расчетная интенсивность пятиминутного пассажиропотока, %;

$n$  — число этажей, обслуживаемых лифтом (первый этаж не учитывается);

$a_i$  — заселенность  $i$ -го этажа здания.

Предположим, что в 17-этажном здании на каждом этаже расположено по 4 квартиры, а средняя заселенность одной квартиры составляет 2 человека. Общее количество обслуживаемых лифтом квартир:  $4 \cdot 16 = 64$  шт. Тогда общая заселенность:  $a_{16} = 64 \cdot 2 = 128$  человек.

Подставляем известные значения в формулу (1):

$$A_5 = \sum_2^{16} 128 \cdot \frac{5}{100} = 6,4 \text{ чел/5 мин.}$$

Расчетный пассажиропоток определяется по формуле:

$$A_p = 12 \cdot K \cdot A_5, \text{ чел/час}, \quad (2)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий нерегулярность пассажиропотока, связанную с заболеванием людей и отпусками (принимается 0,8–0,9).

Подставляем известные значения в формулу (2):

$$A_p = 12 \cdot 0,9 \cdot 6,4 = 69,12 \text{ чел/час.}$$

Определим расчетную скорость кабины лифта в зависимости от высоты подъема по формуле:

$$V = \frac{H}{20 \div 30}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где  $H$  — средняя высота подъема лифта в 17-этажном здании при высоте этажа в 3 метра,  $H = 50$  м.

$$V = \frac{50}{30} = 1,6 \text{ м/с.}$$

Вместимость кабины лифта находится по его грузоподъемности:

$$E = \frac{Q}{Q_n}, \quad (4)$$

где  $Q$  — масса расчетного груза кабины, из имеющихся расчетов примем грузоподъемность кабины 1000 кг;

$Q_n$  — расчетная масса пассажира,  $Q_n = 80$  кг.

$$E = \frac{1000}{80} = 12,5.$$

Значит, кабина лифта в данном доме должна вмещать 13 пассажиров.

Время кругового рейса кабины определяется по формуле:

$$T = \frac{2 \cdot H_b + h \cdot (N_n + N_c + 1)}{V} + K_t \cdot [t_0 \cdot (N_n + N_c + 1) + t_n], \quad (5)$$

где  $H_b$  — вероятная высота подъема кабины лифта,  $H_b = (0,7 \div 0,9) \cdot H = 0,8 \cdot 50 = 40$  м;

$h$  — путь движения кабины с неустановившейся скоростью при разгоне и замедлении,  $h = 3 \div 3,5$  м;

$N_n, N_c$  — число вероятных остановок кабины при подъеме и спуске;

$V$  — расчетная скорость установившегося движения кабины,  $V = 1,6$  м/с;

$K_t$  — коэффициент дополнительных затрат времени  $K_t = 1,05 \div 1,10$ ;

$t_0$  — затраты времени на ускорение, замедление и пуск лифта, на открытие и закрывание дверей кабины,  $t_0 = 12 \div 14$  с;

$t_n$  — затраты времени на вход и выход пассажиров,  $t_n = 35,75$  с<sup>2</sup>.

Число вероятных остановок<sup>3</sup> при подъеме и спуске кабины  $N_n = 3,7$ ,  $N_c = 3$ .

Подставляем найденные и принятые значения в формулу (5):

$$T = \frac{2 \cdot 40 + 3 \cdot (3,7 + 3 + 1)}{1,6} + 1,05 \cdot [13 \cdot (3,7 + 3 + 1) + 35,75] = 64,4375 + 142,6 = 207 \text{ с.}$$

Производительность лифта при двустороннем пассажиропотоке:

$$P = \frac{3600 \cdot (\gamma_n + \gamma_c)}{T} = \frac{3600 \cdot (0,7 + 0,4)}{207} = 19 \text{ пас/час.} \quad (6)$$

Коэффициент использования производительности лифтом найдем:

$$K_p = \frac{A_p}{P \cdot n} = 69,12 / 19 = 3,6. \quad (7)$$

Для 17-этажного жилого дома типичные диапазоны  $\lambda$  (согласно ГОСТ Р 56420.2–2015):

– низкая нагрузка ( $\lambda = 2,0-3,0$ ): характерна для домов с малой заселенностью (например, на этапе

2 Расчет опубликован частично, взято из <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=893878>

3 Там же.



заселения) или с высокой долей пожилых жителей. Лифт работает с большими паузами, а рекуперация происходит редко и нерегулярно. Пиковые нагрузки редки;

– средняя (нормативная) нагрузка ( $\lambda = 3,5-4,5$ ): оптимальный режим для полностью заселенного дома. Значение  $\lambda = 3,6$ , указанное в расчетах, попадает в этот диапазон и говорит о сбалансированном пассажиропотоке с пиками в утренние и вечерние часы. Именно при таком коэффициенте система рекуперации работает наиболее стабильно, а пиковая нагрузка на сеть становится регулярной и предсказуемой;

– высокая нагрузка ( $\lambda = 5,0-6,0+$ ): возникает в домах с очень высокой плотностью заселения (малогабаритные квартиры), наличием офисов на первых этажах или в общежитиях. Лифт работает практически непрерывно, пики потребления часты и длительны, интервалы между рекуперативными циклами минимальны. Это создает максимальную нагрузку на электросеть, но и предоставляет наибольший потенциал для накопления энергии.

Таким образом,  $\lambda = 3,6$  указывает на типовой, полностью заселенный жилой дом, для которого расчеты энергопотребления и эффективности накопителя будут наиболее репрезентативными.

Полученный коэффициент говорит о том, что в данном жилом доме в часы пик может наблюдаться перегрузка лифтового оборудования. Однако при помощи расчетного метода мы получили самую популярную конфигурацию показателей, что в большинстве случаев устанавливается для лифтов 17-этажных жилых зданий.

Для 17-этажного дома проверенным решением считается лифт грузоподъемностью 1000 кг (13 пассажиров) и номинальной скоростью 1,6 м/с.

Далее для наглядности расчета возьмем высокотехнологичный лифт Autors elevator (Suzhou), паспорт которого любезно предоставил по запросу автора статьи производитель — международная компания Autors (см. рис. 1 и табл. 1). Для 17-этажного дома проверенным решением считается лифт грузоподъемностью 1000 кг (13 пассажиров) и номинальной скоростью 1,6 м/с.

#### График нагрузки и пиковая мощность

Потребление резко варьируется в течение цикла «разгон — установившийся ход — торможение — стоянка». Наиболее энергоемкая фаза пуска: при полной загрузке пиковая мощность достигает 18–22 кВт в течение 5–7 секунд, что в 3–4 раза выше мощности установившегося движения (–5–6 кВт). В двигателе лифта Autors мощность 6,7 кВт.



Рисунок 1. Обложка паспорта лифта с рассчитанными нами показателями

Figure 1. The cover of the elevator passport with the indicators we calculated

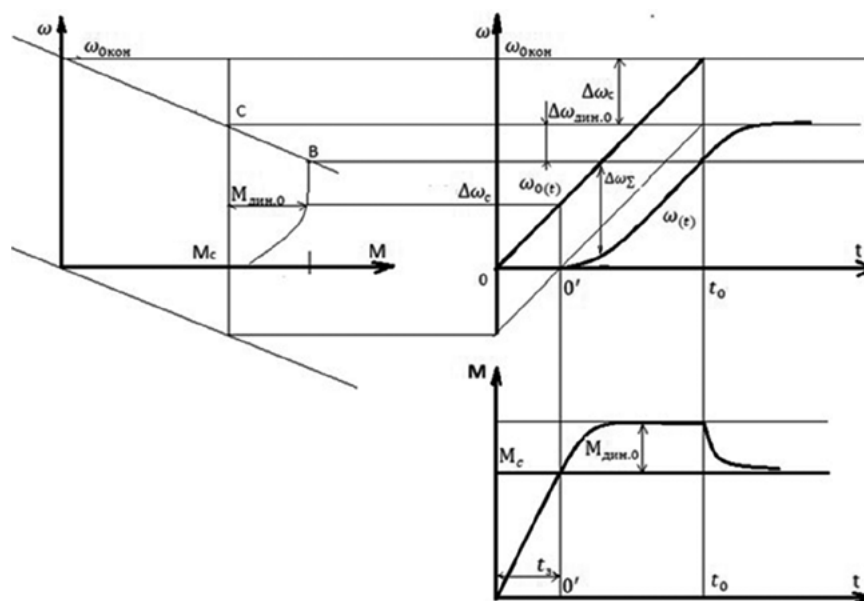
Таблица 1. Техническое описание лифта

Table 1. Technical description of the elevator

|                                                                                                                                                                                        |                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Предприятие-изготовитель (поставщик)                                                                                                                                                   | Autors Elevator (Suzhou) CO., Ltd.    |
| Назначение лифта                                                                                                                                                                       | Пассажирский                          |
| Модель (индекс) лифта                                                                                                                                                                  | ATPS20, 1000/1.6–17/17/17             |
| Заводской номер                                                                                                                                                                        | 25PT05251                             |
| Месяц и год изготовления                                                                                                                                                               | Февраль 2025 г.                       |
| Допустимая температура (минимальная и максимальная), °C:<br>– в машинном помещении<br>– в шахте                                                                                        | Min: +5 °C<br>Max: +40 °C             |
| Окружающая среда, в которой может эксплуатироваться лифт (климатические, сейсмические условия, относительная влажность, насыщенность пылью, агрессивная, взрывоопасная, пожароопасная) | Влажность воздуха макс. 80% при 25 °C |
| Нормативные документы, в соответствии с которыми изготовлен лифт (ГОСТ, ТУ и т. п.)                                                                                                    | ТР ТС011/2011<br>ГОСТ 33984.1–2016    |
| Назначенный срок службы                                                                                                                                                                | 25 лет                                |
| Номинальная грузоподъемность, кг                                                                                                                                                       | 1000                                  |
| Число пассажиров (не более)                                                                                                                                                            | 13                                    |
| Номинальная скорость движения кабины, м/с                                                                                                                                              | 1,6                                   |
| Скорость движения кабины в режиме «Ревизия», м/с                                                                                                                                       | Не более 0,3                          |

При включении двигатель подключается к полной мощности сети и механизм получает пусковой ток, который в 5–8 раз больше обычного ( $I_n = 5-8 \cdot I_n$ ). Номинальный ток нашего двигателя по паспорту лифта  $I_n = 15$  А, для расчета примем  $I_n = 100$  А.





**Рисунок 2.** Разгон электропривода при постоянном статическом моменте ( $M_c = \text{const}$ ):  $\omega_{0\text{кон}}$  — конечное значение угловой скорости идеального холостого хода;  $\Delta\omega_c$  — статическое падение скорости, рад/с;  $\Delta\omega_{\text{дин.0}}$  — падение скорости, обусловленное заданным динамическим моментом ( $\Delta\omega_{\text{дин.0}} > 0$  при  $\varepsilon_0 > 0$  и  $\Delta\omega_{\text{дин.0}} < 0$  при  $\varepsilon_0 < 0$ ), рад/с;  $M_{\text{дин.0}}$  — задаваемый динамический момент, Н·м

**Figure 2.** Acceleration of an electric drive under constant static torque ( $M_c = \text{const}$ ):  $\omega_{0\text{кон}}$  — final value of the ideal no-load angular velocity;  $\Delta\omega_c$  — static speed drop, rad/s;  $\Delta\omega_{\text{дин.0}}$  — speed drop due to a given dynamic torque ( $\Delta\omega_{\text{дин.0}} > 0$  with  $\varepsilon_0 > 0$  and  $\Delta\omega_{\text{дин.0}} < 0$  with  $\varepsilon_0 < 0$ ), rad/s;  $M_{\text{дин.0}}$  — specified dynamic torque, N·m

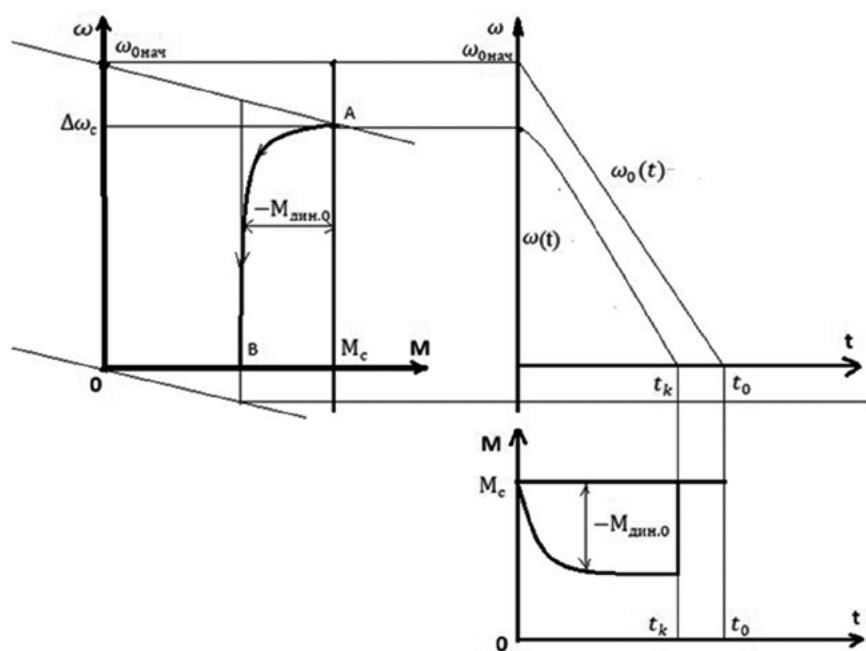
На рисунке 2 изображены графики переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии на разгоне лифта без пассажиров. Графики построены вместе с разбором статей Б. И. Фираго.

Координатные оси следует читать  $\omega(t)$  и  $M(t)$ . Управление электроприводом осуществляется за счет линейного задания скорости идеального холостого хода  $\omega_0(t)$ . Воздействие на  $\omega_0(t)$  происходит изменением частоты питающего напряжения (ПЧ). При переходных процессах существует время задержки движения  $t_3$ , которое зависит от рабочих характеристик электродвигателя. Выход на динамических характеристики происходит после времени задержки. Второй этап — пересечение линейных характеристик в точке В. Отсюда время становится математически условным: оно рассматривается из условия  $0 \leq t' \leq t'_0$ , где  $t' = t - t_3$ ;  $t'_0 = t_0 - t_3$  (в условие времени включается время задержки движения). Третий этап позволяет сравнивать условность заданного времени с периодом в четыре электромеханические постоянные времени электропривода:  $0 \leq t'' \leq 4T_M$ , где  $t'' = t - t_0$ . То есть, дельта от величины скорости рассматривается в двух приближениях, при значениях времени в определенном соотношении к начальному ( $t_0$ ) и заданному ( $t$ ). Это позволяет построить графики переходных процессов электропривода, управляемого частотой.

Анализировать изображенные переходные процессы довольно просто. Считанные секунды отделяют момент коммутации от установившегося режима. Следует обратить внимание на прямоугольные формы, которые получаются при совмещении координатных плоскостей на каждом рисунке. После сбоя в электросети основные её показатели (токи и напряжения) приходят в норму не скачком, а постепенно затухающими «качелями», что на схемах хорошо заметно. Характер статической нагрузки двигателя симметричен при разных направлениях его движения. Поэтому в конструкции лифтов используют симметричные схемы электроприводов (сбалансированные и одинаковые по мощности элементы для управления движением вверх и вниз) и двухконцевые подъемные лебедки. Для уменьшения необходимой мощности приводного электродвигателя используют уравнивающие канаты и цепи. Схема углубляется, становится заметна разница (дельта), которую должен пройти асинхронный электродвигатель при включении в работу.

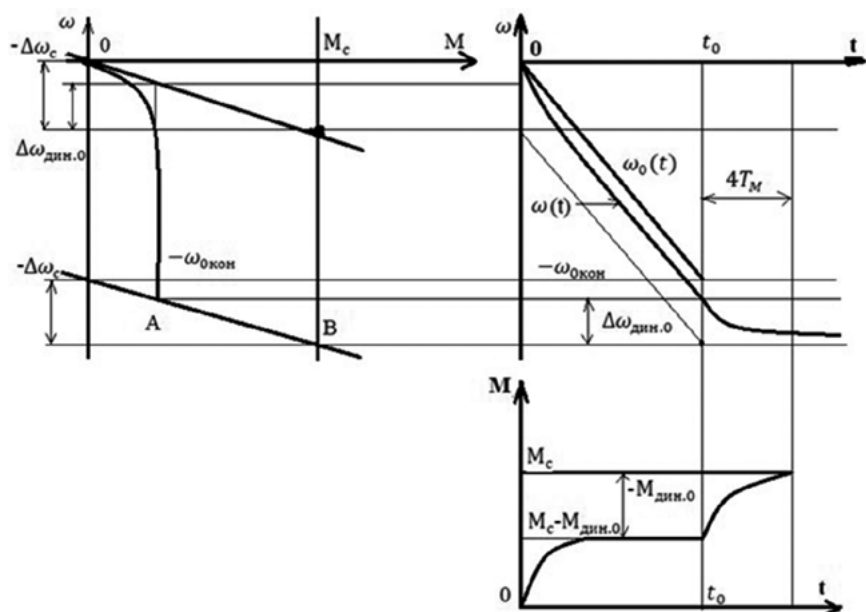
На рисунке 3 изображен график переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии на момент торможения лифта без пассажиров.

На рисунке 4 изображен график переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном



**Рисунок 3.** Торможение электропривода при  $M_c = \text{const}$  и  $M_{\text{дин.0}} < 0$ ;  $\omega_{0\text{нач}}$  — начальное значение угловой скорости идеального холостого хода (следует из тахограммы работы двигателя);  $t_{\text{кон}}$  — время, когда скорость двигателя достигнет нулевого значения

**Figure 3.** Braking of an electric drive with  $M_c = \text{const}$  and  $M_{\text{дин.0}} < 0$ ;  $\omega_{0\text{нач}}$  — initial value of the ideal no-load angular velocity (derived from the motor's tachogram);  $t_{\text{кон}}$  — time when the motor speed reaches zero



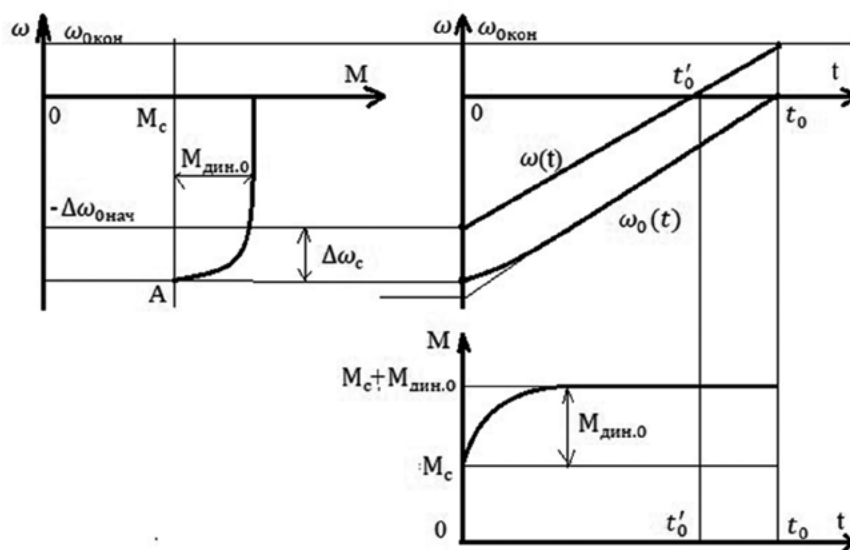
**Рисунок 4.** Разгон электропривода при опускании груза

**Figure 4.** Drive acceleration in the load lowering mode

управляющем воздействии на разгоне лифта вниз с пассажирами. При опускании груза электропривод переводится в режим противовключения поэтому на рисунке приведены графики двух параллельных линейных характеристик. В момент  $t = t_0$  достигается заданное значение скорости идеального холостого хода  $\omega_0(t) = -\omega_{0\text{кон}}$ ,

после которого переходный процесс подобен линейной механической характеристике АВ.

На рисунке 5 изображен график переходных процессов электропривода в системе ПЧ-АД при линейном управляющем воздействии при торможении лифта с пассажирами.



**Рисунок 5.** Торможение электропривода при опускании груза  
**Figure 5.** Braking of an electric drive during load lowering

При анализе графиков становится очевидным расход потерь мощности в переходных процессах. Для определения потерь мощности строится энергетическая диаграмма цикла работы механизма, которая может быть также использована при проверке двигателя по нагреву.

В режиме стоянки с работающим приводом потребление падает до  $-0,3-0,5$  кВт (эти энергопотери не зависят от этажности и являются минимальным энергопотреблением системы в состоянии ожидания вызова). Таким образом, суточный график представляет собой серию коротких, но высоких пиков, совпадающих с часами общедомовой максимальной нагрузки (утро, вечер), что создает значительную нагрузку на вводно-распределительное устройство здания.

**Потенциал рекуперации.** Безредукторный привод обеспечивает гораздо более эффективную, полную и технически реализуемую рекуперацию на всём диапазоне скоростей — от высоких до очень низких. Это связано с его физическим принципом действия (постоянные магниты, прямой привод) и высокоточным управлением, что и делает его современным стандартом для энергоэффективных лифтов. Способность к рекуперации у него значительно более эффективная и экономически оправданная. При движении груженной кабины вниз или порожней вверх система рекуперации активируется. Согласно техническим характеристикам, такой лифт может возвращать в сеть здания до 30–40% потребляемой за цикл энергии. Однако эффективность утилизации этой энергии без накопителя крайне низка — она может быть полезно потреблена только при наличии одновременного спроса других электроприемников

в здании, что происходит реже чем в 15–20% случаев. Остальная энергия рассеивается или ухудшает качество сети, демонстрируя необходимость ее локального аккумулирования [9]. Расчет для конкретной модели показывает, что за один полный цикл «подъем-спуск» может рекуперироваться 0,15–0,25 кВт·ч, что при интенсивности использования 150–200 циклов/сутки формирует технический потенциал экономии 25–40 кВт·ч/сутки на один лифт.

Для примера возьмем электродвигатель для лифта грузоподъемностью 1000 кг: мощность  $P=9$  кВт, скорость вращения  $n=980$  об/мин, номинальный ток  $I=15$  А. В качестве резервного источника питания используем аккумуляторную батарею номинальным напряжением  $U=10$  В. Из имеющихся данных можно оценить время, необходимое для обеспечения функционирования лифта от этой батареи [10].

Найдем пусковой ток аккумуляторной батареи по формуле:

$$I_{a.б.пуск} = P/U. \quad (8)$$

Получим  $I_{a.б.пуск} = 9000/10 = 900$  А.

Емкость аккумуляторной батареи можно определить по формуле:

$$C = t_{a.б.} \cdot I_{a.б.пуск}, \quad (9)$$

где  $t_{a.б.}$  — продолжительность работы, которую сопоставим с временем кругового рейса кабины для данного жилого дома  $T=207$  с, тогда  $t_{a.б.}=4$  мин. Вспомним, заданный цикл является минимальным, а в расчетах мы

записали число возможных остановок кабины на этажных площадках  $N=4$ , тогда максимальное время завершения полного цикла примем равным 16 минутам.

Чтобы воспользоваться таблицей «Время аварийной работы электропривода лифта типа ZIRCON грузоподъемностью 630 кг при разных емкостях батареи» [10, с. 6–7], уменьшим время продолжительности работы в 2 раза в связи с разной грузоподъемностью приведенных механизмов. В этом случае нам подойдет емкостная аккумуляторная батарея Bosch S5 013, емкость которой  $C=100$  А·час, или другой аналогичный аккумулятор.

Полученные данные позволяют составить представление о необходимой емкости батареи аккумулятора для обеспечения выполнения полного цикла работы лифта в жилом доме. В паспорте нашего Autors указано, что потребляемое напряжение может быть снижено на 10% при соответствии режимов работы выбранной модели. С системой рекуперации от батареи энергопотребление работающего лифта будет снижаться и далее.

#### КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «ЛИФТ + НАКОПИТЕЛЬ»

Принцип работы гибридной системы основан на интеграции накопителя энергии (НЭ) в цепь постоянного тока (DC-link) частотного преобразователя лифтового привода. В классической схеме с рекуперацией избыточная энергия, вырабатываемая двигателем в генераторном режиме, либо возвращается в сеть через инвертор, либо рассеивается на тормозном резисторе (R). Схема однофазного автономного мостового инвертора напряжения приведена на рисунке 6.

В предлагаемой модели этот резистор заменяется или дополняется управляемым накопительным блоком, подключенным к DC-link через двунаправленный преобразователь. На рисунке 7 представлена базовая схема электротехнического комплекса с гибридным накопительным блоком.

Работа НЭ циклична. В *цикле запасаения энергии* контроллер системы перенаправляет поток электроэнергии на заряд накопителя в режиме торможения, когда привод переходит в генерацию. Для этого используется встроенный DC/DC-преобразователь, стабилизирующий напряжение и ток заряда в соответствии с характеристиками НЭ. В случае применения суперконденсаторов заряд происходит почти мгновенно, что идеально соответствует короткому интервалу торможения (3–5 секунд).

При последующем запуске и разгоне лифта система управления в приоритетном порядке использует

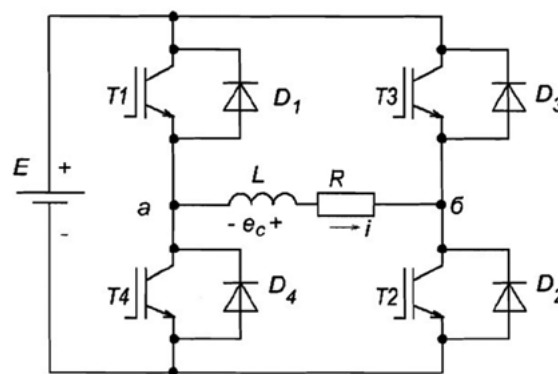


Рисунок 6. Схема однофазного автономного мостового инвертора (АИН)

Figure 6. Single-phase full-bridge voltage source inverter (VSI) circuit

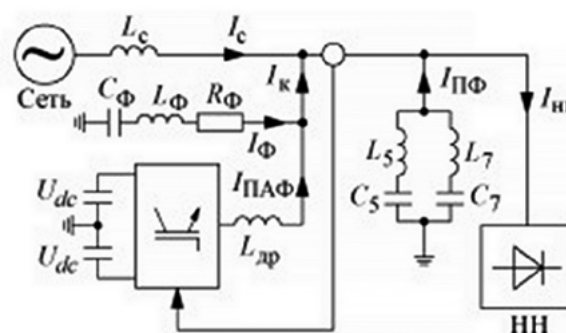


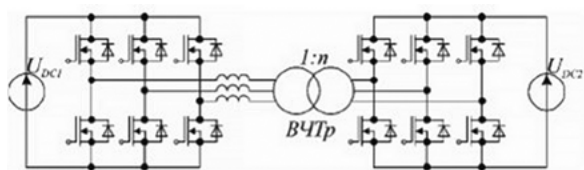
Рисунок 7. Базовая схема гибридного решения с фильтром [11, с. 125]

Figure 7. Basic hybrid topology with integrated filtering [11, p. 125]

запасенную в НЭ энергию, частично или полностью компенсируя пиковый ток от сетевого ввода, — НЭ переходит в *цикл отдачи энергии*. Преобразователь в обратном режиме обеспечивает передачу энергии из накопителя в DC-цепь привода, откуда она поступает на двигатель. Это позволяет «срезать» пиковую нагрузку и снизить максимальную потребляемую из сети мощность на 40–60%. Именно такой показатель возврата заявлен в технологии Weg фирмы ОТИС. Таким образом, социальный лифт с меньшим энергопотреблением становится выгодно использовать. А установка системы рекуперации надежно обеспечивает работоспособность лифта в аварийном режиме.

Примерно такой же процент выделенной без аккумуляции энергии может давать перегрузку сети лифтом в часы пик. Поэтому при реализации современной модели использования должна осуществляться ее *интеграция с нуждами здания*. В периоды низкой активности лифтов (например, ночью) накопленная энергия может быть направлена через отдельный инвертор на питание





**Рисунок 8.** Упрощенная схема DC/DC-преобразователя [12, с. 815]

**Figure 8.** Simplified schematic representation of a DC-to-DC power converter [12, p. 815]

общедомовых систем постоянного потребления: аварийного освещения, систем вентиляции, серверного оборудования. Таким образом, система функционирует как *дополнительный источник энергии для всего здания*, повышая общий коэффициент использования энергии и обеспечивая резерв.

Лифт Autors обладает подходящим энергетическим портретом для установки системы рекуперации. Его интеграция в систему «Умный дом» Санкт-Петербурга позволит точнее проанализировать данные с работающего накопителя. Концептуальная модель делает лифтовую установку автономным энергетическим узлом, минимизирующим не только собственное, но и общедомовое воздействие на распределительную сеть.

#### ВАРИАНТЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ К ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Интеграция накопителя энергии (НЭ) осуществляется в промежуточное звено постоянного тока (DC-link) частотно-регулируемого электропривода, расположенное между сетевым выпрямителем и силовым инвертором, управляющим двигателем. Существует два основных варианта подключения, определяющих функциональность и стоимость системы.

**Прямое параллельное подключение к DC-звну.** В этой схеме накопитель (чаще всего суперконденсаторный модуль) через контактор и систему балансировки ячеек подключается непосредственно к шинам постоянного напряжения (обычно 540–600 В). При рекуперации энергия поступает на шины и заряжает накопитель. При разгоне он отдает энергию, поддерживая напряжение в звене. Схема проста и обеспечивает минимальные потери, но требует точного согласования напряжений и не позволяет гибко управлять мощностью заряда/разряда.

**Подключение через двунаправленный DC/DC-преобразователь.** Это более совершенный вариант преобразователя, способный выполнять импульсное преобразование постоянного напряжения (DC) одной величины в другую. Накопительный элемент (НЭ), состоящий из суперконденсатора или литий-ионной батареи с более низким напряжением, подключается к DC-звну через управляемый преобразователь. Он обеспечивает стабилизацию напряжения, оптимальный профиль заряда/разряда и полное управление потоками мощности независимо от текущего напряжения в DC-звене. Это позволяет использовать широкий спектр накопителей и реализовать сложные алгоритмы, в том числе отдачу энергии на сторонние нагрузки. На рисунке 8 изображена упрощенная электрическая схема двунаправленного мостового преобразователя. ВЧТр — трехфазный высокочастотный трансформатор.

В целом, обе схемы имеют свои преимущества. Выбор схемы зависит от типа накопителя, требуемой функциональности и экономических ограничений. В статье [13] представлены критерии выбора систем хранения энергии, призванные помочь лицам, принимающим решения, в выборе наиболее подходящего устройства хранения энергии для их задач. В таблице 2 приведены полезные сведения для ориентации по параметрам между суперконденсатором и несколькими видами накопительных батарей.

**Таблица 2.** Характеристики суперконденсатора и батареи [14, с. 3]

**Table 2.** Supercapacitor and battery characteristics [14, p. 3]

| Параметр                     | Ед. изм. | Суперконденсатор | Батарея, основанная на: |           |             |            |
|------------------------------|----------|------------------|-------------------------|-----------|-------------|------------|
|                              |          |                  | Свинец                  | Никель    | Натрий      | Литий      |
| Напряжение ячейки            | В        | 2,7              | 2                       | 1,2       | 2–2,5       | 3,5        |
| Удельная энергия             | Вт·ч/кг  | 4,3              | 30–35                   | 50–80     | 90–130      | 80–200     |
| Удельная мощность            | Вт/кг    | 4300             | 70–130                  | 175–700   | 100–160     | 140–1000   |
| Энергетическая эффективность | %        | 92               | 70–85                   | 60–85     | 80–90       | 85–95      |
| Жизненный цикл               |          | 500 000          | 600–1000                | 1500–2000 | 600–1000    | >1000      |
| Стоимость                    | €/кВт·ч  | 6000–12 000      | 100–150                 | 300–500   | 150–400     | 100–200    |
|                              | €/кВт    | 9–17             | 12–15                   | 52–54     | 248–281     | 44–52      |
| Рабочая температура          | °С       | – 40...+65       | 0...+45                 | 0...+50   | +300...+350 | – 40...+60 |



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внедрение накопителя энергии в шахте лифта приводит к трем ключевым положительным эффектам, кардинально меняющим его взаимодействие с электросетью здания: сглаживанию пиков нагрузки, снижению мощности ввода, повышению КПД системы. Рассмотрим их подробнее.

Накопитель, выступая в роли буфера, мгновенно компенсирует самый энергоёмкий этап работы — пуск двигателя. Вместо потребления 18–22 кВт от сети система использует запасенную энергию, «срезая» пик. На графике нагрузки здания это преобразует характерные высокие импульсы лифта в плавную кривую с амплитудой, не превышающей 6–8 кВт, что снижает динамическую нагрузку на кабели и оборудование.

Способность накопителя покрывать пиковую мощность позволяет уменьшить максимальную нагрузку от лифтовой установки на вводно-распределительное устройство (ВРУ) здания. Это даст возможность снизить договорную мощность с энергосбытовой компанией на 15–25% без ущерба для комфорта, что приводит к прямой и постоянной экономии на основной составляющей тарифа.

В предложенной схеме подключения к электрической сети накопителей реализуется метод использования рекуперированной энергии. Эффективность утилизации тормозной энергии возрастает с 15–20% (при простой рекуперации в сеть) до 60–70%. Накопленная энергия не пропадает, а совершает полезную работу, сокращая чистое потребление из сети на 25–35% по сравнению с лифтом, имеющим только регенеративный привод. Таким образом, система перестает быть проблемным потребителем, становясь элементом энергосбережения.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ

**Расчёт потенциала энергосбережения за счёт рекуперации с суперконденсаторным накопителем, размещённым в шахте.** Для оценки экономического эффекта внедрения системы рекуперативного торможения с суперконденсаторным накопителем, интегрированным в шахту лифта, проведён сравнительный анализ энергопотребления стандартной и модернизированной систем.

Для моделирования энергопаспорта лифта в 17-этажном доме примем за исходные следующие данные (взяты из технического паспорта лифта Autors):

- Грузоподъёмность,  $Q$ : 1000 кг.
- Масса кабины,  $m_k$ : 1200 кг.
- Масса противовеса,  $m_n = m_k + 0,5Q = 1700$  кг.
- Высота подъёма,  $H$ : 50 м.
- Номинальная скорость,  $v$ : 1,6 м/с.

- Средняя эксплуатационная нагрузка при движении вниз,  $L_{cp}$ : 650 кг.
- Суточное количество рабочих циклов (подъём-спуск),  $N$ : 280.
- КПД привода в двигательном режиме,  $\eta_{дв}$ : 0,85.
- КПД привода с суперконденсаторным буфером в рекуперативном режиме,  $\eta_{рек}$ : 0,78.

Произведем на основе этих данных **расчёт энергопотребления за цикл стандартной системой** (без рекуперации). Энергия, затрачиваемая на подъём кабины со средней нагрузкой  $L_{cp}$ :

$$A_{под} = \frac{(m_k + L_{cp} - m_n) \cdot g \cdot H}{\eta_{дв}} \quad (10)$$

$$A_{под} = \frac{(1200 + 650 - 1700) \cdot 9,81 \cdot 50}{0,85} = 86,5 \text{ кДж} = 0,024 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Энергия, рассеиваемая в тормозных резисторах при спуске:

$$A_{сnc} = (m_k + L_{cp} - m_n) \cdot g \cdot H \cdot \eta_{дв} \quad (11)$$

$$A_{сnc} = (1200 + 650 - 1700) \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,85 = 62,5 \text{ кДж} = 0,017 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Суммарное энергопотребление стандартного цикла:

$$A_{цикл ст} = A_{под} + A_{сnc} = 0,024 + 0,017 = 0,0412 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следующим шагом будет **расчёт энергопотребления за цикл системой с рекуперацией в суперконденсатор**. При подъёме часть энергии (до 40% от  $A_{под}$ ) берётся из заряженного накопителя, что снижает потребление из сети. При спуске энергия рекуперирована. Тогда энергия из сети на подъём с использованием буфера:

$$A_{под рек} = A_{под} \cdot 0,6 = 0,024 \cdot 0,6 = 0,0144 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

А рекуперация при спуске (с учётом потерь в накопителе):

$$A_{рек нак} = (m_k + L_{cp} - m_n) \cdot g \cdot H \cdot \eta_{дв} \quad (12)$$

$$A_{рек нак} = (1200 + 650 - 1700) \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,78 = 57,4 \text{ кДж} = 0,0158 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Данная энергия аккумулируется и используется в следующем цикле.

В продолжение рассуждений рассчитаем эффективное энергопотребление из сети за цикл:

$$A_{цикл ст} = A_{под рек} = 0,0144 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Проведем сравнительный анализ и попробуем вычислить **потенциал экономии**. Так, экономия энергии за один цикл:

$$\Delta A_{цикл} = A_{цикл ст} - A_{цикл рек} = 0,0412 - 0,0144 = 0,0268 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Относительная экономия за цикл:



$$\varepsilon_{\text{цикл}} = \left( \frac{\Delta A_{\text{цикл}}}{A_{\text{цикл ст}}} \right) \cdot 100\% . \quad (13)$$

$$\varepsilon_{\text{цикл}} = \left( \frac{0,0268}{0,0412} \right) \cdot 100\% = 65\% .$$

В наших допущениях сделаем поправки с учётом реального профиля нагрузок и потерь. В реальной эксплуатации не все циклы являются рекуперативными (движение вниз с нагрузкой менее 500 кг требует энергии). С учётом статистики пассажиропотока и КПД всей цепи эффективная суточная экономия снижается. Принимаем поправочный коэффициент  $k=0,45$ , учитывающий долю рекуперативных циклов, саморазряд накопителя и неидеальность управления.

Рассчитаем также суточную и годовую экономию. Суточная экономия при  $N=280$  циклах:

$$\Delta E_{\text{сут}} = \Delta A_{\text{цикл}} \cdot N \cdot k. \quad (14)$$

$$\Delta E_{\text{сут}} = 0,0268 \cdot 280 \cdot 0,45 = 3,377 = 3,377 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Годовая экономия (365 дней):

$$\Delta E_{\text{год}} = 3,377 \cdot 365 = 1232,532 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Среднесуточное потребление стандартной системы:

$$E_{\text{сут ст}} = A_{\text{цикл ст}} \cdot N. \quad (15)$$

$$E_{\text{сут ст}} = 0,0412 \cdot 280 = 11,536 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Получается, что итоговая относительная экономия энергии

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta E_{\text{сут}}}{E_{\text{сут ст}}} \right) \cdot 100\% . \quad (16)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{3,377}{11,536} \right) \cdot 100\% = 29\% .$$

Ключевыми факторами, влияющими на достижение этого показателя, являются оптимизация алгоритмов управления для максимизации доли рекуперативных циклов и использование накопителей с высоким КПД и скоростью заряда/разряда.

На основании проведённых расчётов определим **ключевые требования** к накопителю энергии, размещаемому в лифтовой шахте. Получается, что требуемая запасаемая энергия за цикл:  $E_{\text{цикл}} \approx 0,0158 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  ( $\approx 54 \text{ кДж}$ ); пиковая электрическая мощность рекуперации:  $P_{\text{пик}} \approx 3,3 \text{ кВт}$ ; рабочее напряжение DC-шины преобразователя:  $U_{\text{ном}} \approx 400 \text{ В}$  (стандарт для частотных приводов средней мощности).

Произведем **расчёт минимальной необходимой ёмкости** НЭ. Для диапазона рабочих напряжений от  $U_{\text{max}}=400 \text{ В}$  до  $U_{\text{min}}=200 \text{ В}$  минимальная ёмкость определяется по формуле:

$$C_{\text{min}} = \frac{2 \cdot E_{\text{цикл}}}{U_{\text{max}}^2 - U_{\text{min}}^2} . \quad (17)$$

$$C_{\text{min}} = \frac{2 \cdot 54000}{400^2 - 200^2} = 0,9 \text{ Ф} .$$

С учётом запаса (20–30 %) для сохранения характеристик и компенсации деградации  $C_{\text{треб}} = 1,1 \text{ Ф}$  при 400 В.

Как пример может быть рассмотрен отечественный модуль НК-58-125М (производитель — группа компаний «ТЭЭМП»). Параметры одного модуля НК-58-125М:

- Номинальное напряжение: 125 В.
- Номинальная ёмкость: 58 Ф (допуск  $\pm 20\%$ ).
- Максимальный ток (импульсный): 600 А.
- Сопротивление постоянному току (ESR):  $\leq 14 \text{ мОм}$ .
- Габариты (Д×Ш×В):  $\sim 410 \times 135 \times 180 \text{ мм}$ , масса  $\sim 12,5 \text{ кг}$ .

С учетом приведенных значений, требуемые параметры накопителя (ёмкость  $\sim 1,1 \text{ Ф}$  при 400 В) могут быть обеспечены сборкой из двух последовательно соединённых отечественных модулей типа НК-58-125М. Такое решение обеспечивает многократный запас по энергии и мощности, гарантируя долговечность системы:

- эквивалентное номинальное напряжение: 250 В;
- эквивалентная ёмкость  $C_{\text{экв}} = 58 \text{ Ф} / 2 = 29 \text{ Ф}$ ;
- запасаемая энергия в диапазоне 250–125 В:  $E = 0,5 \times 29 \times (250^2 - 125^2) \approx 683 \text{ 000 Дж} \approx 0,19 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . Данный объём энергии более чем в 13 раз превышает потребность одного цикла, что создаёт значительный буфер;
- доступная мощность ограничивается током бортового инвертора (обычно 80–100 А), что при напряжении 250 В даёт мощность до 25 кВт, которая с избытком покрывает пиковую потребность в 3,3 кВт.

Использование модулей производства СНГ также может дать преимущества в логистике, сервисном обслуживании и адаптации под конкретные требования проектов в регионе. Размещение подобной сборки в шахте или машинном помещении технически выполнимо.

Произведем **ориентировочный расчёт стоимости и окупаемости** системы рекуперации. Начнем с учета капитальных затрат (CapEx).

Примерная стоимость 2 модулей НК-58-125М — 250 000 руб. (с учётом рынка СНГ). Ориентировочная стоимость DC/DC-преобразователя — 150 000 руб. Монтаж, пусконаладка, интеграция в сумме будут стоить еще порядка 100 000 руб.

Итого, ориентировочные капитальные вложения  $K \approx 500 \text{ 000 руб.}$



Годовая экономия (OpEx) складывается из двух частей: а) снижение платы за пиковую мощность, б) снижение потребляемой энергии. Проведем приблизительный расчет.

а) Система с буфером снижает пиковую нагрузку на сеть от лифта минимум на 3–4 кВт. При месячной ставке на пиковую мощность в 400–600 руб./кВт (актуально для коммерческих тарифов), годовая экономия составит:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{пик}} &= \Delta P_{\text{пик}} \times \text{ТАРИФНЫЙ}_{\text{пик}} \times 12 \text{ месяцев.} \\ \mathcal{E}_{\text{пик}} &= 4 \text{ кВт} \cdot 500 \text{ руб./кВт} \cdot 12 = 24000 \text{ руб./год.}\end{aligned}$$

б) По предыдущим расчётам, годовая экономия электроэнергии составляет ~1232,532 кВт·ч. При среднем тарифе 6 руб./кВт·ч:

$$\mathcal{E}\mathcal{E} = 1232,532 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 6 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч} \approx 7395,192 \text{ руб./год}$$

Значит, суммарная годовая экономия:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 7395,192 + 24000 = 31395,192 \text{ руб.}$$

Рассчитаем срок окупаемости предложенного решения по формуле:

$$T = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{год}}}. \quad (18)$$

$$T = 500000 \text{ руб.} / 31395,192 \text{ руб./год} = 15,9 \text{ года.}$$

Приведённый расчёт показывает, что основной экономический эффект обеспечивается за счёт снижения платы за пиковую мощность (около 78% от общей экономии). Однако даже с её учётом срок окупаемости капиталоемкого решения на суперконденсаторах остаётся большим (>15 лет). Это делает проект экономически целесообразным при соблюдении следующих условий:

- высокие штрафные тарифы за пиковую мощность;
- система рекуперации включена в общую концепцию здания (в новых энергоэффективных зданиях);
- применение более дешёвых накопительных технологий — или серийное внедрение, которое снизит удельную стоимость.

Для массового жилого фонда окупаемость подобной системы без существенных дотаций сомнительна, однако для высотных коммерческих помещений будет значительной. Преимуществом нашего Autors является возможность подключить его к городской системе «Умный дом», в этом случае можно будет тестировать систему рекуперации в рамках обновления концепции энергоэффективности нашего города.

#### АНАЛИЗ БАРЬЕРОВ И РИСКОВ ВНЕДРЕНИЯ

В секторе лифтостроения говорят о существующих рисках модернизации. Более 50% введенного в эксплуатацию лифтового оборудования служит дольше своего

предельного срока эксплуатации (25 лет). «Ежегодно необходимо ремонтировать не одну сотню лифтов, реально конструируется значительно меньше. Нарастающая изношенность лифтового парка не может не вызывать озабоченность и тревогу» [15, с. 3]. Параллельно набирает силу процесс интеграции систем диспетчерского контроля с глобальными проектами «Умный дом» и «Умный город» (ГОСТ IEC 60950-1-2014 «Оборудование информационных технологий. Требования безопасности. Часть 1. Общие требования») инженерами-системотехниками. Модернизация систем диспетчерского контроля должна производиться при надежной работе эксплуатируемого оборудования. В противном случае следует внедрять системы безопасности [ПЭССБ (PESSRAL)], создавать экспертные группы по ГОСТ Р 53387-2009: «Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры. Методология анализа и снижения риска».

Одно интернет-издание прямо ставит вопрос, следует ли модернизировать лифтовые установки или менять их [16]. При таком понимании проблемы говорить об экономической эффективности от мероприятий на данном этапе нужно с оговорками. Пока в перспективе высокие капитальные затраты на раннем этапе, неопределенность тарифной политики.

Вызывает настороженность нормативное поле — отсутствие прямых стандартов для таких гибридных систем в лифтовых нормах (ТР ТС 011/2011, ГОСТ Р 53780-2010) и правилах устройства электроустановок (ПУЭ).

Технически размещение в шахте дополнительного оборудования предполагает повышенные меры его безопасной эксплуатации. К негативным факторам, становящимся причиной выхода из строя технических объектов, можно отнести резко меняющуюся температуру, вибрации и др. Поэтому необходимость большей надежности дополнительного оборудования является важным условием его внедрения и использования в урбанистической среде.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день технологии генерации, хранения энергии с низкими генерирующими затратами являются востребованными и ожидаемыми в отрасли лифтостроения. Освоение рекуперативных способностей работы привода с возвратом в сеть технически осуществимо и дает прямой энергетический эффект, как показали и приведенные в данной статье исследования. Подтверждением стал составленный энергопаспорт для лифта Autors, позволяющий экономить электроэнергию на 29% в среднем за цикл работы. Была также предложена концептуальная модель работы сети лифта с накопителем энергии. Экономический расчет показал



постепенную окупаемость похожих моделей, которая будет идти параллельно развитию накопителей энергии.

Главный барьер: компании не всегда согласны модернизировать старый фонд лифтового оборудования. Высокая стоимость замены готовой кабины, с одной стороны, и ненадежность старых проложенных энергосетей для внедрения сложных технических решений, с другой, при текущих ценах на электроэнергию отдалают перспективу развития накопительной среды для механизмов подъема в жилых домах. Хотя мировые лидеры в этой области ведут разработки подобного оборудования для массового внедрения, и у российской промышленности тоже есть хороший потенциал. Распространению рекуперативных технологий может способствовать снижение цены на суперконденсаторы.

Пилотные проекты пока затрагивают лишь отдельные аутворки в премиальном сегменте. Плановое включение технологии в новое строительство подтолкнет нормативную базу к разработке новейших отечественных стандартов.

**Рекомендации.** Современные технологии в области рекуперативного использования энергии предлагают ряд высокотехнологических решений. Накопление выделенной в сети электропривода энергии производится в суперконденсаторах. Распределение энергии между различными источниками обеспечивает энергоаутер, построенный по технологии Smart Grid-ready. Нововведение обеспечивает распределение в генерации, компенсацию пиковых нагрузок и бесперебойное рабочее питание автоматизированного электропривода. Это способствует покрытию дефицита мощности в электросетях и балансирует нагрузки. Сегодня подключение к технологии «Умный дом» доступно для новых зданий с цифровым управлением Smart Grid-ready. Рассчитанный в данной статье энергопаспорт лифта может быть рассмотрен в качестве аргумента для подключения современных лифтов (и нашего лифта Autors) к прогрессивным автоматизированным платформам города.

## ПЕРСПЕКТИВЫ

Одним из прямых факторов роста доли накопителей электроэнергии на внутреннем рынке станет рост спроса на пиковую мощность. Также есть потребность в увеличении скорости заряда накопителя, быстрый цикл заряда-разряда достигнут в технологии «литий-титан» (LTO) [18].

В современных условиях цифровизации и децентрализации энергетики накопители в лифтовых шахтах перестают быть лишь средством оптимизации отдельного электроприемника. Они становятся ключевыми

элементами распределенной энергетики, а лифтовые системы — активными участниками локальных микросетей (Microgrid) здания или группы зданий.

Технология рекуперации будет активно развиваться. Предпосылкой к этому является высокая потребность энергосберегающих технологий в промышленных производствах.

## Список литературы

1. Подмосковные лифты с рекуперацией снизят энергозатраты примерно до 35% // Сайт Правительства Московской области. 09.12.25. URL: <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/news-submoscow/podmoskovnye-lifty-s-rekuperaciei-snizyat-energozatraty-primerno-do>.
2. Marsong S., Plangklang B. Implementation analysis of an elevator energy regenerative unit (EERU) for energy saving in a building. In Proceedings of the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand, 28 June — 1 July 2016. DOI: 10.1109/ECTICon.2016.7561421.
3. Лысенко Т. В., Кураусов А. Ж. Энергоэффективные технологии в лифтостроении / Шаг в науку: механика и машиностроение. 2016. № 1. С. 154–157.
4. Kermani M., Shirdare E., Abbasi S., Parise G., Martirano L. Elevator regenerative energy application with ultracapacitor and battery energy storage systems in complex buildings. In Proceedings of the 2021, 14 (11) Department Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Gothenburg, Sweden, Department of Astronautical, Electrical and Energy Engineering (DIAEE), Sapienza University of Rome. Energies, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113259>.
5. Аверин А. И. Суперконденсаторы и их применение в блоках рекуперации энергии в производстве современных лифтов // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 6. Ч. 2. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/06/54602>.
6. Meyer G. Hybrid and Electric Vehicles. The Electric Drive Automates // Meyer G., Dokic J., Jurgens H., Buhler L. International Energy Agency HEV TCP. Sep. 2018. p. 414.
7. Декларация соответствия от ASIA SIGMA ELEVATOR COMPANY LTD: <https://xn--7sbajahheyaepn1ca0aveqcb0fkl.xn--p1acf/kompaniya/asia-sigma-elevator-company-ltd-cn>.
8. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 43. С. 5–28. DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01.
9. Виниченко В. Н. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям обеспечения энергоэффективности / Виниченко В. Н., Гашио Е. Г., Гусева Т. В., Дмитриев Е. А., Панкина Г. В. Федеральное агентство



- по техническому регулированию и метрологии. 2009. 489 с. URL: [https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/energo\\_1303\\_1.pdf](https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/energo_1303_1.pdf).
10. Квашина Г. В., Чащин Е. А., Борзов С. Р., Ефремов В. Г. Резервирование электропитания лифтового оборудования // Вестник евразийской науки. 2015. № 5 (30). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/216TVN515.pdf>.
  11. Сычев Ю. А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий / СПГУ. СПб., 2021. 365 с.
  12. Воробьев К. А. Система двунаправленных преобразователей электрической энергии в сетях ограниченной мощности / Воробьев К. А., Поляков Н. А., Стжелецки Р.: Вестник ГУМРФ. Т. 12, № 4, 2020. С. 812–822. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-dvunapravlennyh-preobrazovateley-elektricheskoy-energii-v-setyah-ogranichennoy-moschnosti/viewer>.
  13. Elalfy D. A., Gouda E., Kotb M. F., Bureš V., Sedhom B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Ecology Daily News*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
  14. Van Mulders F., Timmermans J.-M., McCaffrey Z., Van Mierlo J., Van den Bossche P. «Supercapacitor Enhanced Battery Traction Systems — Concept Evaluation». *The World Electric Vehicle Journal*, 2008, 2 (2), 120–133; <https://doi.org/10.3390/wevj2020120>. (Также в пер. с англ., URL: <https://titanps.ru/upload/iblock/e92/6xpuqm0vvt9evrcxf73attidmoo01tb.pdf> (дата обращения 11.11.2025)).
  15. Бадагуев Б. Т. Лифты и другие подъемные механизмы: практическое пособие / Б. Т. Бадагуев. 3-е изд., перераб. и доп. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 404 с.
  16. Чем модернизация отличается от капитального ремонта? // ООО «Афонская Лифтовая Компания»: официальный сайт. URL: <https://www.afonska.ru/staty/modernizatsiya-ili-zamena-lifta>.
  17. Рекуперация энергии в промышленных приводах // «INNER»: Производство и поставка промышленных комплектов: официальный сайт. URL: <https://inner.ru/articles/rekuperatsiya-energii-v-promyshlennykh-privodakh>.
  18. Экспертно-аналитический отчет «Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры» / Под ред. Д. В. Холкина. Москва: Инфраструктурный центр EnergyNet, 2019. 158 с.
  - the 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand. DOI: 10.1109/ECTICon.2016.7561421.
  3. Lysenko T. V., & Kuraisov A. Z. (2016). Energy-efficient technologies in elevator engineering. *Step into Science: Mechanics and Mechanical Engineering*, (1), 154–157.
  4. Kermani M., Shirdare E., Abbasi S., Parise G., & Martirano L. (2021). Elevator regenerative energy application with ultracapacitor and battery energy storage systems in complex buildings. *Energies*, 14 (11), 3259. <https://doi.org/10.3390/en14113259>.
  5. Averin A. I. (2015). Supercapacitors and their application in energy recovery units in the production of modern elevators. *Modern Scientific Research and Innovation*, (6, Part 2). URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/06/54602>.
  6. Meyer G., Dokic J., Jurgens H. & Buhler L. (2018, September). Hybrid and electric vehicles. The electric drive automates. In *International Energy Agency HEV TCP* (p. 414).
  7. Declaration of Conformity from ASIA SIGMA ELEVATOR COMPANY LTD. URL: <https://xn----7sbajahheyacpn1ca0aveqcb0fxl.xn--p1ac/kompaniya/asia-sigma-elevator-company-ltd-cn>.
  8. Katsay A. V. & Shevlyugin M. V. (2022). Conversion of regenerative energy in urban electric transport. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems*, (43), 5–28. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.01.
  9. Vinichenko V. N., Gasho E. G., Guseva T. V., Dmitriev E. A., & Pankina G. V. (2009). *Reference document on the best available techniques for ensuring energy efficiency*. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. URL: [https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/energo\\_1303\\_1.pdf](https://www.petroleumengineers.ru/sites/default/files/energo_1303_1.pdf).
  10. Kvashina G. V., Chashchin E. A., Borzov S. R. & Efremov V. G. (2015). Backup power supply for elevator equipment. *Bulletin of Eurasian Science*, (5 (30)). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/216TVN515.pdf>.
  11. Sychev Yu. A. (2021). *Filter compensating devices with active converters for improving power quality in electrical complexes of oil and gas enterprises*. Saint Petersburg Mining University.
  12. Vorobyov K. A., Polyakov N. A. & Strzelecki R. (2020). System of bidirectional electric energy converters in limited power networks. *Bulletin of the State University of Maritime and River Fleet*, 12 (4), 812–822. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-dvunapravlennyh-preobrazovateley-elektricheskoy-energii-v-setyah-ogranichennoy-moschnosti/viewer>.
  13. Elalfy D. A., Gouda E., Kotb M. F., Bureš V., Sedhom B. E. (2024). Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>.
  14. Van Mulders F., Timmermans J.-M., McCaffrey Z., Van Mierlo J. & Van den Bossche P. (2008). Supercapacitor enhanced battery traction systems — Concept evaluation. *The World Electric Vehicle Journal*, 2 (2), 120–133. <https://doi.org/10.3390/wevj2020120>.

## References

1. Moscow region lifts with regeneration to reduce energy consumption by up to 35%. *Website of the Moscow Region Government*. December 9, 2025. URL: <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/news-submoscow/podmoskovnye-lifty-s-rekuperaciei-snizyat-energozatraty-primerno-do>.
2. Marson S., & Planklang B. (2016, June 28 — July 1). Implementation analysis of an elevator energy regenerative unit (EERU) for energy saving in a building. In *Proceedings of*



doi.org/10.3390/wevj2020120 (Also available in Russian translation: URL: <https://titanps.ru/upload/iblock/e92/6xpuqm0vvt9evrcxf733attidmoo01tb.pdf> (Accessed: November 11, 2025).

15. Badagiev B. T. (2023). *Elevators and other lifting mechanisms: A practical guide* (3rd ed., revised and expanded). Infra-Engineering.
16. What is the difference between modernization and major repairs? *Afonskaya Liftovaya Kompaniya LLC: Official Website.*

URL: <https://www.afonska.ru/staty/modernizatsiya-ili-zame-na-lifta>.

17. Energy recovery in industrial drives. *INNER: Production and Supply of Industrial Components: Official Website.* URL: <https://inner.su/articles/rekuperatsiya-energii-v-promyshlennykh-privodakh>.
18. Kholkin D. V. (Ed.). (2019). *Expert analytical report: Application of energy storage systems in Russia: Opportunities and barriers.* EnergyNet Infrastructure Center.

## ■ Информация об авторе

**Дронов Владимир Олегович**, студент, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4;

а также инженер в ООО «ЦЭПуКС», Санкт-Петербург, Поэтический бульвар, д. 2; ORCID: 0009-0002-4177-3651, e-mail: [vvvdr@mail.ru](mailto:vvvdr@mail.ru).

## ■ Information about the author

**Vladimir Olegovich Dronov**, student of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street,

St. Petersburg, 198095, Russia, and engineer at LLC «CEPCA», St. Petersburg, Poetichesky Boulevard, 2; ORCID: 0009-0002-4177-3651, e-mail: [vvvdr@mail.ru](mailto:vvvdr@mail.ru).