



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ДИЗАЙНА



ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ

ISSN 3033-7852

ТЕХНОЛОГИЯ и ЭНЕРГЕТИКА

№02 (02) 2026

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



«Глубокая интеграция образования и науки с индустрией — ключевое условие для обеспечения технологического суверенитета страны».

П. В. Луканин

8 Исследование влияния композиции волокон на свойства сепараторной бумаги

16 Особенности разработки и изготовления зубчатых колес с помощью стереолитографической печати

59 Определение скорости осаждения механических примесей в предварительном цикле водоподготовки



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ДИЗАЙНА



ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ

ТЕХНОЛОГИЯ *и* ЭНЕРГЕТИКА

02 (02) 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

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;
- 2.6.10 Технология органических веществ;
- 2.4.1 Теоретическая и прикладная электротехника;
- 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы;
- 2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника.

Адрес редакции: 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 26.06.2026. Формат 62×94 1/8. Бумага кн.-журн. Усл.-печ. л. 9,5.

Цена: Бесплатно.

12+

Тираж 80 экз. Заказ № 161

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2026



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ, ДОРОГИЕ СТУДЕНТЫ, АСПИРАНТЫ И ПАРТНЕРЫ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ!

Перед вами второй номер нашего научного журнала «Технология и энергетика». Когда мы задумывали этот проект, то видели в нем не просто сборник статей, а живую лабораторию мысли, мост между фундаментальной наукой и теми технологическими вызовами, которые индустрия бросает нам каждый день. Первый номер задал высокую планку, и я рад, что мы не снижаем оборотов. Напротив, география редколлегии расширилась, а глубина проработки материалов, по моему убеждению, выросла.

Почему сегодня как никогда важен диалог между механиками, энергетиками, экономистами и материаловедом? Потому что старые модели управления ресурсами исчерпали себя. Мы вступаем в эпоху, где эффективность измеряется не просто в тоннах переработанного сырья или киловатт-часах, а в способности системы адаптироваться к новым реалиям: импортозамещению в машиностроении, водоподготовке и цифровизации производства.

Что вы найдете в этом номере? Прежде всего, прикладные инженерные решения. **И. В. Ключкин и П. В. Кауров** в статье «Совершенствование конструкции и компоновки гидропланок на бумагоделательных машинах» предлагают конкретные способы повышения обезвреживающей способности сеточного стола. Это та самая работа, где расчеты напрямую ведут к снижению энергозатрат на тонну продукции. Не менее актуальна для целлюлозно-бумажной отрасли и публикация **Е. И. Симоновой, В. К. Дубового и Е. Ю. Демьянцевой** «Исследование влияния композиции волокон на свойства сепараторной бумаги» — сегодня, когда рынок аккумуляторных материалов растет, наши компетенции в области специальных видов бумаги становятся стратегическим ресурсом.

Особый блок номера посвящен управлению качеством и надежности. Статья **М. Д. Анисимовой и В. Н. Сурикова** «Оценка подавления системой управления возмущающих воздействий на вес бумажного полотна» — это ответ на вечную боль технологов: как удержать стабильность граммажа при скачках давления в массе и скорости машины. Рядом с ней работа **В. Г. Злобина, Б. А. Вороненко, В. В. Пеленко и А. М. Хлыновского** «Решение задачи водоподготовки методом механической очистки» — казалось бы, классика, но авторы нашли

нестандартный подход к подбору фильтроэлементов для сложных сырых вод, что критически важно для ТЭЦ и целлюлозных заводов.

Энергетическое направление в этом номере представлено фундаментально. **А. Д. Ширяев и В. Г. Злобин** (второй раз в этом выпуске, и это говорит о высокой продуктивности нашей научной школы!) в статье «Методология применения регрессионного и факторного анализа в системе эксплуатации тепловых электростанций» дают инструмент, который позволяет не просто фиксировать отклонения параметров, а прогнозировать их причины. Для практиков, которые ежедневно решают задачу экономии, мы публикуем материал профессора **А. П. Дзюбы** «Классификация направлений оптимизации затрат на потребление электроэнергии промышленными предприятиями» — без воды, только таксономия конкретных мер для энергоменеджеров.

Отдельная гордость этого номера — работы на стыке дисциплин. В статье **К. А. Лезина и Н. П. Мидукова** «Особенности разработки и изготовления зубчатых колёс с помощью стереолитографической печати» наши инженеры-механики делятся опытом, как аддитивные технологии сокращают сроки ремонта редукторов БДМ с недель до суток. А статья **В. О. Дронова** «Метод верификации срабатывания контактной схемы D-триггером на примере автомата Мура в пассажирском лифте» — это блестящий пример того, как дискретная математика и схемотехника решают реальную задачу безопасности в зданиях.

Мы ждем, что второй номер будет интересен и нашим аспирантам, и инженерам на производстве, а споры вокруг формул и схем будут переходить из аудиторий в цеха и обратно. Мы намерены индексировать журнал в РИНЦ к концу года, и качество статей этого выпуска — наш главный аргумент.

Благодарю редакционную коллегию за рецензирование, дизайнеров — за эстетику графиков, а вас, читатели, за интерес к печатному слову. Добро пожаловать в мир технологий будущего, создаваемых сегодня в ВШТЭ.

С уважением,
Павел Владимирович Луканин





РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аким Эдуард Львович

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

Баранов Игорь Владимирович

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

Беззубцева Марина Михайловна

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

Бушуев Евгений Николаевич

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

Винничек Любовь Борисовна

доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой организации аграрного производства и менеджмента Санкт-Петербургского государственного аграрного университета

Витковская Раиса Федоровна

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

Волков Владимир Сергеевич

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

Гарькавая Виктория Федоровна

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

Дягилева Алла Борисовна

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

Зильберглейт Марк Аронович

доктор химических наук, профессор кафедры ТНВ и ОХТ Белорусского государственного технологического университета, Республика Беларусь, г. Минск

Колибаба Ольга Борисовна

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

Кругликов Петр Александрович

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

Кряжев Анатолий Максимович

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

Куколев Максим Игоревич

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

Куров Виктор Сергеевич

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

Луканин Павел Владимирович

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

Лысенко Максим Валентинович

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

Медведев Геннадий Валериевич

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

Мидуков Николай Петрович

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

Морозов Андрей Евгеньевич

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

Сафин Рушан Гареевич

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

Смирнова Екатерина Григорьевна

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

Трухтенкова Анна Леонидовна

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

Францкевич Виталий Станиславович

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

Яковлев Павел Викторович

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

Яцун Ирина Валерьевна

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





СОДЕРЖАНИЕ

**СОВРЕМЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДРЕВЕСИНЫ**

- 3 От главного редактора
- 8 **Симонова Е. И., Дубовый В. К., Демьянцва Е. Ю.**
Исследование влияния композиции волокон на свойства сепараторной бумаги
- 16 **Лезин К. А., Мидуков Н. П.**
Особенности разработки и изготовления зубчатых колёс с помощью стереолитографической печати
- 25 **Клюшкин И. В., Кауров П. В.**
Совершенствование конструкции и компоновки гидропланок на бумагоделательных машинах

**АВТОМАТИЗАЦИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ**

- 31 **Анисимова М. Д., Суриков В. Н.**
Влияние воздействия случайных возмущений на управление массой бумаги на бумагоделательной машине

ВЗГЛЯД ЭКОНОМИСТА

- 37 **Кадровая поддержка производства: Институт «Крона» и партнеры ВШГЭ**
- 42 **Дзюба А. П.**
Классификация направлений оптимизации затрат на потребление электроэнергии промышленными предприятиями

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА
И ТЕПЛОТЕХНИКА**

- 49 **Ширяев А. Д., Злобин В. Г.**
Методология применения регрессионного и факторного анализа при эксплуатации тепловых электростанций
- 59 **Злобин В. Г., Вороненко Б. А., Пеленко В. В., Хлыновский А. М.**
Определение скорости осаждения механических примесей в предварительном цикле водоподготовки

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

- 68 **Дронов В. О.**
Метод верификации срабатывания контактной схемы D-триггером на примере автомата Мура в пассажирском лифте
- 76 **Корректировки**



CONTENT

	3	By Chief Editor
MODERN TECHNOLOGIES OF WOOD PROCESSING AND USE	8	Simonova E. I., Dubovy V. K., Demyantseva E. Yu. Investigation of the influence of fiber composition on the properties of separator paper
	16	Lezin K. A., Midukov N. P. Design and manufacturing features of gears produced by stereolithography
	25	Klyushkin I. V., Kaurov P. V. Improvement of the design and layout of paper machine hydrofoils
AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND CONTROL SYSTEMS	31	Anisimova M. D., Surikov V. N. Effect of random disturbances on paper basis weight control in a paper machine
	37	Production HR support “Krona” institute and HSE partners
THE ECONOMIST’S VIEW	42	Dzyuba A. P. Classification of cost optimization strategies for industrial electricity consumption
THERMAL POWER ENGINEERING AND HEAT ENGINEERING	49	Shiryaev A. D., Zlobin V. G. Methodology of regression and factor analysis application for thermal power plant operation
	59	Zlobin V. G., Voronenko B. A., Pelenko V. V., Khlynovsky A. M. Determination of the sedimentation rate of mechanical impurities in the pre-treatment water cycle
ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING	68	Dronov V. O. A method for verifying the activation of a contact circuit by a d-flip-flop using the example of a Moore machine in a passenger elevator
	76	Corrections

Оригинальное практическое исследование
УДК 666.189.2
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_8-15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИЦИИ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА СЕПАРАТОРНОЙ БУМАГИ

Елена Игоревна Симонова, Владимир Климентьевич Дубовый,
Елена Юрьевна Демьянцева

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

© Симонова Е. И., Дубовый В. К., Демьянцева Е. Ю., 2026

Автор-корреспондент: Симонова Е. И., e-mail: bliznyakova1989@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию влияния компонентного состава сепараторной бумаги на её эксплуатационные свойства. В работе рассмотрены минерально-волоконистые полуфабрикаты как основа структуры бумаги: стеклянные волокна различных марок (диаметром 0,4 и 0,6 мкм) и асбестовые хризотилловые волокна мокрого обогащения (АХЛМ) с использованием связующего ПВА на основе дисперсии. Обсуждается ключевая роль морфологии волокон (диаметр, длина, фракционный состав) в формировании пористой структуры, капиллярности и механической прочности сепараторной бумаги. В отличие от растительных, минеральные волокна как материал для производства бумаги характеризуются ограниченной фибрилляцией, что требует детального анализа влияния их геометрических параметров на свойства конечного продукта.

Представлены методы оценки характеристик материалов. Результаты исследований демонстрируют зависимость потребительских свойств бумаги от содержания стеклянных волокон и асбеста. Установлено, что увеличение доли волокон асбеста АХЛМ повышает механическую прочность, но снижает зольность и капиллярную впитываемость. Меньший диаметр стеклянных волокон улучшает связеобразование и прочностные характеристики бумаги, тогда как более крупные волокна увеличивают гетерогенность и усложняют массоподготовку. Выводы подтверждают возможность целенаправленного регулирования свойств сепараторной бумаги путём подбора типа и содержания волокон для оптимизации баланса ионной проводимости, химической стойкости и механической прочности в агрессивных средах.

Ключевые слова: сепараторная бумага, стекловолокно, асбестовые волокна, минерально-волоконистые полуфабрикаты, химические источники тока, композиция по волокну, процессы связеобразования

Для цитирования: Симонова Е. И., Дубовый В. К., Демьянцева Е. Ю. Исследование влияния композиции волокон на свойства сепараторной бумаги // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 8–15. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_8-15

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FIBER COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF SEPARATOR PAPER

Elena Igorevna Simonova, Vladimir Klimentievich Dubovy, Elena Yurievna Demyantseva

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

Corresponding author: E. I. Simonova, e-mail: bliznyakova1989@mail.ru

ABSTRACT

The paper studies the impact of the component composition of separator paper on its functional properties. This work considers mineral-fiber semi-finished products as the structural basis of the paper: glass fibers of various grades (0.4

and 0.6 μm in diameter) and AKhLM1 grade asbestos fibers, with PVA dispersion-based binder. The key role of fiber morphology (diameter, length, particle size distribution) in forming the porous structure, capillarity, and mechanical strength of separator paper is discussed. In contrast to plant fibers, mineral fibers as a papermaking material are characterized by restricted fibrillation, making it necessary to analyze in detail the influence of their geometric parameters on the properties of the end product.

The paper presents methods for assessing the properties of materials. The study results demonstrate that paper performance properties depend on glass fiber and asbestos content. Increasing the proportion of AKhLM asbestos fibers increases mechanical strength but decreases ash content and capillary absorbency. Glass fibers of smaller diameter improve bond formation and the paper's strength properties, whereas larger-diameter fibers increase heterogeneity and complicate the mass preparation process. The findings confirm that the properties of separator paper can be purposefully controlled by choosing the type and amount of fibers to achieve an optimal balance of ionic conductivity, chemical resistance, and mechanical strength in aggressive environments.

Keywords: separator paper, glass fiber, asbestos fibers, mineral-fiber semi-finished products, chemical power sources, fiber furnish, bond formation processes

For citation: Simonova E. I., Dubovy V. K., Demyantseva E. Yu. (2026) 'Investigation of the influence of fiber composition on the properties of separator paper', *Technology and Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 8–15. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_8–15.

ВВЕДЕНИЕ

Сепараторная бумага предназначена для химических источников тока (ХИТ) с щелочными электролитами.

В качестве сырья для производства сепарационной бумаги могут использоваться минерально-волокнистые полуфабрикаты — стеклянные волокна различных марок, а также асбестовые волокна.

В основополагающих работах [1] неоднократно отмечалось, что наиболее важными при выборе волокна для производства бумагоподобного фильтровального материала являются такие параметры, как структурно-геометрические и поверхностные свойства, а также совместимость с другими компонентами, хемо- и термостойкость, морозо- и теплоустойчивость, гидрофобность или гидрофильность, механическая прочность [2].

Волокна асбеста представляют собой совокупность бесчисленного множества кристаллов. Размеры кристаллов и их расположения в волокне обуславливают ценные технические свойства, присущие асбесту, к числу которых относятся: способность к расщеплению на тончайшие волокна, механическую прочность на разрыв и растяжение, высокую адсорбционную способность, способность к набуханию, кислото- и щелочустойчивость, термостойкость, низкую электропроводность и другие. К числу специфических свойств асбеста, делающих его практически незаменимым в фильтровальном материале, относят электрокинетический потенциал и развитую удельную поверхность [3]. Наиболее распространенным

сырьем минерального происхождения для производства высокотехнологичных материалов являются стеклянные волокна [4].

Выделяют различные типы стекловолокон в зависимости от марки стекла и, соответственно, его химического состава, например, кремнеземные, щелочные, каолиновые, боросиликатные и др. [5]. Стекловолокна разных марок, несмотря на различия в составе и назначении, обладают общими характерными свойствами. К таким свойствам относятся: высокая прочность при растяжении (отношение прочности к удельному весу), тепло- и огнестойкость, хемостойкость, биостойкость, влагостойкость, низкий коэффициент линейного температурного расширения и высокая теплопроводность, низкая электропроводность, способность поглощать γ -лучи и быстрые и медленные нейтроны. При этом значения механических характеристик стекловолокон могут варьироваться в достаточно широких пределах. При подготовке массы стеклянные волокна, в отличие от целлюлозных, не фибриллируются и не набухают, их участки длиной 6–10 мм остаются прямолинейными и сохраняют неизменный диаметр. В результате межволоконные взаимодействия в бумагоподобных материалах из стеклянных волокон очень малы, из-за чего и прочность самого материала крайне низкая.

Прочность стекловолокнистого материала существенно зависит от диаметра образующих его волокон [6, 7].

Под названием «асбест» или «асбесты» объединяются тонковолокнистые минералы группы серпентина

¹ Translator's note: AKhLM grade asbestos (Russian standard) is a type of chrysotile, acid- and heat-resistant asbestos.



(хризотил-асбест) и амфибола (амфибол-асбесты), обладающие способностью при механическом воздействии легко расщепляться на отдельные прочные и гибкие волокна и выдерживать без изменений высокие температуры и химически агрессивные среды.

Бумага сепараторная на основе минерально-волоконистых полуфабрикатов и связующего применяется для химических источников тока [8]. В последнее время в результате создания современных источников тока нового поколения возникла потребность в прочной тонкой технологичной сепараторной бумаге с хорошими сепарационными характеристиками, поэтому проблема исследования влияния композиции по волокну на свойства сепараторной бумаги является актуальной [9, 10].

Целью данного исследования является изучение влияния компонентного состава по волокну на потребительские свойства сепараторной бумаги.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить требования к качественным показателям сепараторной бумаги;
- исследовать основные характеристики исследуемых исходных материалов;
- определить влияние содержания стеклянных волокон в композиции бумаги на ее потребительские свойства.

В последнее время в результате создания современных источников тока нового поколения возникла потребность в прочной тонкой технологичной сепараторной бумаге с хорошими прочностными характеристиками.

Для достижения поставленной цели были определены количественные параметры потребительских свойств сепараторной бумаги, которые представлены в таблице 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются: стекловолокно АО «Новгородский завод стекловолокна» марок: М20-МТВ 0,4 (ТУ 6–11–483–79); М20-УТВ 0,6 (ТУ 6–11–483–79); МЕ — МТВ 0,4 (ТУ 6–11–389–76); МЕ –УТВ 0,6 (ТУ 6–11–389–76), асбест-хризотил-овые волокна мокрого обогащения АЛХМ (ГОСТ 12871-67).

В таблице 2 представлены основные характеристики объектов исследования согласно ТУ.

Марки стекловолокна М20 и МЕ различаются по химическому составу, марка М20 представляет из себя боросиликатное стекло, которое обладает щелочестойкостью.

В качестве связующего использовали дисперсию ПВА Д51С (ГОСТ 18992). Так как для сепараторной бумаги один из ключевых параметров — это механическая прочность и высокая впитываемость капилляров, необходимо связующее, дальнейшая технология предполагает полученный минерально-волоконистый материал подвергать термобработке для создания капиллярно-пористой структуры.

Как известно, геометрия волокон и, как следствие, количество и размер пор являются определяющими при формировании структуры материалов с повышенной впитывающей и фильтрующей способностью. Поэтому исходя из высокой корреляционной зависимости бумагообразующих свойств стекловолоконистых полуфабрикатов и морфологии исходных волокон [7, 8] мы выполнили исследование по распределению фракций по диаметру и длине.

Таблица 1. Потребительские свойства сепараторной бумаги

Table 1. Consumer properties of separator paper

Сепараторная бумага	Толщина, мм	Масса, г/м ²	Впитываемость по Клемму, мм	Зольность, %	Разрушающее усилие, Н
	не более 0,15	50±5	не менее 25	не менее 85	не менее 8,0

Таблица 2. Характеристики объектов исследования согласно ТУ

Table 2. Characteristics of the objects under study according to the technical specifications

Марка стекловолокна/асбеста	Диаметр волокна, по каждому первичному определению, мкм	Содержание неволоконистых включений, % не более	Диапазон температур, °С
МТВ 0,4	0,40 ±0,05	1,0	-200 до + 450
УТВ 0,6	0,6 ±0,1	1,0–2,0	-200 до + 450



Распределение фракций по диаметру и длине проводили на аппарате Morfi Contrast согласно руководству пользователя и световой микроскопии.

Микрофотографии выполнены на сканирующем электронном микроскопе SEM Sigma VPZEISS (ускоряющее напряжение 10 кВ, детектор InLens), ЦКП НО «Арктика».

В целях прогнозирования потребительских свойств минерально-волоконистых полуфабрикатов рассматривали основные бумагообразующие свойства объектов исследования, используемых для получения сепараторной бумаги. Для определения потребительских свойств сепараторной бумаги использовали стандартные методики: определение массы метра квадратного бумаги — ГОСТ Р ИСО 536–2013; определение толщины бумаги — ГОСТ Р ИСО 534–2012; определение капиллярной впитываемости (метод Клемма) — ГОСТ 12602; определение разрушающего усилия — ГОСТ ИСО 1924–1–96; зольность ГОСТ 7629.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1–4 представлено фракционное распределение волокон по диаметру (мкм) и длине (мм) в зависимости от марки стекловолокна.

Из представленных результатов исследования видно, что стеклянные волокна, маркированные диаметром 0,4 мкм (имеют диаметр в диапазоне 0,35–0,45 мкм), согласно фракционному распределению составляют 46,69% от общего количества изученных волокон; волокна с диаметром 0,55–0,65 мкм — около 25%; фракция 0,15–0,35 мкм — 22,5%; свыше 0,75 мкм — 22,8%; менее 0,05 мкм — 2,9%. При этом стекловолокна марок M20 имеют фракционный состав в диапазоне 0,35–0,45 мкм



Рисунок 3. Фракционное распределение диаметра волокон марки M20-UTB 0,6 мкм

Figure 3. Fiber diameter fractional distribution for grade M20-SFF 0,6, μm

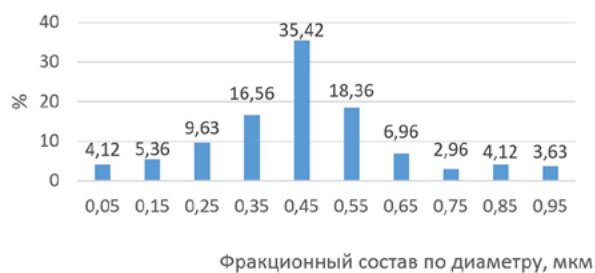


Рисунок 1. Фракционное распределение диаметра волокон марки M20-MTB 0,4 мкм

Figure 1. Fiber diameter fractional distribution for grade M20-MGF 0,4, μm



Рисунок 2. Фракционное распределение диаметра волокон марки ME-MTB 0,4 мкм

Figure 2. Fiber diameter fractional distribution for grade ME-MGF 0,4, μm

в 51,98% случаев; 0,55–0,65 мкм — 25,32%; 31,55% имеет фракции 0,15–0,35 мкм; 10,71% — свыше 0,75 мкм; 4,12% — 0,05 мкм.

Стеклянные волокна, имеющие маркировку ME-UTB 0,6 мкм (диапазон диаметров 0,55–0,65 мкм)

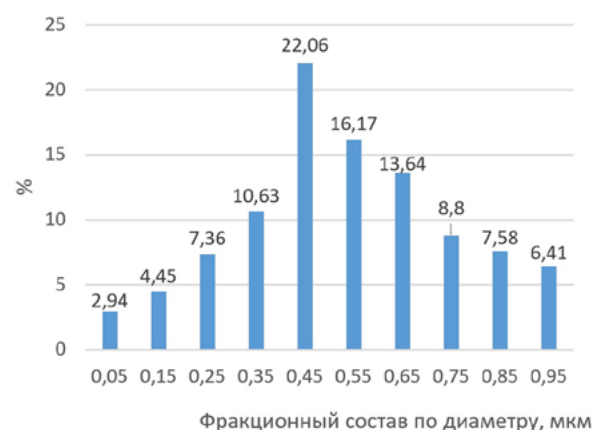


Рисунок 4. Фракционное распределение диаметра волокон марки ME-UTB 0,6 мкм

Figure 4. Fiber diameter fractional distribution for grade ME-SFF 0,6, μm



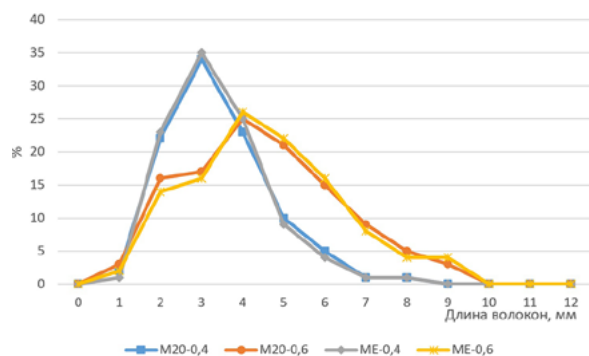


Рисунок 5. Фракционное распределение по длине стеклянных волокон

Figure 5. Glass fiber length fractional distribution

составляют менее 30%; 40% приходится на фракции 0,25–0,35 мкм; 22,8% содержит фракции диаметром 0,75–0,95 мкм; 2,94% — менее 0,05 мкм. А для стеклянных волокон марки М20-УТВ 0,6 мкм диапазон диаметров 0,55–0,65 мкм составляет 33,88%; 17,75% приходится на фракции 0,25–0,35 мкм; 21,78% содержит фракции диаметром 0,75–0,95 мкм, 2,56% — менее 0,05 мкм.

Стеклянные волокна марок МЕ-МТВ и М20-МТВ диаметром 0,4 мкм более равномерны по своему фракционному составу, чем стеклянные волокна марок МЕ и М20 диаметром 0,6 мкм. При этом у последних отмечено смещение диаметра в большую область размерности диаметра волокна.

Установлено, что стеклянные волокна марок М20 и МЕ УТВ 0,6 обладают большей гетерогенностью по диаметру волокна. Стеклянные волокна с большим диаметром сложнее подвергаются процессам массоподготовки.

Волокна с меньшим диаметром обладают большей удельной поверхностью, а следовательно, и большей способностью к связеобразованию. При этом с увеличением диаметра волокна жесткость при изгибе увеличивается, что ведет к получению бумаги меньшей плотности.

На следующем этапе были проведены исследования по определению длины стеклянных волокон. Результаты исследования представлены на рисунке 5.

Представленные результаты исследования свидетельствуют о том, что основной диапазон длин волокон М20-МТВ 0,4, МЕ-МТВ 0,4 находится в пределах от 1,5 мм до 5,5 мм. При этом основная длина волокна для марок М20-УТВ 0,6 и МЕ-УТВ 0,6 находится в диапазоне от 2 мм до 7 мм.

Необходимо отметить, что система распределения длин волокон достаточно гетерогенна, и при процессах массоподготовки стеклянных волокон М20УТВ 0,6 и МЕ-УТВ 0,6 понадобится больше времени, чем для стеклянных волокон М20-МТВ0,4 и МЕ-МТВ 0,4.

Так как использование сепараторной бумаги предполагает воздействие агрессивных щелочных сред, дальнейшие исследования целесообразно проводить с щелочестойким стеклом марки М20-МТВ0,4 и М20-УТВ 0,6.

Микрофотографии марок исследуемого стекла изображены на рисунке 6.

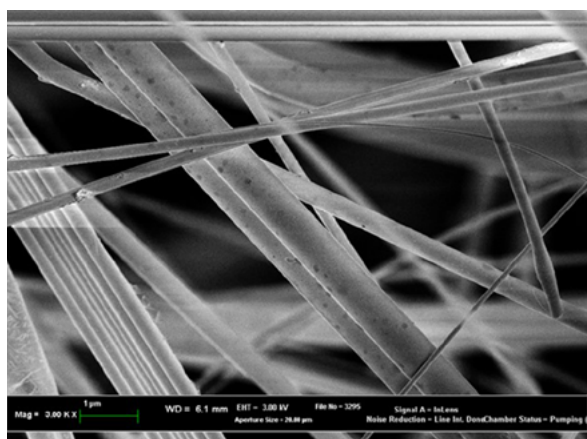
Средняя длина волокна асбеста АХЛМ составляет 1,5 мм диаметром 0,2 мкм, АХЛМ представляет собой материал, не менее чем на 96% имеющий фракцию более 0,25 мм. Микрофотографии марок исследуемого асбеста представлены на рисунке 7.

Из представленных на рисунке 7 микрофотографий отчетливо видно, что волокно асбеста способно разделяться на фибриллы. Оно более гибкое по сравнению со стекловолокном, и его способность к фибриллированию положительно сказывается на процессах связеобразовании.

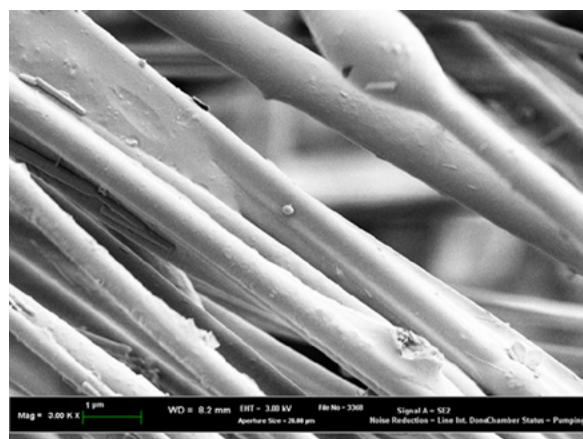
Для проведения исследования влияния содержания стеклянных волокон марки М20-МТВ 0,4, М20-УТВ 0,6 и асбестовых волокон АХЛМ в композиции сепараторной бумаги на ее основные свойства были изготовлены лабораторные образцы сепараторной бумаги с различным содержанием стекловолокна и асбеста марки АХЛМ. В качестве связующего использовали дисперсию ПВА Д51С с расходом 10% в перерасчете на абсолютно сухое волокно. Затем у изготовленных образцов определяли толщину, капиллярную впитываемость (метод Клемма), зольность, а также разрушающее усилие. Результаты исследований приведены в таблицах 3 и 4.

Из представленных в таблицах данных можно заключить, что с увеличением доли в композиции асбеста марки АХЛМ разрушающее усилие возрастает и достигает оптимального значения (если соблюдены заявленные (табл. 1) необходимые потребительские свойства) при 40% содержания асбеста марки АХЛМ в композиции. С увеличением доли асбеста марки АХЛМ снижается показатель толщины; образцы бумаги, содержащие большую долю асбеста, более плотные, однако одновременно с этим снижается показатель зольности и капиллярной впитываемости (метод Клемма).

Образцы бумаги, содержащие в своем составе стекловолокно марки М20-УТВ 0,6, при прочих равных условиях имеют большую толщину, чем образцы, содержащие стекловолокно марки М20-МТВ 0,4.



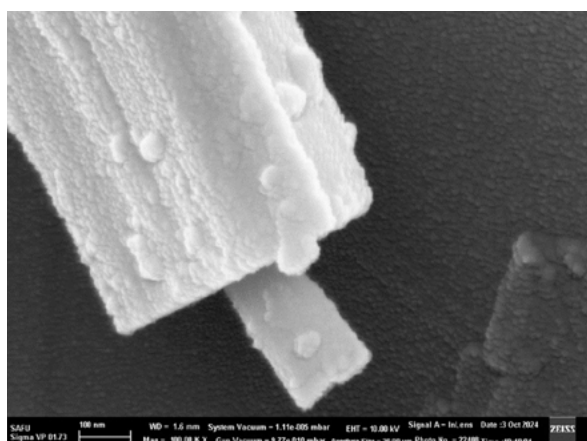
а) M20-MTB 0,4



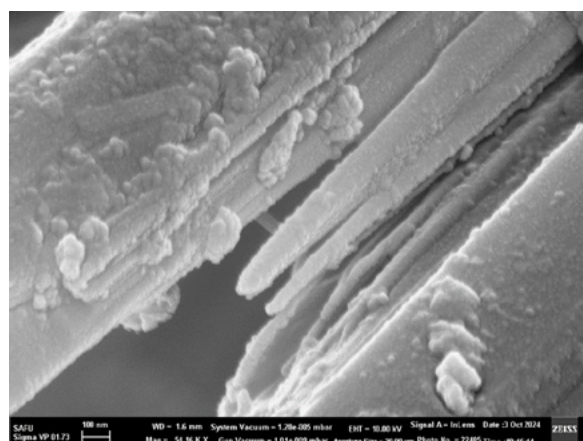
б) M20-УТВ 0,6

Рисунок 6. Микрофотографии стекловолокна, выполненные на сканирующем электронном микроскопе SEM Sigma VP ZEISS (Mag=3.00 kx): а) WD = 6,1 мм; б) WD = 8,2 мм; EHT = 3.00 kV

Figure 6. Micrographs of glass fiber obtained using a scanning electron microscope SEM Sigma VP ZEISS (Mag=300 x): а) WD=6.1 mm, (b) WD = 8.2 mm, EHT = 3.00 kV



а) M20-MTB 0,4



б) M20-УТВ 0,6

Рисунок 7. Микрофотографии асбеста АХЛМ, выполненные на сканирующем электронном микроскопе SEM Sigma VP ZEISS (Mag=100 kx): а) WD = 1,6 мм, б) WD = 8,2 мм; EHT = 10 kV

Figure 7. Microphotographs of AKhLM grade asbestos, obtained using a scanning electron microscope SEM Sigma VP ZEISS (Mag=100 kx): а) WD = 1.6 mm, б) WD = 8.2 mm, EHT = 10 kV

Таблица 3. Влияние содержания стеклянных волокон марки M20-MTB 0,4 и асбестовых волокон АХЛМ в композиции сепараторной бумаги на ее свойства

Table 3. Effect of M20-MGF 0.4 glass fiber and AKhLM asbestos fiber content on separator paper properties

M20-MTB 0,4	АХЛМ	Толщина, мм	Масса, г/м ²	Впитываемость по Клемму, мм	Зольность, %	Разрушающее усилие, Н
100%	0%	0,18	50	150	95	4,2
80%	20%	0,17	50	145	85	6,7
60%	40%	0,15	50	145	84	9,5
40%	60%	0,14	50	140	83	10,1
20%	80%	0,14	50	136	82	11,4
0%	100%	0,14	50	130	80	12,2

Таблица 4. Влияние содержания стеклянных волокон марки М20-УТВ 0,6 и асбестовых волокон АХЛМ в композиции сепараторной бумаги и ее свойства

Table 4. Effect of M20-SFF 0.6 glass fiber and AKhLM asbestos fiber content on separator paper properties

М20-УТВ 0,6	АХЛМ	Толщина, мм	Масса, г/м ²	Впитываемость по Клемму, мм	Зольность, %	Разрушающее усилие, Н
100%	0%	0,20	50	170	93	3,1
80%	20%	0,18	50	160	90	5,0
60%	40%	0,15	50	155	85	8,2
40%	60%	0,15	50	150	83	9,8
20%	80%	0,15	50	145	81	11,2
0%	100%	0,14	50	130	80	12,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стеклянные волокна диаметром 0,4 мкм более равномерны по своему фракционному составу, чем стеклянные волокна марок МЕ и М20 диаметром 0,6 мкм. Установлено что, стеклянные волокна с большим диаметром обладают и большей гетерогенностью и сложнее подвергаются процессам массоподготовки. Волокна с меньшим диаметром обладают большей удельной поверхностью, а следовательно, и большей способностью к связеобразованию.

С увеличением доли в композиции асбеста марки АХЛМ разрушающее усилие возрастает и достигает оптимального значения, если соблюдены заявленные необходимые потребительские свойства, при 40% содержания асбеста марки АХЛМ в композиции сепараторной бумаги.

Список литературы

1. Канарский А. В. Фильтровальные виды картона для промышленных технологических процессов. М.: Экология, 1991. 272 с.
2. ТЭК-НН: официальный сайт компании. URL: <http://www.tex-filter.ru/flat.htm>.
3. Дубовый В. К. Стеклянные волокна. Свойства и применение. СПб.: Нестор, 2003. 130 с.
4. Щербак Н. В. Моделирование композиции сепараторной бумаги из минерального и растительного сырья для повышения прочности и впитывающей способности / Н. В. Щербак, Е. В. Дубовой, М. А. Лоренгель, А. С. Смолин // Известия вузов. Лесной журнал. 2018. № 1. С. 120–129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.120.
5. EP 4113728 A1, MPK H01M50/409. Separator for closed lead acid storage batteries, said separator using glass fibers and thermally fusible organic fibers / S. Mitsui, T. Ueyama, N. Kimura. Заявл. 26.02.2020; опубл. 04.01.2023.
6. Смолин А. С. Оценка эффективности очистки воздуха минеральноволокнистыми сепараторными бумагами / А. С. Смолин, Н. В. Щербак, М. А. Лоренгель,

Е. В. Дубовой // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 6. С. 126–133. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.126.

7. Tandon P. Optimal design of absorptive glass mat (AGM) separator with fastest electrolyte uptake using X-ray micro-computed tomography / P. Tandon, Q. He, S. D. Kim, V. Kumar // Journal of Energy Storage. 2019. Vol. 21. Pp. 505–509. DOI: 10.1016/j.est.2018.12.008.
8. Tandon P. Deconstructing three-dimensional (3D) structure of absorptive glass mat (AGM) separator to tailor pore dimensions and amplify electrolyte uptake / P. Tandon, Q. He, S. D. Kim, V. Kumar // Journal of Power Sources. 2018. Vol. 384. Pp. 417–425. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.008.
9. 360iResearch. Ultrafine Glass Fiber for AGM Separator Market — Global Forecast 2026–2032: аналит. отчёт. 2026. 195 с. Отчёт № 6080379.
10. Bosson Research. Global Absorbent Glass Mat (AGM) Separator Market Research Report 2025 (Status and Outlook): аналит. отчёт. 2025.

References

1. Kanarsky A. V. Filtration types of cardboard for industrial technological processes / A. V. Kanarsky. Moscow: Ecology, 1991. 272 p.
2. Official website of the Nizhny Novgorod company TEKS-NN [Electronic resource]. Access mode: <http://www.tex-filter.ru/flat.htm>, free. Title from the screen.
3. Dubovyi V. K. Glass fibers. Properties and Application / V. K. Dubovyi. SPb.: Nestor Publishing House, 2003. 130 p.
4. Shcherbak N. V. Modeling of the composition of separator paper from mineral and vegetable raw materials to increase the strength and absorbency / N. V. Shcherbak, E. V. Dubovoi, M. A. Lorentgel, A. S. Smolin // Izvestiya vuzov. Lesnoy Zhurnal. 2018. No. 1. Pp. 120–129. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.120
5. EP 4113728 A1, MPK H01M50/409. Separator for closed lead acid storage batteries, said separator using glass fibers and thermally fusible organic fibers / S. Mitsui, T. Ueyama, N. Kimura. Appl. 26.02.2020; publ. 04.01.2023.
6. Smolin A. S. Evaluation of the Effectiveness of Air Purification by Mineral Fiber Separation Papers / A. S. Smolin,



- N. V. Shcherbak, M. A. Lorentgel, and E. V. Dubovoy // *Izvestiya Vuzov. Lesnoy zhurnal*. 2017. No. 6. pp. 126–133. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.126.
7. Tandon P. Optimal design of absorbent glass mat (AGM) separator with fastest electrolyte uptake using X-ray micro-computed tomography / P. Tandon, Q. He, S. D. Kim, V. Kumar // *Journal of Energy Storage*. 2019. Vol. 21. Pp. 505–509. DOI: 10.1016/j.est.2018.12.008.
 8. Tandon P. Deconstructing three-dimensional (3D) structure of absorbent glass mat (AGM) separator to tailor pore dimensions and amplify electrolyte uptake / P. Tandon, Q. He, S. D. Kim, V. Kumar // *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 384. Pp. 417–425. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.008.
 9. 360iResearch. Ultrafine Glass Fiber for AGM Separator Market Global Forecast 2026 2032: analytical report. 2026. 195 p. Report No. 6080379.
 10. Bosson Research. Отчет о глобальном исследовании рынка абсорбирующих стеклянных матов (AGM) в 2025 году (состояние и перспективы): отчёт. 2025.

■ Информация об авторах

Симонова Елена Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ResearcherID: AFK-9147–2022, ORCID: 0000-0002-3657-030X; SPIN-код: 2037–4410, AuthorID: 985416, e-mail: bliznyakova1989@mail.ru.

Дубовый Владимир Климентьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии бумаги и картона Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета

промышленных технологий и дизайна, 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ResearcherID: IDW 1235–2017, ORCID: 0000-0002-2903-3872, SPIN-код: 2398–8025, AuthorID: 315289, e-mail: dubovy2004@mail.ru.

Демьянцева Елена Юрьевна, кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры физической и коллоидной химии Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; ResearcherID: P-5165–2019, ORCID: 0000-0001-9570-1827, SPIN-код: 5490–5571, AuthorID: 183929; e-mail: demyantseva@mail.ru.

■ Information about the authors

Simonova Elena Igorevna, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Pulp and Paper Technology of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, Russia, 198095; ResearcherID: AFK-9147–2022, ORCID: 0000-0002-3657-030X; SPIN code: 2037–4410, AuthorID: 985416, e-mail: bliznyakova1989@mail.ru.

Dubovy Vladimir Klimentievich, Doc. Sci. in Engineering, Professor, Professor at the Department of Pulp and Paper Technology of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial

Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, Russia, 198095; ResearcherID: IDW 1235–2017, ORCID: 0000-0002-2903-3872, SPIN code: 2398–8025, AuthorID: 315289, e-mail: dubovy2004@mail.ru.

Demyantseva Elena Yurievna, PhD in Chemistry, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Physical and Colloidal Chemistry of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design, 198095, St. Petersburg, Ivan Chernykh St., 4; ResearcherID: P-5165–2019, ORCID: 0000-0001-9570-1827, SPIN code: 5490–5571, AuthorID: 183929; e-mail: demyantseva@mail.ru.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС С ПОМОЩЬЮ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Кирилл Алексеевич Лезин, Николай Петрович Мидуков

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

© Лезин К. А., Мидуков Н. П., 2026

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

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется возможность применения 2D-сканера и стереолитографической 3D-печати для проектирования и изготовления зубчатых передач — деталей специального оборудования для производства бумажной продукции. Эта запчасть отвечает за передачу крутящего момента на валы машины для нанесения печати. Задачей исследователей было добиться ускорения производственного цикла и обеспечить технологическую сторону импортозамещения указанных деталей. Предварительно было проведено изучение научных источников, в которых описан опыт попытки использовать 3D-печать для получения зубчатых колёс в мировой производственной практике. Эта технология позволяет обеспечить независимость от зарубежных поставщиков и сократить логистические издержки в условиях современных вызовов. Экспериментальные образцы зубчатых колёс, изготовленные из полимерной смолы методом стереолитографии, имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными серийными компонентами. Зубчатые колеса, напечатанные на 3D-принтере, успешно прошли функциональные испытания, продемонстрировав снижение себестоимости, а также сокращение времени производства с нескольких недель до 2–3 суток. Работа посвящена оптимизации процессов моделирования, ориентации детали, точности позиционирования и параметров печати, включая применение конструктивных решений для повышения качества и удобства изготовления деталей. В качестве иллюстраций в статье приведены фотографии разных этапов работы и полученных образцов. Результаты анализа разных аспектов проектирования и реализации зубчатых передач методами стереолитографической 3D-печати демонстрируют перспективность методики для импортозамещения и восстановления устаревшего оборудования бумагоделательных машин. Этот опыт может быть применим и к деталям другой техники, методика открывает много перспектив для дальнейших практических исследований.

Ключевые слова: зубчатые колёса, геометрические размеры, прочность, 3D-печать, стереолитографическая печать, моделирование деталей машин

Для цитирования: Лезин К. А., Мидуков Н. П. Особенности разработки и изготовления зубчатых колёс с помощью стереолитографической печати // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 16–24. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_16–24.

DESIGN AND MANUFACTURING FEATURES OF GEARS PRODUCED BY STEREO LITHOGRAPHY

Kirill Alekseevich Lezin, Nikolai Petrovich Midukov

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

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

ABSTRACT

This study explores the possibility of applying a 2D scanner and stereolithographic 3D printing to design and produce gear drives – parts of specialized equipment used in paper manufacturing. This component is responsible for transmitting torque to the shafts of the printing machine. The researchers aimed to speed up the production cycle and fulfill the technological requirements for import substitution of these components. Initially, a study of the scientific literature was carried out, detailing previous attempts to utilize 3D printing for gear manufacturing in worldwide industrial practice. This technology provides independence from overseas suppliers and cuts logistics costs in the context of



current challenges. Experimental gear samples produced from polymer resin via stereolithography offer several advantages over comparable mass-produced components. The gears printed on a 3D printer successfully passed functional tests, demonstrating a reduction in production costs as well as a decrease in manufacturing time from several weeks to 2–3 days. This study focuses on optimizing simulation processes, part orientation, positioning precision, and printing parameters, as well as the implementation of design solutions to enhance part quality and ease of manufacturing. Photographs illustrating various stages of the work and the resulting samples are presented in the article. The results of the analysis of various aspects of the design and implementation of gear transmissions using stereolithographic 3D printing methods demonstrate the potential of this technique for import substitution and the restoration of outdated equipment in papermaking machines. This experience is also applicable to parts of other machines, and the method presents many possibilities for future practical research.

Keywords: gears, geometrical dimensions, mechanical strength, 3D printing, stereolithographic printing, modeling of machine parts

For citation: Lezin K. A., Midukov N. P. (2026) 'Design and manufacturing features of gears produced by stereolithography', Technology and Energy, vol. 2 no. 2, pp. 16–24. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_16–24

ВВЕДЕНИЕ

Оборудование для производства бумажной продукции включает в себя детали и узлы печатающих машин, которые представляют собой зубчатые колеса. Несмотря на то, что зубчатые колеса являются довольно простыми в исполнении механизмами, их проектирование и изготовление имеет некоторые особенности. На сегодняшний день в России огромное количество зарубежного оборудования, поставки запчастей для которого ограничены. Это связано как с санкциями (когда компании отказываются поставлять запчасти, и из строя выходит многомиллионное оборудование), так и с устареванием парка оборудования, которому необходимы запчасти, больше не выпускаемые производителем (на многих предприятиях в России для печати на картоне, бумаге и других видах упаковочного материала используются импортные печатные машины с длительным сроком эксплуатации). В некоторых случаях требуется модернизация существующих установок и изменение размеров деталей и узлов механизма, тогда на помощь приходят аддитивные технологии, которые позволяют в небольшой лаборатории в короткие сроки быстро изготовить зубчатые колеса по их 3D-модели [1–6]. Однако не все способы 3D-печати подходят для решения этой задачи — у каждой технологии есть свои особенности. Целью данного исследования стало изучение их и определение наиболее подходящего способа изготовления зубчатых колес.

В работе исследователей университета Дебрецена (венг. Debreceni Egyetem, один из ведущих вузов Венгрии) представлены результаты изготовления зубчатых колес на принтерах Ultimaker 3 (FDM) и Formlabs Form (SLA) из полимерной нити методом экструзии (FDM) и из фотополимерной смолы методом стереолитографической печати (SLA). Результаты экспериментов венгерских специалистов свидетельствуют о более высокой точности

при использовании FDM по сравнению с SLA [7, 8, 9]. Контроль геометрии продукции осуществляется лазерным 3D-сканером, который регистрирует трёхмерное облако точек поверхности зацепления и, сопоставив его с CAD-моделью, позволяет вычислять отклонения по всей поверхности зубьев. Известно, что точность изготовления зависит от параметров печати, которые были приведены авторами в предыдущей работе [10]. В работе применяются методы, не всегда доступные широкой аудитории из-за сложности оборудования и навыков реверс-инжиниринга.

Несмотря на высокую точность изготовления зубчатых колёс с помощью FDM-печати, остаётся проблема, связанная со снижением механических характеристик зубьев. В работе [11] прочность зубьев определялась с помощью инфракрасной термографии, являющейся неразрушающим методом контроля. В приведённых экспериментальных данных сравниваются свойства шестерён, изготовленных из различных полимерных материалов, включая PLA, ABS, PETG и другие распространённые полимеры [12, 13, 14]. Зубчатые колёса были изготовлены с помощью 3D-принтера Anycubic Kassel plus при скорости печати 55 мм/с и толщине слоя 0,2 мм, с варьированием температуры экструдера и рабочего стола в диапазоне, рекомендованном для соответствующего материала. Эти результаты демонстрируют влияние состава материала и режимов печати на прочность зубьев, что объясняется физической адгезией между слоями, кинетикой отверждения полимера и термическими градиентами; отмечается, что различия в материалах и режимах печати приводят к изменению микроструктуры и способности к трещинообразованию, следовательно, требуют дальнейших исследований и оптимизации параметров обработки для повышения надёжности зубчатых передач.



Известно, что наибольшей прочностью обладают зубчатые колеса, изготовленные из металла. 3D-печатать изделий из металла выполняется методом лазерного спекания (селективного) металлических порошков [15, 16]. Как и при изготовлении шестерёнок из смолы и полимерной экструзии (FDM), прочность деталей и точность их геометрии во многом определяется высотой слоя. В работе [17] установлено, что при высоте слоя 50 мкм механические характеристики зубчатых колес выше; однако при повышении толщины слоя до 150 мкм с последующей полировкой можно добиться существенного удешевления процессов изготовления (до 33%). Авторы работы справедливо предлагают учитывать затраты не только на изготовление, но и на постобработку деталей.

Экономическая целесообразность использования аддитивных технологий в изготовлении зубчатых колёс может быть дополнительно повышена за счёт снижения расхода материала: в условиях субтрактивного изготовления шестерён уменьшение объема заготовки обычно сопровождается усложнением конструкции и, следовательно, ростом стоимости фрезерных, сверлильных и других операций. В рамках аддитивного производства возможно изготовление сложной по геометрии детали с отверстиями без существенного снижения прочностных характеристик зубьев. Затраты на материалы можно снизить на 10–40%, при этом

незначительно ухудшая механические параметры зубчатых колёс [18–20].

Практически во всех случаях исследователи так или иначе добиваются удовлетворительных результатов изготовления зубчатых колес с помощью 3D-принтеров. Известны работы по моделированию создания целых коробок из зубчатых колёс, изготовленных по различным технологиям 3D-печати — FDM, SLA, SLS, SLM. Однозначных советов по тому, какой способ аддитивного производства шестерёнок лучше, нет, кроме лазерного спекания металлических порошков, которое позволяет получить несопоставимо более высокие механические характеристики зубчатых колес. В остальных случаях качество во многом определяется параметрами 3D-печати, постобработкой и навыками 3D-печатника.

Однако из критического анализа литературных источников можно сделать общий вывод: несмотря на доступность среды, изготовление зубчатых колёс с помощью аддитивных технологий требует инженерных навыков в 3D-моделировании и 3D-сканировании, а также серьёзной подготовки в области 3D-печати. Упростить эти процессы — значит сделать 3D-печать шестерёнок более доступной, а именно это и являлось задачей данных исследований, направленных на использование простых и доступных средств и уже имеющихся характеристик 3D-печати в изготовлении зубчатых колёс.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зубчатые колёса, предназначенные для передачи крутящего момента на валы машины для нанесения печати, изготовлены с помощью стереолитографического 3D-принтера Anycubic Photon M3 Max. Характеристики принтера: технология печати — SLA; материал печати — фотополимерная смола; рабочее пространство — 298 × 300 × 164 мм; минимальная толщина слоя — 10 мкм (при печати изделий — 50 мкм); длина волны источника света — 405 нм; программное обеспечение — Anycubic Photon Workshop; формат файла — STL. Для постобработки зубчатых колёс применялась система Washang Cure Max с рабочим объёмом мойки и засветки — 305 × 165 × 300 мм, угол распылка — 360°. В процессе промывки использовались концентрированный изопропиловый спирт (≈100%) и вода. 3D-моделирование зубчатых колёс проводилось в САД-программе, которая выдавливала область-основание зубчатого колеса и без учёта отверстия для его крепления. Для формирования

области был использован 2D-сканер HP SmartTank 530. Предварительно зубчатые колёса, которые необходимо было изготовить, покрывались матирующим спреем на основе талька, а фон при сканировании формировался с помощью бумаги чёрного цвета. Векторизация растрового изображения, полученного при сканировании, осуществлялась через онлайн-редактор, а калибровка размеров зубчатых колёс производилась с помощью обычной линейки и штангенциркуля.

В работе использовалось оборудование, закупленное в рамках совместного Российско-Белорусского проекта, а зубчатые колёса являлись важной и необходимой запасной частью печатной машины, которая расположена на территории предприятия-партнёра проекта. Работа проводилась в рамках реализации совместного Российско-Белорусского Гранта, финансируемого Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и Государственным комитетом науки и технологии Республики Беларусь.¹

¹ Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь на тему: «Модель машинно-аналитического комплекса



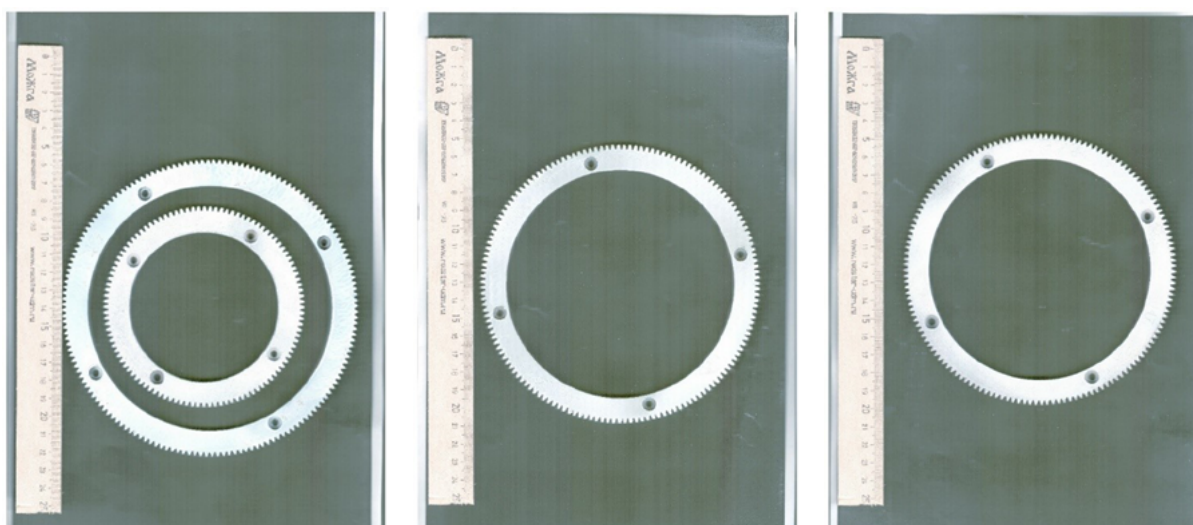


Рисунок 1. Результат сканирования поверхности зубчатых колёс, обработанных матирующим спреем

Figure 1. Surface scan result of gears treated with matting spray

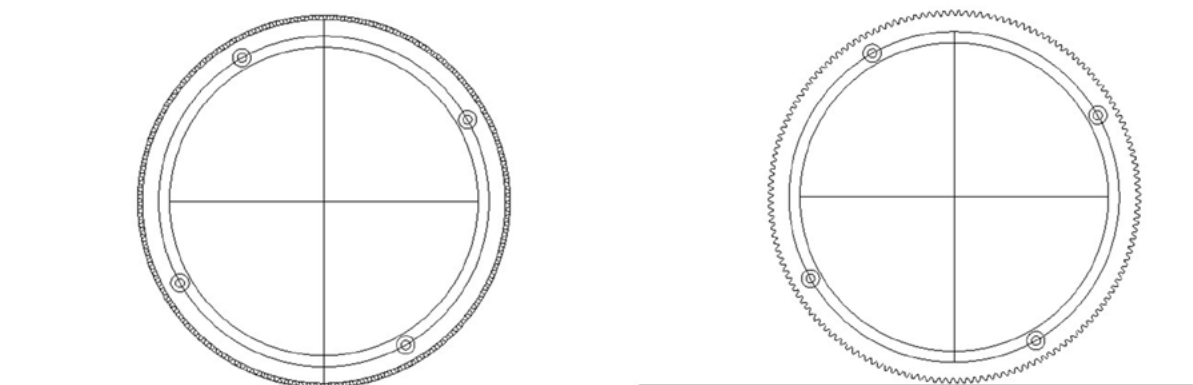


Рисунок 2. Векторизация области зубчатого колеса и отверстий для его крепления

Figure 2. Gear area and mounting holes vectorization

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первый этап создания зубчатых колёс связан со сканированием. Если зубчатое колесо имеет простую форму с обеих сторон, то нет необходимости в использовании дорогостоящих лазерных 3D-сканеров, доступ к которым не всегда имеется у небольшого предприятия. В таком случае можно использовать обычный офисный сканер, который обязательно нужно настроить для получения высококачественного изображения профиля зубчатого колеса. Для повышения контрастности требуется подготовка поверхности, подлежащей сканированию. На рисунке 1 представлен результат подготовки поверхности зубчатых колёс мелованным спреем. После

и её реализация на базе цифровых технологий при решении задач управления и прогнозирования качества в производстве целлюлозных композиционных материалов».

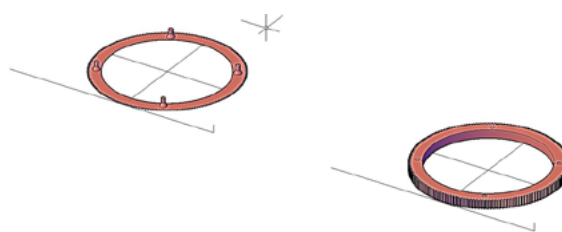


Рисунок 3. Результат команды «выдавить поверхность» в CAD-программе

Figure 3. Result of the "Extrude Surface" command in CAD software

нанесения спрея при сканировании слева устанавливается линейка, обеспечивающая метрическую калибровку масштаба разрабатываемой 3D-модели.

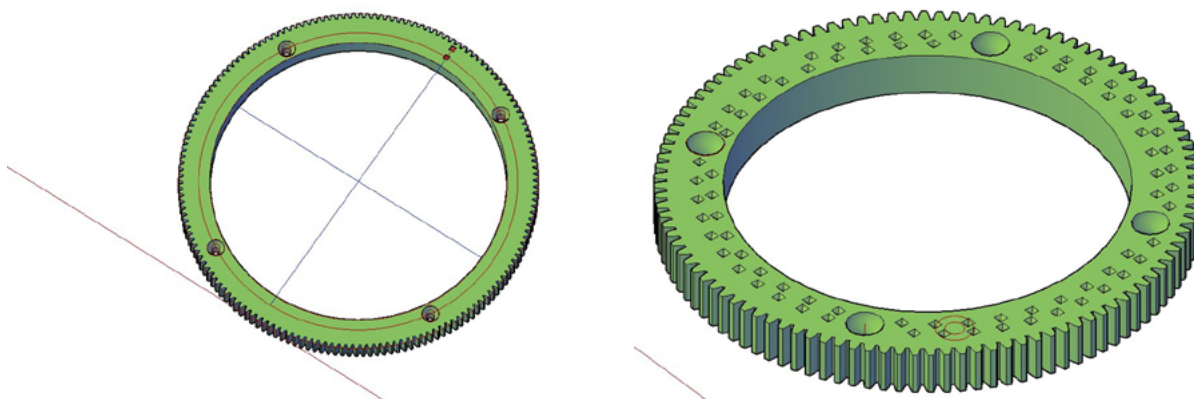


Рисунок 4. Снижение площади поверхности зубчатого колеса, которое контактирует с рабочим столом 3D-принтера

Figure 4. Reducing the contact surface area between the gear and the 3D printer build plate

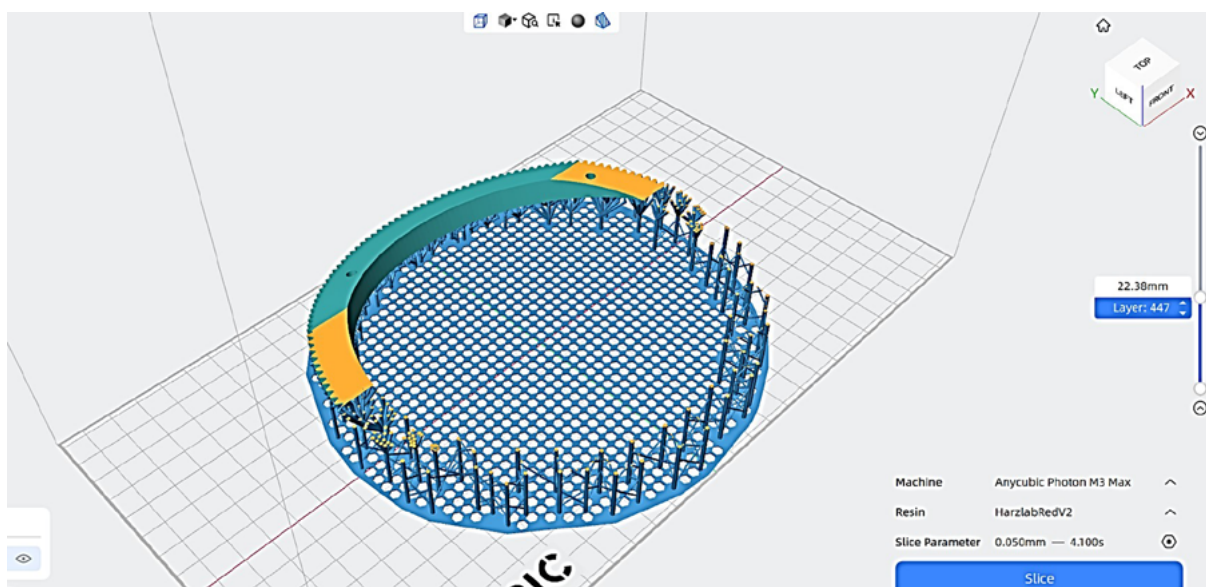


Рисунок 5. Расположение зубчатого колеса и опорных элементов при стереолитографической печати

Figure 5. Placement of the gear and support elements in stereolithography printing

Изображение высокого разрешения (не менее 600 dpi), выполненное как в чёрно-белом, так и в цветном вариантах, загружается в CAD-программу векторного формата, где контур зубчатого колеса просто обводится. Принцип обводки зубчатых колес позволяет обойти сложное построение эвольвенты по расчетам. В отдельных случаях легче выполнить простую обводку, чтобы не искать параметры зуба и коэффициент смещения эвольвенты, которые могут быть неизвестны и сложно подбираемы. Поэтому в данном случае представлен самый простой и доступный метод: контур зубчатого колеса обводится, а затем, как показано на рисунке 2, определяются диаметры (внешний, внутренний, диаметры дополнительных отверстий).

Далее по этим контурам создается плоский эскиз, который затем переводится в поверхность (рисунок 3).

Следующим этапом является выдавливание векторизованной области. Как правило, зубчатые колеса имеют постоянный профиль по всей ширине (то есть одна торцевая поверхность зеркально повторяет другую), поэтому выдавливания области на высоту, равную ширине зубчатого колеса, достаточно для того, чтобы создать полноценную и удовлетворяющую всем запросам заказчика 3D-модель.

Одной из особенностей 3D-печати с помощью стереолитографического принтера является сложность отделения напечатанной модели от рабочей платформы после завершения процесса печати. Существует несколько

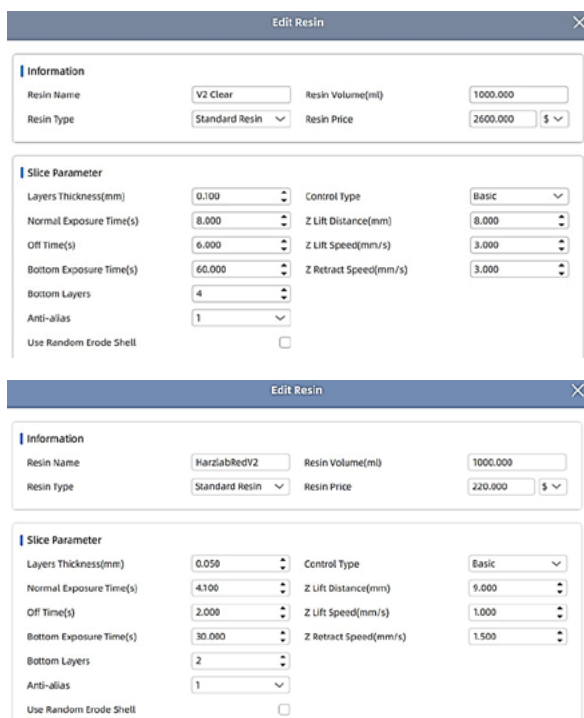


Рисунок 6. Геометрические характеристики элементов поддержки при печати зубчатых колёс

Figure 6. Geometric characteristics of support structures during gear printing

способов решения этой задачи. Одним из них является создание специальных отверстий в модели в месте её соприкосновения с платформой. Это снижает площадь контакта и упрощает снятие напечатанной детали с основы. На рисунке 4 такие отверстия представлены на модели зубчатого колеса. Важно таким образом расположить деталь при создании кода, чтобы поверхность с отверстиями плотно прилегала к поверхности рабочего стола 3D-принтера.

Описанный способ позволяет исключить необходимость изготовления опорных элементов при печати зубчатых колёс, поскольку использование опор увеличивает потребление фотополимерной смолы и повышает вероятность отслаивания изделия от платформы в процессе формирования слоя. На рисунке 4 демонстрируется конечный вид зубчатого колеса, отпечатанного без применения поддерживающих конструкций. В ситуации, когда размеры зубчатого колеса превышают габариты рабочей области 3D-принтера, изделие размещается под определённым углом таким образом, чтобы его ортогональная проекция вписывалась в границы печатной области, как это изображено на рисунке 5.

При значительных размерах зубчатого колеса важно рационально спроектировать систему поддержек,

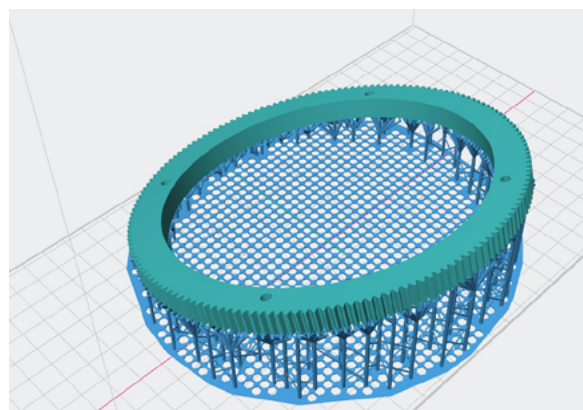


Рисунок 7. Расположение зубчатого колеса с опорными конструкциями под углом к поверхности рабочего стола

Figure 7. Gear and support structures oriented at an angle to the build platform surface



Рисунок 8. Зубчатые колёса, изготовленные с помощью стереолитографического 3D-принтера

Figure 8. Gears produced with a stereolithography 3D printer

обеспечивающих стабильность процесса печати. Перед началом процедуры осуществляется выбор материала для печати. В рассматриваемом примере применялись две разновидности фотополимерной смолы: первый образец представляет собой стандартный материал марки «Резина» производства фирмы Anycubic, второй же относится к премиальному классу — HARZ Labs Basic Red V2, характеризующемуся интенсивным розово-красным оттенком, повышенной прочностью и жёсткостью, а также пригодностью для высокоточной 3D-печати изделий сложной геометрии (рисунок 6).

На рисунке 7 демонстрируется оптимальная схема размещения зубчатого колеса, габариты которого превышают область печати, поэтому модель расположена под заданным углом с использованием вспомогательных опорных элементов.

Использование поддерживающих элементов требует тщательного контроля стабильности их фиксации в течение всего цикла печати. Нарушение целостности хотя бы одной опоры приводит к появлению фрагментов конструкции в жидкой фазе полимера, вызывая дефекты в последующих слоях формируемого изделия. Подобная ситуация вынуждает оператора 3D-принтера провести процедуру полной замены жидкости в ванне, включая фильтрацию отработанной смолы перед возобновлением производственного процесса заново. Данный этап занимает значительное количество времени и вызывает неудобства, вследствие чего рекомендуется проектировать опоры достаточной толщины, предотвращающей их отрыв. Вместе с тем увеличение поперечного сечения опор осложняет последующее удаление готовых изделий, что обуславливает необходимость механической постобработки. На рис. 8 приведены два образца зубчатых колес: первое изготовлено без опор и обладает небольшими габаритами (красного оттенка); второе выполнено с применением наклонённых поддерживающих элементов ввиду увеличенных размеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проанализированы ключевые аспекты проектирования и реализации зубчатых передач методами стереолитографической 3D-печати. Предлагаемый способ позволяет значительно ускорить производственный цикл благодаря применению принципов импортозамещения. Данная технология устраняет зависимость от зарубежных поставок компонентов, нередко сопровождающихся существенными временными задержками и удорожанием продукции, вызванными промежуточными поставками через третьи государства. Экспериментальные образцы зубчатых колёс, созданные в рамках исследования, успешно прошли эксплуатационные испытания, продемонстрировав свою

функциональность. Их себестоимость существенно снизилась по сравнению с аналогичными серийными компонентами, а продолжительность производственного цикла сократилась с обычных сроков доставки от поставщика продолжительностью около двух-трёх недель до интервала порядка двух-трёх суток. Тем не менее задача повышения эффективности работы и качества 3D-печатных деталей требует постоянного улучшения технологий моделирования, выбора оптимальной ориентации изделия, точности позиционирования и условий печати. Примером этому служит внедрение специализированных конструктивных решений, таких как применение отверстий для снижения площади сцепления с подложкой и выбор правильных параметров опорных структур. Использование предложенной методики способствует решению проблем импортозамещения либо продлению срока эксплуатации устаревшего оборудования, компоненты которого больше не производятся промышленностью, однако продолжают функционировать.

Список литературы

1. ГОСТ Р 57 558–201. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. М.: ИПК Издательство стандартов, 2017. 11 с.
2. Мидуков Н. П., Литвинов М. А. Инженерная и компьютерная графика. Технологии 3D-печати, сканирования и моделирования деталей сложной формы: учебное пособие, СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. 80 с.
3. Федоскин И. А., Мидуков Н. П., Петрова Е. А., Мельникова Д. А., Чудаков Г. К., Куров В. С. Технология и дизайн при изготовлении рабочего колеса центробежного насоса с помощью 3D-технологий // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 3. С. 85–89.
4. Мидуков Н. П., Куров В. С. Использование 3D-печати для создания элементов оборудования химической технологии // Известия вузов. Технология легкой промышленности. 2021. № 3. С. 132–137.
5. Иванова И. Ю., Мидуков Н. П. Критический анализ способов 3D-сканирования для обратного инжиниринга деталей оборудования массоподготовительного отдела бумажного производства // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 4. С. 77–84.
6. Томилова О. В., Тверитина А. В., Вечерина А. А., Шабров К. Д. Современные методы расчета технологических машин и оборудования: учебное пособие. СПб.: СПбГУПТД, 2022. 153 с.
7. Levente C., Gábor R. Geometrical Analysis of 3D-Printed Polymer Spur Gears // Machines. 2025. No. 13. Pp. 422–431.
8. John K., Dimitrios C., Nectarios V., Konstantinos S., Nikolaos V. Key parameters controlling surface quality and



- dimensional accuracy: A critical review of FFF process. // Mater. Manuf. Process. 2022. No. 37. 963–984.
9. Hanon M. M., Zsidai L., Ma Q. Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors. // Mater. Today Proc. 2021. No. 42. Pp. 3089–3096.
 10. Vidakis N., Petousis M., Kechagias J. D. Parameter effects and process modelling of Polyamide 12 3D-printed parts strength and toughness // Mater. Manuf. Process. 2022. No. 37. Pp. 1358–1369.
 11. Sapieta M., Dekýš V., Drvárová B., Kaco M., Pástor M., Sapietová A. Investigation of the Mechanical Properties of Spur Involute Gearing by Infrared Thermography // Applied Science. 2023. No. 13. 5988–5999.
 12. Majko J., Vaško M., Handrik M., Sága M. Tensile properties of additively manufactured thermoplastic composites reinforced with chopped carbon fibre. // Materials. 2022. No. 15. Pp. 4224–4235.
 13. Vaško M., Sága M., Majko J., Vaško A., Handrik M. Impact Toughness of FRTP Composites Produced by 3D Printing // Materials. 2020. No. 13. 5654–5665.
 14. Nguyen V. D. Experimental investigation of 3d printed gears // TNU Journal of Science and Technology. Vol. 10. No. 230. Pp. 463–470.
 15. Hasan M. R., Davies I. J., Pramanik A., John M., Biswas W. K. Technical assessment of 3D-printed spur gears produced from recycled PLA // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2024. 42 p.
 16. Gupta K. Recent developments in additive manufacturing of gears: A review // In Advances in Manufacturing Technology XXXII. IOS Press: Amsterdam, The Netherlands. 2018; pp. 131–136.
 17. Basak A. K., Ghasseb J., Pramanik A. Performance of Gears Manufactured Through Additive Manufacturing // Metals. 2025. No. 15. Pp. 1–63.
 18. Veiga F., Arizmendi M., Villanueva P., Rodriguez D., Moriones I., Jime'nez A., Uralde V., Michaud P. Moving toward high-performance additive manufacturing: lightweight gear production // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17. No. 11. Pp. 1–11.
 19. Montemurro M., Bertolino G., Roiner T. A general multi-scale topology optimisation method for lightweight lattice structures obtained through additive manufacturing technology. Compos. Struct. 2021. Vol. 258, No. 15. Pp. 1–33.
 20. Devshette A. R., Mehta P., Zambare S., Patil G., Chaudhari V. Modeling and fabrication of 5-speed gearbox using 3d printing with optimum weight // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2023 Vol. 8. No. 1. Pp. 213–219.
 - modeling of complex parts: a tutorial, St. Petersburg: VShTE SPbGUPTD, 2022. 80 p.
 3. Fedoskin I. A., Midukov N. P., Petrova E. A., Melnikova D. A., Chudakov G. K., Kurov V. S. Technology and design in the manufacture of a centrifugal pump impeller using 3D technologies // Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. Industrial technologies. 2020. No. 3. Pp. 85–89.
 4. Midukov N. P., Kurov V. S. Using 3D printing to create elements of chemical engineering equipment // News of universities. Light industry technology. 2021. No. 3. Pp. 132–137.
 5. Ivanova I. Yu., Midukov N. P. Critical Analysis of 3D Scanning Methods for Reverse Engineering of Equipment Parts in the Stock Preparation Department of Paper Production // Bulletin of the Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4. Industrial Technologies. 2022. No. 4. Pp. 77–84.
 6. Tomilova O. V., Tveritina A. V., Veчерina A. A., Shabrov K. D. Modern Methods for Calculating Technological Machines and Equipment: A Tutorial. St. Petersburg: SPb-GUPTD, 2022. 153 p.
 7. Levente C., Gábor R. Geometrical Analysis of 3D-Printed Polymer Spur Gears // Machines. 2025. No. 13. Pp. 422–431.
 8. John K., Dimitrios C., Nectarios V., Konstantinos S., Nikolaos V. Key parameters controlling surface quality and dimensional accuracy: A critical review of FFF process // Mater. Manuf. Process. 2022. No. 37. Pp. 963–984.
 9. Hanon M. M., Zsidai L., Ma Q. Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors // Mater. Today Proc. 2021. No. 42. Pp. 3089–3096.
 10. Vidakis N., Petousis M., Kechagias J. D. Parameter effects and process modeling of Polyamide 12 3D-printed parts strength and toughness // Mater. Manuf. Process. 2022. No. 37. Pp. 1358–1369.
 11. Sapieta M., Dekýš V., Drvárová B., Kaco M., Pástor M., Sapietová A. Investigation of the Mechanical Properties of Spur Involute Gearing by Infrared Thermography // Applied Science. 2023. No. 13. 5988–5999.
 12. Majko J., Vaško M., Handrik M., Sága M. Tensile properties of additively manufactured thermoplastic composites reinforced with chopped carbon fibre // Materials. 2022. No. 15. Pp. 4224–4235.
 13. Vaško M., Sága M., Majko J., Vaško A., Handrik M. Impact Toughness of FRTP Composites Produced by 3D Printing // Materials. 2020. No. 13. Pp. 5654–5665.
 14. Nguyen V. D. Experimental investigation of 3d printed gears // TNU Journal of Science and Technology. Vol. 10. No. 230. Pp. 463–470.
 15. Hasan M. R., Davies I. J., Pramanik A., John M., Biswas W. K. Technical assessment of 3D-printed spur gears produced from recycled PLA // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2024. 42 p.
 16. Gupta K. Recent developments in additive manufacturing of gears: A review // In Advances in Manufacturing Technology XXXII. IOS Press: Amsterdam, The Netherlands. 2018. Pp. 131–136.

References

1. GOST R 57 558–201. Additive manufacturing processes. Basic principles. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2017. 11 p.
2. Midukov N. P., Litvinov M. A. Engineering and computer graphics. Technologies of 3D printing, scanning, and



17. Basak A. K., Ghassebi J., Pramanik A. Performance of Gears Manufactured Through Additive Manufacturing // Metals. 2025. No. 15. Pp. 1–63.
18. Veiga F., Arizmendi M., Villanueva P., Rodriguez D., Moriones I., Jimenez A., Uralde V., Michaud P. Moving toward high-performance additive manufacturing: lightweight gear production // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17. No. 11. Pp. 1–11.
19. Montemurro M., Bertolino G., Roiner T. A general multi-scale topology optimisation method for lightweight lattice structures obtained through additive manufacturing technology. Compos. Struct. 2021. Vol. 258. No. 15. Pp. 1–33.
20. Devshette A. R., Mehta P., Zambare S., Patil G., Chaudhari V. Modeling and fabrication of 5-speed gearbox using 3d printing with optimum weight // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2023. Vol. 8. No. 1. Pp. 213–219.

■ Информация об авторах

Лезин Кирилл Алексеевич, студент Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095.

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, 198095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-код 1021–6266, 694494, e-mail: mnp83@mail.ru.

■ Information about the authors

Lezin Kirill Alexeevich, student at the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh Street, St. Petersburg, 198095.

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, 198095; ORCID: 0000-0002-6153-655X, SPIN-code 1021–6266, 694494.



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И КОМПОНОВКИ ГИДРОПЛАНОВ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Иван Владимирович Ключкин, Павел Викторович Кауров

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

© Ключкин И. В., Кауров П. В., 2026

Автор-корреспондент И. В. Ключкин, klushkin09@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена поэтапному расчету процесса обезвоживания бумажной массы в зоне формирования плоскосеточных бумагоделательных машин. Возможности обезвоживающих элементов определяют скорость сетки, а значит и производительность бумагоделательных машин. Сеточные части бумагоделательных машин предназначены для формирования и обезвоживания суспензии, превращения её в бумажное полотно и формирование слоя осевших волокон. В этой части из бумажной массы удаляется большая часть не соединенной молекулярно воды. Обезвоживание в сеточной части в 60 раз дешевле, чем в прессовой и в 10 раз, чем в сушильной части. Сейчас это особенно актуально, т. к. от процесса обезвоживания зависит производительность бумагоделательных машин и качество получаемой готовой продукции. Качество бумаги напрямую зависит от формирования бумажной массы на сеточном столе. Эффективность процесса обезвоживания определяется характером изменения концентрации массы и высоты слоя суспензии вдоль сеточного стола. Структура бумажных волокон оказывает значительное влияние на процесс обезвоживания и на структуру образовавшегося бумажного полотна. В ходе работы были исследованы параметры гидропланов на действующих бумагоделательных машинах и произведен расчет обезвоживания с учетом свойств бумажной массы. Процесс обезвоживания в зоне формирования зависит от обезвоживающих элементов и от их конструкции, в частности от углов наклона гидропланов и от их расположения. В результате оказалось, что использование математического моделирования процесса обезвоживания в зоне формирования позволяет проработать большое количество всевозможных решений для подбора оптимальной конструкции гидропланов и компоновки сеточного стола. В будущем на основе данного исследования можно на этапе проектирования, а также при модернизации создавать оптимальные схемы зоны формирования плоскосеточных бумагоделательных машин с точки зрения их обезвоживающей способности.

Ключевые слова: бумагоделательная машина, обезвоживание бумажной массы, гидропланки, сеточный стол, участок формирования

Для цитирования: Ключкин И. В., Кауров П. В. Совершенствование конструкции и компоновки гидропланов на бумагоделательных машинах // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 25–30. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_25-30.

IMPROVEMENT OF THE DESIGN AND LAYOUT OF PAPER MACHINE HYDROFOILS

Ivan Vladimirovich Klyushkin, Pavel Viktorovich Kaurov

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

Corresponding author: I. V. Klyushkin, e-mail: klushkin09@mail.ru

ABSTRACT

The article is devoted to the stage-by-stage calculation of the dewatering process of paper pulp in the forming section of fourdrinier paper machines. The dewatering capacity of the elements determines the wire speed, and consequently, the productivity of paper machines. The wire sections of paper machines are designed to form and dewater the suspension, convert it into a paper web, and form a layer of settled fibers. The most of the free (unbound) water is removed from the paper pulp in this section. Dewatering in the wire section is 60 times cheaper than in the press section and 10 times cheaper than in the drying section.



This is especially relevant now, since the dewatering process determines the productivity of paper machines and the quality of the final product. Paper quality is directly determined by the formation of the paper stock on the wire frame. The efficiency of the dewatering process is determined by the dynamics of change in the mass concentration and the height of the suspension layer along the wire frame. The structure of paper fibers has a significant influence on the dewatering process and the structure of the formed paper web.

This study involved investigating hydrofoil parameters on operating paper machines and calculating dewatering with consideration for paper stock properties. Dewatering in the wire section is determined by the design and arrangement of the dewatering elements, particularly the tilt angles and placement of the hydrofoils. Therefore, mathematical modeling is a key tool for optimizing hydrofoil design and wire frame configuration by evaluating numerous dewatering scenarios. In the future, this research can be used to create optimal forming zone layouts for fourdrinier paper machines during the design stage and modernization with a focus on maximizing their dewatering capacity.

Keywords: paper machine, paper pulp drainage, hydrofoils, wire frame, forming section

For citation: Klyushkin I. V., Kaurov P. V. (2026) 'Improvement of the design and layout of paper machine hydrofoils', Technology and Energy, vol. 2, no. 2, pp. 25–30. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_25–30.

ВВЕДЕНИЕ

Главным оборудованием на целлюлозно-бумажных комбинатах является бумагоделательная машина (или БДМ). Её задача — превращать жидкую массу из волокон (суспензию) в готовую бумагу. Ключевой этап этого процесса — удаление воды, который происходит в так называемой «сеточной части» машины. Именно здесь масса начинает сильно обезвоживаться. Но важно не только это. Когда масса выливается на движущуюся сетку, потоки жидкости ориентируют волокна в определенном направлении — вдоль движения сетки. Это формирует слоистую структуру будущего бумажного полотна.

Таким образом, ключевые свойства бумаги закладываются в момент формирования полотна и напрямую зависят от процесса обезвоживания и укладки волокон. Исследованию обезвоживающей способности бумагоделательных машин в сеточной части посвящено большое количество научных трудов [1–4]. В нашей стране интерес к разработке таких методов расчета, в частности, вызван ещё и недостаточными возможностями по чисто экспериментальному определению обезвоживающей способности создаваемых сеточных частей на стадии проектирования.

Цель работы — проверка разработанной математической модели поэлементного расчета обезвоживания в зоне формирования бумагоделательных машин

и подбор оптимальной схемы сеточного стола с точки зрения максимально возможной обезвоживающей способности. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач: на действующих БДМ проверить разработанную математическую модель расчета процесса обезвоживания с учётом свойств бумажного полотна на этапе его формирования в сеточной части и подобрать расчетным путем оптимальную схему расположения и конструкцию гидропланок.

При предварительном определении обезвоживающей способности сеточных частей БДМ на стадии их разработки чисто экспериментальное её определение обычно трудоёмко и связано с большой затратой времени. Практическая значимость работы — использование методов математического моделирования может существенно облегчить ход проектирования и модернизации действующих бумагоделательных машин. Расчет обезвоживания в сеточной части бумагоделательных машин — это процесс со многими параметрами, направленный на снижение колебания качества бумаги и сохранение его на заданном уровне при длительных перерывах в работе, при смене параметров производства и после изменения расхода волокна. Для расчета обезвоживания в зоне формирования важным является прогнозирование свойств бумаги на основе данных о технологических параметрах процесса и конструктивных особенностей гидропланок. Расчетная схема сеточной части БДМ показана на рисунке 1.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Главными устройствами, которые удаляют воду на этапе формирования бумажного полотна в бумагоделательной машине, служат гидропланки. Их стандартное строение изображено на рисунке 2: с помощью обозначений X_k и X_f показано расположение элементов по горизонтали, а символом V обозначена скорость движения сетки.

Сетка бумагоделательной машины движется по ровной лицевой поверхности гидропланки. Передний край этого элемента скошен под углом 30 градусов для плавного контакта с сеткой; а основная рабочая поверхность может иметь очень небольшой уклон — от 0 до 5 градусов. При этом сама гидропланка должна быть абсолютно жесткой, чтобы не допустить даже малейшего изгиба или вибрации во время работы. Для создания

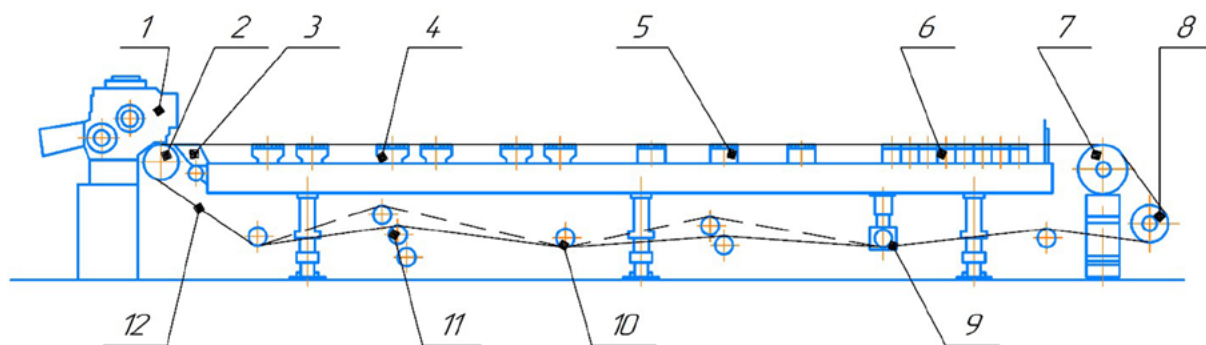


Рисунок 1. Сеточный участок бумагоделательной машины: 1 – напорный ящик; 2 – нажимной вал; 3 – формующий ящик; 4 – камера гидропланок; 5 – мокрый отсосной ящик; 6 – сухой отсосной ящик; 7 – гауч-вал; 8 – приводной валец; 9 – регистратор сетки; 10 – направляющий валец сетки; 11 – сетконатяжка; 12 – сетка

Figure 1. Paper machine wire section: 1 – head box; 2 – pressure roll; 3 – formation box; 4 – hydrofoils chamber; 5 – wet suction box; 6 – dry suction box; 7 – couch-roll; 8 – feed shaft; 9 – wire detector; 10 – wire guide roller; 11 – wire tensioner; 12 – wire

легкого импульса, заменяющего тряску и улучшающего формирование бумажного полотна, переднюю кромку гидропланки слегка закругляют. Кроме стационарных гидропланок применяют также гидропланки аналогичной формы, но с регулируемым углом наклона ее поверхности по отношению к сетке.

Основой для общего уравнения определения скорости фильтрации является закон Дарси [5]. Потеря напора описывается следующим уравнением:

$$\Delta H = \mu V_{\phi} a_g + \rho V_{\phi}^2 b_u,$$

где μ — динамическая вязкость воды (Па·с);
 V_{ϕ} — скорость фильтрации (с которой вода просачивается через массу) (м/с);
 ρ — плотность воды (кг/м³);
 a_g и b_u — коэффициенты, характеризующие сопротивление процессу обезвоживания: a_g отвечает за вязкостную составляющую, а b_u — за инерционную.

Расчет дренирования воды на свободных от прессования участках сетки выполняется по следующим формулам [4, 5]:

$$H(x) = h_n,$$

$$f(x) = \rho(x) \cdot g \cdot h_n,$$

где H — величина напора на участке, м;
 x — продольная координата вдоль оси сетки, м;
 g — гравитационная постоянная (ускорение свободного падения) (м/с²);
 h_n — сопротивление волокнистого слоя на сетке (м);
 $f(x)$ — функция изменения вакуума в зависимости от горизонтальной координаты (x).

Гидравлический напор на гидропланке вычисляется по формуле:

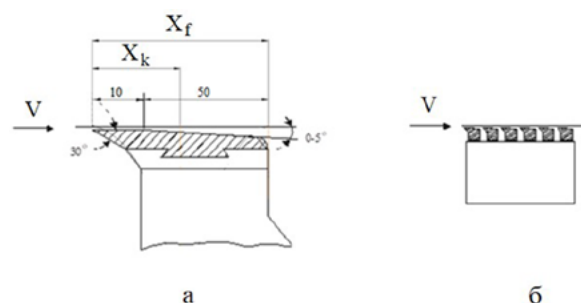


Рисунок 2. Гидропланки: а — одиночная гидропланка; б — блок гидропланок

Figure 2. Hydrofoils: a — single hydrofoil; б — hydrofoils block

$$H = \frac{V_{\phi}^2 \cdot \sin \beta \cdot h_p \cdot (1 - \cos \beta)}{8g \cdot X_k},$$

где X_k — горизонтальное расстояние от кромки гидропланки до зоны максимального давления восходящего фильтрационного потока (м);
 g — гравитационная постоянная (ускорение свободного падения, м/с²);
 h_p — высота слоя жидкой массы под сеточным полотном (м);
 β — заострения передней кромки гидропланки (°).

В следующей формуле представим скорость фильтрации:

$$V_{\phi} \cdot \sin \beta = \sqrt{2g(H - h_p - h_c)},$$

где h_n — сопротивление слоя бумажной массы на сетке (м) и h_c — гидродинамическое сопротивление сетки (м).

$$h_c = \zeta \cdot V_{\phi}^2,$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления сетки.



Рисунок 3. Начальные параметры для расчёта

Figure 3. Initial calculation parameters

Рисунок 4. Окно программы для ввода конструктивных параметров

Figure 4. Program window for input of design parameters

Скорость фильтрации воды в сбегающий водяной клин равна скорости увеличения расстояния между сеткой и наклонной поверхностью гидропланки:

$$V_{\phi} = V \cdot \operatorname{tg} \gamma,$$

где V — скорость сетки (м/с); γ — угол наклона гидропланки (градусы), поэтому высота слоя удаленной воды равна высоте слоя сбегающего водяного клина:

$$\Delta h = y = X \cdot \operatorname{tg} \gamma.$$

Так как процесс обезвоживания описывается уравнением баланса массы —

$$h_0 = h_n + \Delta h$$

и баланса волокна, определяется

$$h_0 C_0 = (h_n - \Delta l) C_0 + \Delta l \cdot C + \Delta h \cdot C_R,$$

где: Δl — прирост фильтрующего слоя (м); h_0, h_n — высота надсеточного слоя до и после обезвоживания соответственно (м); C_0 — концентрация массы в надсеточном слое (%); C — концентрация слоя осевших волокон (%); C_R — концентрация подсеточной воды (%).

Исходя из вышесказанного, скорость фильтрации можно выразить так:

$$V_{\phi} = \frac{d(\Delta h)}{dt} = \frac{V \cdot d(\Delta h)}{dX},$$

где Δh — толщина слоя бумажной массы, м.

Отсюда высота слоя удаленной воды окончательно будет равна:

$$\Delta h = \int_0^{X_k} \frac{1}{V_{\phi}} \sqrt{\left(\frac{V_{\phi}^2 \cdot \sin \beta}{2g} \sin \frac{\pi X}{2X_k} - h_n - \zeta \cdot V_{\phi}^2 \cdot \sin^2 \beta \right)} dX + \int_{X_k}^{2X_k} \frac{1}{V_{\phi}} \sqrt{\left(\frac{V_{\phi}^2 \cdot \sin \beta}{2g} \left(1 - \cos \frac{\pi X + 2\pi X_k}{2X_k} \right) - h_n - \zeta \cdot V_{\phi}^2 \cdot \sin^2 \beta \right)} dX.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс удаления воды был рассчитан пошагово для каждого участка сеточной части в отдельности. Расчёт для каждого следующего участка начинался с тех значений, которые были получены в результате вычислений для предыдущего участка. Таким образом, конечные данные одного этапа служили начальными данными для следующего расчёта (см. рисунок 3).

На следующем шаге в программу вносятся данные о конструкции каждого компонента сеточного отделения бумагоделательной машины (см. рисунок 4). Назовем эти параметры: длина напорного порога (грудной доски); длина наклонной рабочей поверхности гидропланки; угол, под которым установлена гидропланка относительно сетки; угол скоса передней кромки гидропланки; промежутки между всеми обезвоживающими элементами.

Расчёты для каждого элемента сеточного отдела бумагоделательных машин были выполнены с помощью алгоритма, заложенного в программу «Расчет мокрой части БДМ v 2.7.5». Внешний вид этой программы показан на рисунке 5.

С её помощью проанализировали процесс удаления воды из бумажной массы на работающих промышленных машинах, а результаты этих вычислений приведены в источнике [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью специально созданной программы поэлементного расчёта «Расчет мокрой части БДМ v 2.7.5» и предложенного алгоритма было выполнено определение сухости бумажной массы, которое учитывает конструкцию гидропланок для определения эффективности обезвоживания на сеточной части бумагоделательных машин в зоне формирования бумажного полотна.

Результаты этого моделирования и изучения процессов обезвоживания и формирования позволили сформулировать научно обоснованные предложения по улучшению устройства и конструкции обезвоживающих элементов в бумагоделательных машинах. В частности, было

установлено, что эффективность удаления воды можно повысить, изменяя углы наклона гидропланов и оптимально располагая их в зоне формирования, что позволяет из множества вариантов выбрать оптимальный.

Используя предложенную методику расчета обезвоживания в сеточных частях, можно существенно облегчить ход проектирования новых и модернизации действующих бумагоделательных машин.

Список литературы

1. Sjöstrand B. (2025) Easy-to-use numerical models of water removal in vacuum dewatering and molding during through air drying of tissue paper. *Drying Technology*. 43:(4);668–678. DOI: 10.1080/07373937.2024.2449177.
2. Hubbe M. A., Sjöstrand B., Nilsson L. et al. (2020) Rate-limiting mechanisms of water removal during the formation, vacuum dewatering, and wet-pressing of paper webs: areview. *BioResources* 15:9672–9755. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.hubbe>.
3. Коряковская Н. В., Бедердинова О. И. Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2022. № 1. С. 188–204.
4. Vieira J. C., Fiadeiro P. T., Costa A. P. (2023). Converting operations impact on tissue paper product properties: a review. *BioResources*. 18:(1); 2303–2326. DOI: 10.15376/biores.18.1Vieira.
5. Ревунов М. С. Моделирование поверхности потока бумажной массы на сетке бумагоделательной машины / М. С. Ревунов, Е. Н. Салмов. М: Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль, 2020. С. 43–50.
6. Ключкин И. В. Моделирование обезвоживания в зоне формирования бумагоделательных машин с учетом вариабельности свойств бумажной массы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. В. Ключкин; Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. СПб., 2022. 121 с.

References

1. Sjöstrand B. (2025) Easy-to-use numerical models of water removal in vacuum dewatering and molding during through air drying of tissue paper, *Drying Technology*, 43:4, 668–678, DOI: 10.1080/07373937.2024.2449177.

Информация об авторах

Ключкин Иван Владимирович, кандидат технических наук, заместитель директора института технологии, преподаватель кафедры основ конструирования машин Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4; SPIN-код: 1112–3051; e-mail: klushkin09@mail.ru.

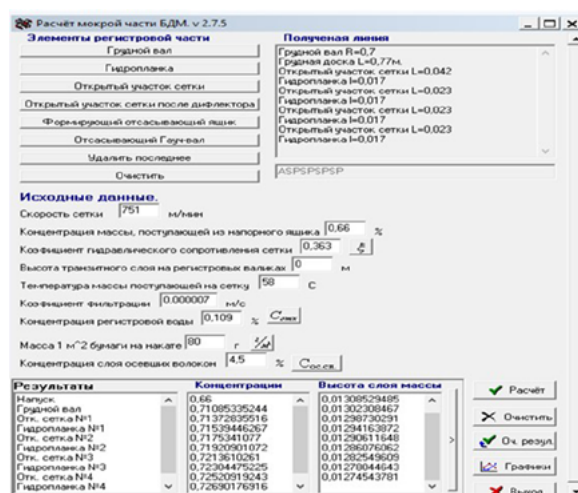


Рисунок 5. Окно программы с полученными результатами элементного обезвоживания в сеточной части БДМ

Figure 5. The program window with the obtained results of element-by-element dewatering in the paper machine wire section

2. Hubbe M. A., Sjöstrand B., Nilsson L. et al. (2020) Rate-limiting mechanisms of water removal during the formation, vacuum dewatering, and wet-pressing of paper webs: areview. *BioResources* 15:9672–9755. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.hubbe>.
3. Koryakovskaya N. V., Bederdinova O. I. Monitoring and Control of Paper Web Moisture. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 188–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-188-204>.
4. Vieira J. C., Fiadeiro P. T., Costa A. P. (2023). Converting operations impact on tissue paper product properties: a review. *BioResources*. 18:(1); 2303–2326. DOI: 10.15376/biores.18.1Vieira.
5. Revunov M. S., Salmov E. N. Simulation of paper pulp flow surface on paper making machine fabric. Moscow: Measurement. Monitoring. Management. Control, 2020. Pp. 43–50.
6. Klyushkin I. V. Modeling of dewatering in the formation zone of papermaking machines, taking into account the variability of the properties of paper pulp: dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg state university of industrial technologies and design, 2022. 121 p.

Кауров Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4; SPIN-код: 7225–7852, e-mail: pusto@mail.ru.

■ Information about the authors

Klyushkin Ivan Vladimirovich, PhD in Engineering, Deputy Director of the Institute of Technology, Lecturer at the Department of Machine Design Fundamentals of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 1112–3051; e-mail: klushkin09@mail.ru.

Kaurov Pavel Viktorovich, PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Machine Design Fundamentals of the Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivan Chernykh st., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 7225–7852, e-mail: pucmo@mail.ru.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА УПРАВЛЕНИЕ МАССОЙ БУМАГИ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

Мария Дмитриевна Анисимова, Валерий Николаевич Суриков

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

© Анисимова М. Д., Суриков В. Н., 2026

Автор-корреспондент: М. Д. Анисимова, e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена возможность снижения амплитуды колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины с помощью перенастройки существующего ПИД-регулятора системы управления массой бумажного полотна. Проведен статистический и спектральный анализ полученных с производства трендов массы и влажности бумажного полотна во время работы и после перехода бумагоделательной машины на другой режим. Изучены характер и диапазон колебаний массы бумажного полотна, выделены основные возмущения и их частота для моделирования работы системы управления. Рассмотрена амплитуда отклонения выходного сигнала моделируемой системы управления от заданного значения. Произведен краткий обзор существующих решений по снижению колебаний интересующего нас показателя, предлагавшихся ранее исследователями. Для подавления амплитуды возмущающих воздействий в статье рассмотрены несколько методов настройки ПИД-регулятора: Moros (1999), Minimum IAE — Pessen (1994), Minimum ISE — Zuang (1992), Minimum ISTES — Zuang (1992), Minimum ISE — Xing et al (2001) и Var der Grinten (1963). По результатам исследований рекомендуется в качестве одного из вариантов использовать метод Minimum ISE — Zuang (1992) для настройки ПИД-регулятора в установившемся режиме работы бумагоделательной машины для снижения амплитуды отклонений массы бумажного полотна при колебаниях параметра в диапазоне частот от 0,0003 до 0,001 Гц.

Ключевые слова: нестационарный случайный процесс, ПИД-регулятор, возмущения, случайный процесс, масса бумаги, управление бумагоделательной машиной

Для цитирования: Анисимова М. Д., Суриков В. Н. Влияние воздействия случайных возмущений на управление массой бумаги на бумагоделательной машине // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 31–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_31-36.

EFFECT OF RANDOM DISTURBANCES ON PAPER BASIS WEIGHT CONTROL IN A PAPER MACHINE

Maria Dmitrievna Anisimova, Valery Nikolaevich Surikov

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

Corresponding author: M. D. Anisimova, e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru

ABSTRACT

The paper discusses the possibility of reducing the amplitude of paper web basis weight fluctuations under steady-state paper machine conditions through retuning of the existing PID controller in the basis weight control system. Statistical and spectral analysis of production basis weight and moisture trends was conducted during operation and after the paper machine changed operating modes. The character and range of fluctuations of the paper web basis weight were studied, and the main disturbances and their frequency were identified for modeling the operation of the control system. The output signal deviation amplitude from the setpoint in the simulated control system is analyzed. A brief review is presented of previously proposed solutions for reducing fluctuations of the indicator in question. The article examines several PID controller tuning methods for suppressing the amplitude of disturbances: Moros (1999), Minimum IAE – Pessen (1994), Minimum ISE – Zuang (1992), Minimum ISTES – Zuang (1992), Minimum ISE – Xing et al (2001)



and Var der Grinten (1963). Based on the findings, the Minimum ISE – Zuang (1992) method is recommended for PID controller tuning during steady-state paper machine operation to reduce paper web basis weight deviation amplitude for parameter fluctuations in the 0.0003–0.001 Hz frequency range.

Keywords: unsteady random process, random process, PID controller, disturbances, random process, paper basis weight, paper machine control

For citation: Anisimova M. D., Surikov V. N. (2026) 'Effect of random disturbances on paper basis weight control in a paper machine', Technology and Energy, vol. 2 no. 2, pp. 31–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_31–36

ВВЕДЕНИЕ

Свойства бумажного полотна определяются составом бумажной массы и точностью управления технологическими параметрами бумагоделательной машины (БДМ) в процессе ее работы. К таким параметрам можно отнести скорость истечения бумажной массы из напорного ящика, давление воздушной подушки в напорном ящике, давление пара в сушильной части БДМ, расход наполнителей, концентрацию разбавленной массы, скорость машины и т. д. Все указанные переменные в идеальном случае должны поддерживаться на постоянном уровне, но на практике их значения колеблются вокруг установившихся средних величин, что приводит к варьированию показателей качества выпускаемой продукции, допустимые значения которых регламентируются нормами действующих стандартов в зависимости от вида вырабатываемой продукции, а бумага с колебаниями, выходящим за пределы норм стандартов, не является кондиционной [1].

Колебания массы бумажного полотна можно разделить на низкочастотные, высокочастотные и случайные. Происхождение длительных периодических возмущений веса бумажного полотна, как правило, обусловлено технологическими факторами. Происхождение высокочастотных колебаний обусловлено вибрацией узлов бумагоделательной машины и динамикой напуска массы на сетку. Случайная составляющая рассматриваемого явления представляет собой множество произвольных факторов, например, колебания гидропланок, возмущения от рядом стоящих машин и т. п. [9].

Обычно возмущения с частотами ниже 0,01 Гц практически устраняются автоматическими контурами управления, пассивными регулирующими устройствами (гидропланки и др.) и т. д.

На многих предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) России основой контуров автоматического регулирования остаются традиционные ПИД-регуляторы, обеспечивающие колебания управляемых параметров в границах, установленных регламентом.

Проблемой снижения колебаний массы бумажного полотна занимались М. С. Ревунов, Н. В. Лысова, С. В. Никулин, Н. В. Байкин и др.

В работах М. С. Ревунова [2; 3] для решения задачи снижения дисперсии массы бумажного полотна рассматривается вариант введения дополнительного контура регулирования соотношения скоростей напуска бумажной массы и сетки БДМ.

В работах Н. В. Лысовой [4, 5, 6] приведены обоснования применения алгоритма обработки информации на основе экстремальной фильтрации. Рассматривались алгоритмы управления с использованием методов оптимального, дробного и цифрового регулирования [4,5,6].

В работе С. В. Никулина [7] на основе подсистем регулирования массы бумажного полотна с использованием предиктора Смита была предложена комбинированная экстремальная система управления режимом работы БДМ, система управления положением верхней планки напорного ящика с использованием нейросети и экстремальная система определения минимума среднеквадратичного отклонения массы с помехозащищенным алгоритмом.

В патенте [8] Н. В. Байкина предлагаемый способ регулирования массы бумажного полотна заключается во введении корректировки открытия массовой задвижки при отклонении параметра концентрации перед напорным ящиком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью данного исследования является рассмотрение возможности снижения амплитуды колебаний массы

бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины с помощью перенастройки существующего ПИД-регулятора системы управления массой бумажного полотна. Для достижения



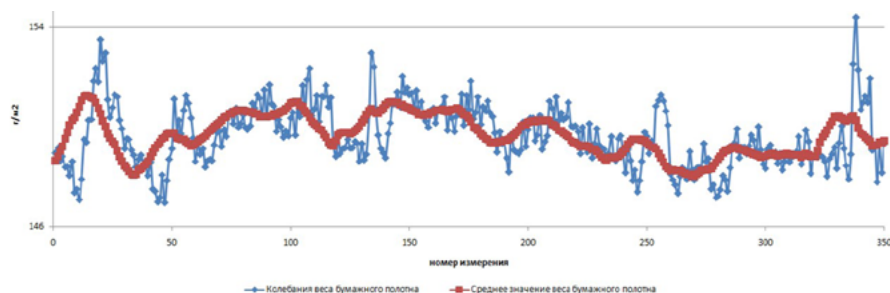


Рисунок 1. Статистический анализ колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины
Figure 1. Statistical analysis of paper web basis weight fluctuations in steady-state paper machine operation



Рисунок 2. Статистический анализ колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины
Figure 2. Statistical analysis of paper web basis weight fluctuations in steady-state paper machine operation

поставленной цели необходимо определить характер и диапазон колебаний массы бумажного полотна, выделить основное возмущение и его частоту для моделирования работы системы управления и рассмотреть амплитуду отклонения выходного сигнала моделируемой системы управления от заданного значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1 и 2 представлены результаты статистического анализа колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины, полученных с производства, дискретностью равной 1 минуте. Из рисунков видно, что колебания массы бумажного полотна носят случайный характер.

Согласно статистической обработке трендов данных по изменению массы бумажного полотна, диапазон изменения среднего значения массы бумажного полотна за смену составляет от 140,15 до 151,26 г/м²; диапазон изменения дисперсии массы бумажного полотна за смену составляет от 0,082 до 4,83. Таким образом, характеристики колебаний массы бумажного полотна изменяются со временем, что указывает на нестационарный случайный процесс. При этом временные масштабы дрейфа статистических характеристик (около 50 минут)

существенно превышают длительность переходного процесса системы регулирования (около 20 минут). В связи с этим для упрощения последующих расчётов допустимо принять процесс квазистационарным на интервалах, меньших времени дрейфа характеристик.

Для параметрического синтеза системы управления, как правило, выбирается одно основное возмущающее воздействие. Для чего проводят корреляционный анализ возмущений с регулируемым параметром. Для контура регулирования массы бумажного полотна таким возмущением является влажность бумажного полотна [10].

На рисунке 3 представлен спектральный анализ колебаний массы бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины. Спектральный анализ произведен с помощью быстрого преобразования Фурье в программной среде Matlab.

На рисунке 4 представлен спектральный анализ колебаний влажности бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины.

Согласно рисункам 3 и 4, большинство частот колебаний массы бумаги совпадают с частотами отклонений влажности бумажного полотна.

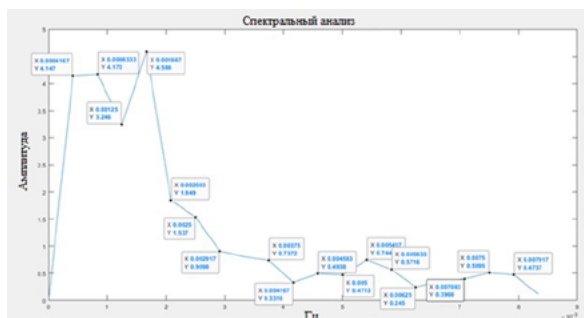


Рисунок 3. Спектральный анализ колебаний массы бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины

Figure 3. Spectral analysis of paper web basis weight fluctuations during the transition to a different operating mode of a paper machine

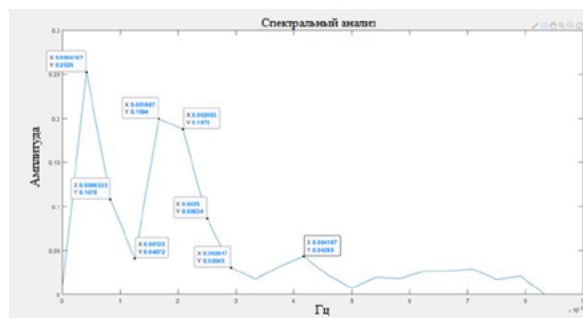


Рисунок 4. Спектральный анализ влажности бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины

Figure 4. Spectral analysis of paper web moisture content during the transition to a different operating mode of a paper machine

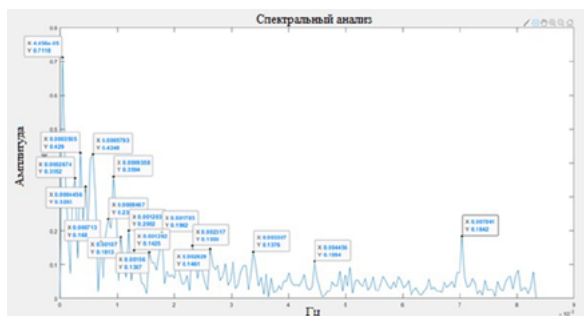


Рисунок 5. Спектральный анализ колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины

Figure 5. Spectral analysis of paper web basis weight fluctuations in steady-state paper machine operation

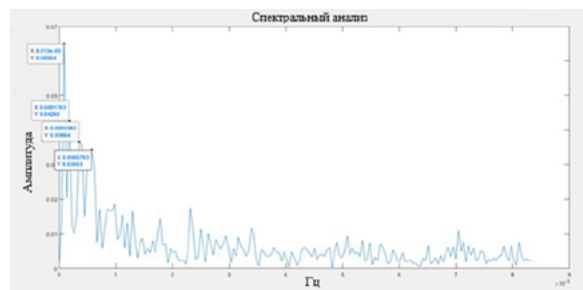


Рисунок 6. Спектральный анализ влажности бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины

Figure 6. Spectral analysis of paper web moisture content fluctuations in steady-state paper machine operation

На рисунке 5 представлен результат спектрального анализа полученных с производства колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины, дискретностью равной 1 минуте.

Согласно рисунку 5, в установившемся режиме работы бумагоделательной машины система управления не до конца подавляет частоты в диапазоне от $4,456 \cdot 10^{-5}$ до $4,456 \cdot 10^{-3}$ Гц; остальные частоты приводят к незначительному отклонению величины — менее $0,1 \text{ г/м}^2$ (далее не рассматриваются).

Спектральный анализ влажности бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины представлен на рисунке 6.

При сравнении рисунков 5 и 6 видно, что частоты колебаний влажности и массы бумажного полотна совпадают лишь частично, т. е. в контуре присутствует источник возмущения, не связанный с формированием свойства влажности бумажного полотна.

Краткосрочные колебания массы бумажного полотна возникают в диапазоне 0,4–40 Гц, они обычно связаны с колебаниями давления в напорном ящике или на более низких частотах с изменениями консистенции.

Периодические колебания в диапазоне 10–25 Гц обычно вызваны колебаниями давления от лопаток сортировок и асимметричных крыльчаток насосов. Периодические и случайные колебания давления могут возникать также в напорном ящике или в связанных с ним трубопроводах из-за механических вибраций ближайшего оборудования.

Нестабильный поток в плохо спроектированных трубопроводах может вызывать периодические колебания перепада давления, обычно на частотах 1–10 Гц. Дополнительное усиление колебаний массы бумажного полотна вызывается возникновением волн в бумажной массе на сетках плоскосеточных БДМ. Этот эффект может быть максимальным на частоте из диапазона 4–40 Гц, которая зависит от скорости машины и длины сетки [1].

Таблица 1. Сравнение отношений амплитуд колебаний выходного сигнала к исходному при различных настройках ПИД-регулятора
Table 1. Comparison of output signal fluctuation amplitude ratios under different PID tuning parameters

	Moros (1999)	Minimum IAE — Pessen (1994)	Minimum ISE — Zuang (1992)	Minimum ISTES — Zuang (1992)	Minimum ISE — Xing et al (2001)	Var der Grinten (1963)
Отношение амплитуд вых. к исх.	0,77	11,6	0,4	0,45	7,6	1,8

Согласно спектральному анализу колебаний массы бумажного полотна, в установившемся режиме работы БДМ наибольшее отклонение массы бумажного полотна от заданного значения вносится сверхнизкими частотами.

Для подавления амплитуды возмущающих воздействий в статье рассмотрены несколько методов настройки ПИД-регулятора: Moros (1999), Minimum IAE — Pessen (1994), Minimum ISE — Zuang (1992), Minimum ISTES — Zuang (1992), Minimum ISE — Xing et al (2001) и Var der Grinten (1963) [11]. В среде Matlab Simulink была построена модель системы управления, состоящая из ПИД-регулятора с идеальной структурой и объекта управления в виде апериодического звена первого порядка с равным 0,25 соотношением τ/T . Возмущающее воздействие подавалось на выход объекта управления в виде синусоиды с параметрами согласно спектральному анализу массы бумажного полотна. Методы настройки регулятора выбирались согласно соотношению τ/T объекта управления и оптимизации интегрального критерия качества, который широко применяется для оценки качества переходных процессов систем управления с случайной составляющей. Для сравнения также были выбраны настройки Moros (1999) и Var der Grinten (1963). В таблице представлены результаты моделирования системы управления с различными настройками и оценка степени их подавления возмущающих воздействий. В строчке таблицы указано среднее отношение амплитуд колебаний массы бумажного полотна на выходе моделируемой системы к исходным значениям амплитуды колебаний, полученных с производства по нескольким частотам.

Из таблицы 1 видно, что наименьшим коэффициентом усиления обладает настройка ПИД-регулятора Minimum ISE — Zuang (1992), а наибольшим Minimum IAE — Pessen (1994). Рекомендуется в качестве одного из вариантов использовать метод Minimum ISE — Zuang (1992) для настройки ПИД-регулятора в установившемся режиме работы БДМ для снижения амплитуды отклонений массы бумажного полотна при колебаниях параметра в диапазоне частот от 0,0003 до 0,001 Гц. Таким образом, существует возможность снижения амплитуды колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины

с помощью перенастройки существующего ПИД-регулятора системы управления массы бумажного полотна и существует возможность использования различных настроек при устоявшемся режиме и после перехода БДМ на другой режим работы.

Список литературы

1. Parker J. R., Epton J. B. A. The analysis of disturbances affecting paper machines // The role of fundamental research in paper-making: Trans. of the VIIth Fund. Res. Symp. Cambridge, 1981. Cambridge, 2018. Pp. 785–807. DOI: 10.15376/frc.1981.2.785.
2. Ревунов М. С., Ревунов Д. С., Семенов А. Д. Повышение эффективности автоматизированной системы управления технологическим процессом регулирования массы бумажного полотна // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1(43). С. 17–23. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-1-2. EDN: IZVTVM.
3. Ревунов М. С. Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4(26). С. 24–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-4-4.
4. Лысова Н. В., Никулин С. В., Семенов А. Д. Моделирование системы экстремального регулирования дисперсии веса бумажного полотна // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): Междунар. науч.-техн. конф., 14–16 марта 2017 г.: сб. науч. тр. 2017. С. 932–935.
5. Лысова Н. В., Мясникова Н. В. Регулирование веса бумажного полотна на основе метода экстремальной фильтрации для систем реального времени с помощью кадровой обработки сигнала // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5. С. 31–39.
6. Лысова Н. В. Повышение быстродействия алгоритмов обработки информации и управления автоматизированной системы формирования бумажного полотна: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. Пенза, 2022. 149 с.
7. Никулин С. В. Совершенствование функциональных подсистем АСУТП бумажного производства на основе экстремального, нейросетевого и предиктивного управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Пенза, 2016. 160 с.
8. Пат. 2735402 Российская Федерация, МПК D21F 1/06 (2006.01), D21F 1/08 (2006.01), D21F 7/00 (2006.01). Способ регулирования веса 1 м² бумажного полотна / Байкин Н. В.,



- Салмов Е. Н., Байкин С. Н.; заявл. 04.02.2020; опубл. 30.10.2020. 9 с.
9. Куров В. С., Тихонов Ю. А. Гидродинамика процессов массоподачи на бумагоделательную машину. Санкт-Петербург, 2010. 264 с.
 10. Анисимова М. Д., Суриков В. Н. О повышении точности управления весом бумажного полотна в условиях возмущений // Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса: материалы Всерос. отраслевой науч.-практ. конф. 2024. С. 135–143.
 11. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London, 2009.

References

1. Parker J. R. and Epton J. B. A. (2018) 'The analysis of disturbances affecting paper machines', in *The role of fundamental research in paper-making: Transactions of the VIIth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 1981. Cambridge: FRC, pp. 785–807. doi: 10.15376/frc.1981.2.785.
2. Revunov M. S., Revunov D. S. and Semenov A. D. (2023) 'Improving the efficiency of the automated process control system for regulating paper web mass', *Measurement. Monitoring. Control*, vol. 43, no. 1, pp. 17–23. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-1-2. EDN: IZVTVM.
3. Revunov M. S. (2018) 'Improving the stabilisation systems of paper stock flow parameters using a cross-correlation algorithm', *Measurement. Monitoring. Control*, vol. 26, no. 4, pp. 24–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-4-4.
4. Lysova N. V., Nikulin S. V. and Semenov A. D. (2017) 'Modeling an extreme control system for paper web weight dispersion', in *Promising information technologies (PIT 2017): International Scientific and Technical Conference*, 14–16 March 2017: collection of scientific papers. Samara, pp. 932–935.
5. Lysova N. V. and Myasnikova N. V. (2019) 'Paper web weight control based on the extreme filtering method for real-time systems using frame signal processing', *Engineering Journal of Don*, no. 5, pp. 31–39.
6. Lysova N. V. (2022) Improving the performance of information processing and control algorithms for an automated paper web forming system. PhD thesis. Penza State University.
7. Nikulin S. V. (2016) Improving the functional subsystems of the automatic process control system for paper production based on extreme, neural network and predictive control. PhD thesis. Penza State University.
8. Baykin N. V., Salmov E. N. and Baykin S. N. (2020) 'Method for controlling the weight per 1 m² of a paper web', *Russian Patent 2735402*. Filed 4 February 2020, issued 30 October 2020.
9. Kurov V. S. and Tikhonov Yu. A. (2010) Hydrodynamics of mass supply processes to a paper machine. Saint Petersburg: Polytechnic University Publishing House.
10. Anisimova M. D. and Surikov V. N. (2024) 'On improving the accuracy of paper web weight control under disturbance conditions', in *Innovative solutions in the development of the pulp and paper industry and timber industry complex: Proceedings of the All-Russian industry scientific and practical conference*. Saint Petersburg: VShTE SPbGUPTD, pp. 135–143.
11. O'Dwyer A. (2009) Handbook of PI and PID controller tuning rules. London: Imperial College Press.

Информация об авторах

Анисимова Мария Дмитриевна, ассистент кафедры информационно-измерительных технологий и систем управления и кафедры автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095; SPIN-код: 9714–2276; Author ID: 1320819; e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru.

Суриков Валерий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095; SPIN-код: 3077–4855; Author ID: 958855; e-mail: atpp_drugova@mail.ru.

Information about the authors

Anisimova Maria Dmitrievna, Assistant at the Department of Information and Measurement Technologies and Control Systems and at the Department of Automation of Technological Processes and Productions, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095; SPIN-code: 9714–2276; Author ID: 1320819; e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru.

Surikov Valery Nikolaevich, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Technological Processes and Productions, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095; SPIN-code: 3077–4855; Author ID: 958855; e-mail: atpp_drugova@mail.ru.



Уважаемые господа!

20 лет издательство «Профессия» выпускает современные справочники и практические руководства для специалистов различных отраслей.

Это технологи и инженеры, менеджеры по производству, конструкторы, сотрудники лабораторий и служб качества.

Это исследователи, разработчики новых методик и продуктов, ученые, преподаватели, студенты и аспиранты, сотрудники сертификационных центров и контрольно-регламентирующих органов.

Более 50% книг — переводы современных зарубежных справочников и практических руководств. В каталоге тысячи изданий, в том числе по темам:

- Упаковка. Материалы и технологии
- Нефтедобыча, нефтепереработка, нефтехимия
- Полимеры: материалы и технологии
- Химические технологии и оборудование
- Водоснабжение, канализация, очистка воды, водоподготовка

Многие известные за рубежом книги были впервые переведены и изданы нами.

Приглашаем вас к участию в наших проектах!

Ваши продукты и услуги будут востребованы так же, как современные знания и зарубежный опыт, изложенные на страницах наших книг.

Вместе мы сможем повысить профессиональный уровень отечественных специалистов, улучшить качество и культуру производства, усовершенствовать управление на предприятиях!



www.professija.ru

Тел.: +7 (812) 740-12-60, e-mail: zuev@professija.ru

Пишите, звоните, будем рады сотрудничеству!

Представляем вашему вниманию перевод немецкой книги, посвященной рециклингу, в том числе переработке отходов бумаги и картона:

Рециклинг. Технологии и оборудование вторичной переработки / Г. Мартенс, Д. Голдман; перевод с нем. СПб. : Профессия, 2019. 544 с., ил., табл.

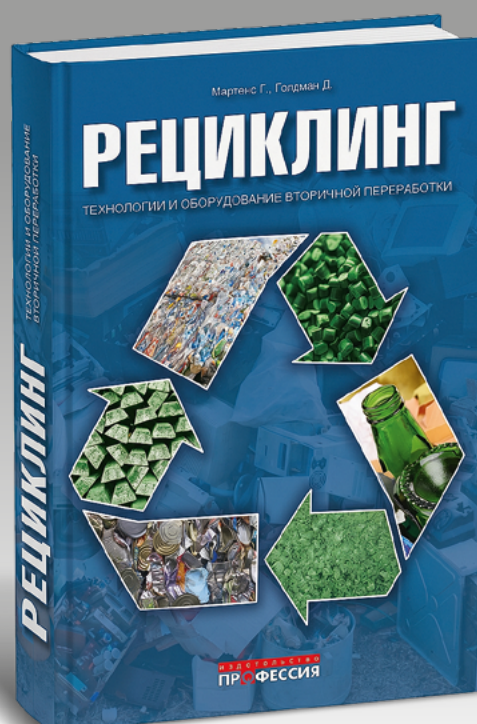
В издании на современном уровне дано представление о технологиях и оборудовании рециклинга, включая сбор отходов, проведение подготовительных мероприятий, первичную механическую обработку, получение вторичного сырья и его переработку в новые базовые и технологические материалы. Большое внимание уделено важным практическим примерам, организационным аспектам и научным основам вторичной переработки.

Показаны различия в пригодности к вторичной переработке различных металлов, пластмасс, бумаги, стекла, керамики и строительных материалов, описаны типичные технологии рециклинга. Рассмотрена переработка комплексной продукции — автомобилей, электрических и электронных изделий, элементов питания и др. Освещены вопросы рециклинга соединений металлов, растворов, лакокрасочных материалов, растворителей и масел.

Издание содержит большое количество облегчающих понимание иллюстраций и технологических схем.



Книга на сайте
издательства



КРОНА ИНСТИТУТ «КРОНА»

В 2026 году исполняется 20 лет со дня основания Института комплексного развития и обучения «КРОНА».

Двадцать лет назад руководством университета растительных полимеров СПбГТУРП, в прошлом Ленинградского технологического института целлюлозно-бумажной промышленности (ЛТИ ЦБП), было принято решение о реорганизации системы дополнительного профессионального образования (ДПО) путём объединения её разных подразделений в одну структуру. Так образовался Институт «КРОНА». Развивать новую систему ДПО было поручено проректору по инновационным вопросам университета А. Н. Иванову, назначенному на должность директора Института «КРОНА», которую он занимает до настоящего времени.

В самом начале работы институтом были выбраны основные стратегические направления развития деятельности, в которые вошли следующие разделы:

- 1.** Установление более тесных деловых контактов с предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности на платформе повышения профессиональной квалификации их специалистов.
- 2.** Привлечение к системе ДПО специалистов гофроиндустрии России и стран СНГ, в которой полностью отсутствовали механизмы повышения квалификации работников.

3. Вовлечение в систему ДПО университета работников топливно-энергетического комплекса России. На основании того, что в университете находится сильный факультет промышленной энергетики, который много лет обеспечивает специалистами-теплоэнергетиками не только энергетические генерирующие организации, но и тепловые хозяйства промышленных предприятий разных отраслей СЗФО и России.

4. Установление международных контактов с зарубежными профильными учебными и научными организациями и фирмами — мировыми лидерами в своих областях.

За прошедший период по всем направлениям работы удалось добиться существенных результатов.

В первые годы было создано несколько базовых учебных программ по основным разделам технологии ЦБП: БДМ, КДМ, механика, энергетика, автоматизация, экология. Установлены тесные контакты со всеми предприятиями ЦБП России, а также Белоруссии, Украины, Казахстана. Благодаря проведению семинаров, курсов и конференций по этим направлениям сформировались несколько наиболее востребованных программ, которые впоследствии стали регулярными и проводятся в Институте «КРОНА» ежегодно с системным обновлением их содержания.

Особым направлением работы является создание программ обучения и повышения квалификации для работников гоф-



Оживленная дискуссия в рамках конференции по технологии ЦБП



Встреча с директорами отраслевых предприятий

ВЧЕРА. СЕГОДНЯ. ЗАВТРА

роиндустрии, для которой в России полностью отсутствовали учебные заведения по подготовке специалистов средней и высшей квалификации. В этой области «КРОНЕ» пришлось с «чистого листа» начать создание учебных программ на основе зарубежного опыта и предлагать их специалистам гофроиндустрии. За последние годы было создано несколько тематических программ по различным разделам гофропроизводства, которые до сих пор пользуются повышенным спросом: «Технология гофропроизводства», «Печать на гофро материалах», «Контроль качества готовой продукции».

Кроме того, и по собственной инициативе, и по заказу предприятий «КРОНА» создала несколько электронных учебных пособий в области гофроиндустрии.

По аналогии с гофропроизводством «КРОНА» создавала комплекс программ для специалистов «Топливно-энергетического комплекса». Среди них особый интерес слушатели проявляют к следующим: «Проблемы в электроэнергетике», «Повышение эффективности работы тепловых хозяйств промпредприятий», «СРК и выпарка», «Подготовка воды для теплоэнергетических предприятий».

В области международных отношений «КРОНА» за короткий период установила и впоследствии успешно поддерживала плотные и разносторонние деловые и взаимовыгодные контакты с более чем 50 фирмами, компаниями и учебными центрами Европы и Северной Америки, лидерами в сфере ЦБП. Сегодня эти программы временно приостановлены.

В настоящее время учебные программы Института «КРОНА» востребованы специалистами ЦБП в той или иной степени. Поэтому Институт «КРОНА» постоянно обновляет содержание своих регулярных программ. В дополнение к очным программам в Институте «КРОНА» постоянно создаются электронные учебные продукты для использования их во время online и offline обучения на разных носителях и в различных местах.

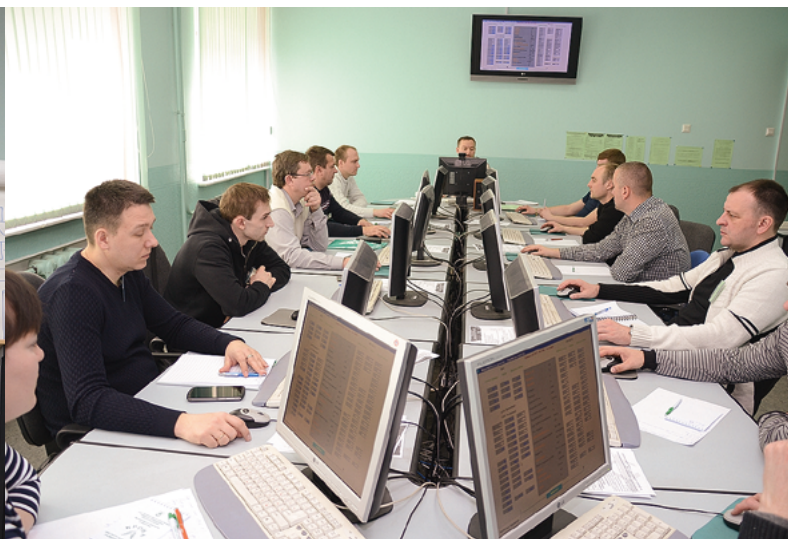
В связи с тем, что в последнее время на авансцену трудовых ресурсов выходит новое молодое поколение, которое во время своего обучения уже активно использовало различные электронные устройства, будущее Института «КРОНА» связано с внедрением в профессиональную деятельность специалистов ЦБП продуктов искусственного интеллекта.



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



Победители конкурса «Лучший энергетик ЛПК России – 2016»



Работа с компьютерным тренажером «Контроль качества бумаги»

ОАО «Селенгинский ЦКК» представляет собой крупный промышленный комплекс, специализирующийся на производстве сульфатной небелёной целлюлозы и тарных видов картона, а также на производстве гофротары. Годовой объем производства целлюлозной продукции составляет свыше 120 тыс. тонн, гофропродукции более 40 миллионов квадратных метров.

Территориальное расположение предприятия в Республике Бурятия и наличие собственных подъездных ж/д путей позволяют Селенгинскому ЦКК обеспечивать доставку товаров во все регионы России — от Сибири и Дальнего Востока до Центрального и Южного федеральных округов. Также комбинат имеет значительный опыт поставок на экспорт.

Вся продукция, начиная от картона и заканчивая гофроупаковкой, соответствует установленным в России стандартам и сертификатам качества, таким как: декларация соответствия на картон для пищевой продукции, декларация соответствия на гофроящики для пищевой продукции, сертификат соответствия по системе РосТ СТ-1, сертификат «Сделано в России» и т. д.



Сотрудничество с Институтом «Крона»:

Селенгинский ЦКК благодарит институт «Крона» за многолетний опыт плодотворного сотрудничества в сфере профильного обучения персонала, который насчитывает более 20 лет. За эти годы сотрудники предприятия многократно и успешно проходили обучение по таким направлениям, как — технология производства картона и гофрокартона, технологическое обслуживание оборудования, автоматизация производства, контроль качества продукции ЦБП и гофроиндустрии, повышение эффективности энергетических хозяйств предприятий, метрологическое обеспечение производства, управление персоналом и так далее. Институт успешно разрабатывал для комбината обучающие программы различных направлений ЦБП.

Хотим пожелать нашим коллегам дальнейшего профессионального развития, новых достижений, побед и горизонтов! Надеемся на дальнейшее сотрудничество!



«Каппа Рус» — ведущий производитель гофрокартонной упаковки Северо-Западного региона



Компания «Каппа Рус» является одним из ведущих производителей гофрокартонной упаковки в Северо-Западном регионе России, входит в топ-10 производителей гофрокартона страны и занимает лидирующие позиции по продажам пакетов Bag-in-Box для розлива вина и жидких пищевых продуктов.

С января 2025 года в состав компании вошла бумажная фабрика «Каппа Рус Окуловка». Это позволило предприятию не только стать вертикально интегрированным бизнесом, но и эффективно работать в рамках экономики замкнутого цикла.

Окуловская фабрика — одно из старейших предприятий отрасли с историей более 170 лет. С 1856 года предприятие прошло путь от небольшой фабрики по производству упаковки для сахара до современного высокотехнологичного производства. В преддверии очередного юбилея фабрика достигла рекордных показателей производственных мощностей.

Сегодня в ассортименте предприятия — бумага для гофрирования и картон для плоских слоёв общим объёмом производства до 93 тыс. тонн в год. Среди выпускаемых марок бумаги для гофрирования — NV-FLUTE плотностью 90–175 г/м² и шириной до 2,5 м, изготовленная из макулатурного сырья марки MC-5Б. Линейка картона для плоских слоёв представлена маркой NV-LINER плотностью 100–175 г/м² и шириной до 2,5 м, также производимой из макулатурного сырья марки MC-5Б.

В ассортимент продукции также входит упаковка для яиц — до 100 млн штук ежегодно. Компания выпускает шесть видов лотков для яиц, включая премиальные и биржевые контейнеры с возможностью нанесения печати, и этикетки.

В компании регулярно происходят значимые события, направленные на развитие производства и повышение комфорта сотрудников. В конце прошлого года был открыт новый современный офис для машинистов бумагоделатель-

ных машин. Светлое и просторное помещение с прозрачными стеклянными перегородками позволило по-новому организовать рабочее пространство, консолидировать рабочие места операторов и повысить эффективность взаимодействия персонала.

«Каппа Рус Окуловка» последовательно реализует политику социальной ответственности, поддерживая инициативы в сфере образования, благоустройства и развития местных сообществ. В текущем году компания приняла участие в капитальном ремонте детского сада № 4 в городе Окуловка — важного объекта социальной инфраструктуры. Проект реализуется в рамках государственной программы с привлечением внебюджетного софинансирования. Компания направила на его реализацию порядка 1 млн рублей. Поддержка территорий присутствия и повышение качества жизни населения останутся одними из ключевых приоритетов предприятия.

В 2026 году была завершена работа над исторической музейной экспозицией предприятия. «Каппа Рус Окуловка» представила новый стенд, посвящённый советскому периоду 1967–1994 годов — эпохе трудовой доблести, масштабного развития и созидательного труда. Сегодня гости предприятия могут познакомиться с полной историей фабрики с 1856 года.

Особое внимание компания уделяет развитию персонала и повышению профессионального уровня сотрудников. «Каппа Рус Окуловка» и Институт комплексного развития и обучения «Крона» связывает многолетнее сотрудничество, которое продолжается уже более десяти лет. За это время обучение по 38 образовательным программам прошли более 200 сотрудников предприятия. Спектр программ включает направления в области экологии, целлюлозно-бумажной промышленности, управления качеством, теплоэнергетики, бережливого производства и повышения эффективности работы в различных сферах деятельности.

Обзорная статья

УДК: 338.45.01+332.122

DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_42-48

КЛАССИФИКАЦИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

Анатолий Петрович Дзюба

Кафедра систем управления энергетикой и промышленными предприятиями Уральского федерального университета,
Екатеринбург, Россия

© Дзюба А. П., 2026

E-mail: dzyuba-a@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается актуальная проблема роста затрат промышленных предприятий Российской Федерации на электрическую энергию в условиях 2025–2026 годов. Отмечается, что под влиянием санкционных ограничений, спада спроса на отечественную продукцию и значительного повышения тарифов на топливно-энергетические ресурсы, средний рост цен на электроэнергию в регионах России составил в 2025 году 14 %, а в 2026 году ожидается не менее существенная динамика. В этих условиях повышение энергетической эффективности национальной экономики становится одним из ключевых факторов обеспечения конкурентоспособности промышленности. Ключевая идея работы заключается в том, что традиционные подходы, направленные исключительно на снижение удельных объемов потребления (замена оборудования, энергоаудит объектов), должны быть дополнены ценовыми механизмами управления затратами. Для систематизации предлагаемых решений автор разрабатывает классификацию из четырех категорий: внешние объемные (замещение видов топлива, технологические изменения), внутренние объемные (внедрение энергосберегающего оборудования), внешние ценовые (выбор тарифа, работа на оптовом рынке, контроль расчетов поставщиков) и внутренние ценовые (управление спросом, когенерация, накопители, аудит присоединения и учета) направления деятельности. Особое внимание уделено двум последним категориям, которые ранее в отечественной практике прорабатывались недостаточно. В статье детально описываются 6 инструментов внешних ценовых решений и 12 инструментов внутренних ценовых решений. Автор приходит к выводу, что современные условия развития электроэнергетики России открывают новые направления для повышения эффективности, позволяющие снижать затраты на закупку электроэнергии без изменения удельных показателей потребления. Предложенная классификация и детализация инструментов могут служить практическим руководством для энергоменеджеров промышленных предприятий при формировании программ энергосбережения на 2027–2030 годы.

Ключевые слова: энергозатраты, экономика промышленности, энергетическая эффективность, тарифы на электроэнергию, оптовый рынок электроэнергии, управление спросом, когенерация, аудит тарифов, технологическое присоединение

Для цитирования: Дзюба А. П. Классификация направлений оптимизации затрат на потребление электроэнергии промышленными предприятиями // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 42–48. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_42-48

CLASSIFICATION OF COST OPTIMIZATION STRATEGIES FOR INDUSTRIAL ELECTRICITY CONSUMPTION

Anatoly Petrovich Dzyuba

Department of Energy Management Systems and Industrial Enterprises, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

E-mail: dzyuba-a@yandex.ru



ABSTRACT

This paper examines the current problem of growing electricity costs for industrial enterprises in the Russian Federation in 2025–2026. Driven by sanctions, weak domestic demand, and higher energy tariffs, the average electricity price increase in Russian regions reached 14 % in 2025, and a similarly significant rise is forecast for 2026. In this context, raising the energy efficiency of the national economy is becoming a key factor for maintaining industrial competitiveness. According to the key idea of this work, traditional approaches that focus exclusively on reducing unit consumption (e. g., equipment replacement, energy auditing of facilities) need to be supplemented with price-based cost management mechanisms. The author systematizes the proposed solutions by developing a classification comprising four categories of activity: external volumetric (fuel switching, technological changes), internal volumetric (introduction of energy-efficient equipment), external pricing (tariff choice, wholesale market operations, control over supplier billing), and internal pricing (demand-side management, cogeneration, storage devices, auditing of grid connection and energy metering). Special attention is devoted to the last two categories, which previously in domestic practice had been worked out insufficiently. The article describes in detail 6 instruments of external price-based solutions and 12 instruments of internal price-based solutions. The author concludes that Russia's evolving power sector conditions offer new efficiency opportunities – reducing electricity procurement costs without affecting unit consumption. The proposed classification and instrument details offer industrial energy managers a practical guide for designing 2027–2030 energy saving programs.

Keywords: energy costs, industrial economics, energy efficiency, electricity tariffs, wholesale electricity market, demand management, cogeneration, tariff audit, technological connection

For citation: Dzyuba A. P. (2026) 'Classification of cost optimization strategies for industrial electricity consumption', Technology and Energy, vol. 2, no. 2, pp. 42–48. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_42–48

ВВЕДЕНИЕ

Промышленный комплекс России в очередной раз проходит фазу не самых простых времен. Влияние санкций, спад спроса на продукцию отечественной индустрии в 2025–2026 годах усложняется значительным ростом цен на потребляемые топливно-энергетические ресурсы [1]. В 2025 г. средний рост цен на электрическую энергию в регионах России составил 14 % [2], в 2026 г. рост цен на электроэнергию ожидается с не менее значительной динамикой. На рост цен на электроэнергию влияет значительное количество факторов, таких как рост цен на топливно-энергетические ресурсы, потребляемые электроэнергетикой (уголь, природный газ и т. п.), рост цен на транспортные расходы (железнодорожные

и автомобильные перевозки), рост цен на ремонтные материалы и комплектующие (изделия металлургии, машиностроения, электротехнической и химической промышленности), рост требуемого уровня заработной платы персонала и пр.

Рост цен на потребление электроэнергии приводит к росту себестоимости продукции в отечественной промышленности, а также росту себестоимости оказываемых услуг прочими отраслями экономики [3]. В условиях современного влияния международных санкций важным направлением повышения эффективности экономики России является реализация очередного этапа повышения уровня энергетической эффективности национальной экономики [4].

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

С 2009 года в России прошла масштабная государственная кампания по реализации политики в области энергосбережения и повышения уровня энергетической эффективности [5]. Однако при достижении определенных результатов реализации мер в масштабах экономики страны интенсивность государственных мер была снижена [6]. Одной из важных причин этого являются сравнительно низкие тарифы на энергоресурсы, не столь значительно стимулирующие потребителей к их экономии [7]. Современные условия роста цен определяют необходимость возобновления принятия мер в области повышения энергетической эффективности в России.

Следует уточнить, почему речь идет именно о важности повышения энергетической эффективности именно в области потребления электроэнергии. Дело в том, что электрическая энергия является универсальным энергетическим ресурсом, который вырабатывается на основе использования основных видов ТЭР, добываемых остальными отраслями топливно-энергетического комплекса (газ, уголь, мазут и пр.), и заменяет основные виды энергоносителей, которые могут преобразовываться в другие виды энергии (тепловую, механическую, энергию света, химическую энергию и т. п.) [8]. Таким образом, при повышении эффективности потребления электроэнергии производится повышение эффективности потребления и первичных ТЭР.



В период активного действия первой волны российской государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в России (2009–2016 годы) все меры были направлены на снижение удельного потребления энергоресурсов на производство единицы товаров и оказание услуг. Это достигалось за счет следующих направлений [9]:

- 1) обязательный энергетический аудит объектов энергопотребления с выявлением слабых мест, планированием и реализацией мероприятий в области повышения эффективности энергопотребления;
- 2) широкое использование более энергетически эффективного энергопотребляющего оборудования (энергосберегающих ламп, систем регулирования энергопотребления и пр.);
- 3) обязательный учет всех потребляемых энергетических ресурсов (ГВС, ХВС, потребления тепловой энергии);
- 4) привлечение внимания политики энергосбережения к бытовому энергопотреблению и потреблению ТЭР в сфере ЖКХ;
- 5) перманентный контроль энергопотребления, разработка энергосберегающих мероприятий и их реализация с последующей отчетностью перед специализированными органами.

При этом в период первой волны российской государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в России были достигнуты значительные результаты в области охвата с учетом потребляемых энергоресурсов всех субъектов обращения ТЭР, а прежде всего — населения и организаций ЖКХ. Также была проведена модернизация значительной части промышленного и бытового освещения с заменой менее энергетически эффективных ламп накаливания, ламп ДРЛ на современные светодиодные с системами датчиков контроля и управления работой таких систем.

Первая волна мер характеризовалась реализацией сравнительно простых мероприятий, которые при привлечении небольшого количества инвестиций могли дать положительный результат с короткими сроками окупаемости инвестиций.

Современные условия развития электроэнергетики России позволяют открыть новые направления для реализации мер в области повышения эффективности потребления электроэнергии экономическими субъектами, в том числе в части снижения цен на закупку электроэнергии без изменения удельных показателей энергопотребления. Прежде всего достижение результатов снижения цен (стоимости) закупок электроэнергии достигается за счет механизмов оптового и розничного

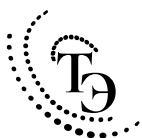
рынков электроэнергии (мощности), а также производных механизмов, смежных с энергорынками.

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ

На рисунке 1 представлены направления повышения эффективности потребления электроэнергии для предприятий России. Направления делятся по отношению к субъекту управления энергетической эффективностью (предприятию) на *внешние* и *внутренние*, а также по способу повышения энергетической эффективности — на *объемные* и *ценовые* (за счет управления объемами энергопотребления и управления с учетом ценовых факторов соответственно). Так, предложенные направления делятся на 4 ключевых категории.

1. Внешние объемные направления: повышение энергетической эффективности происходит на основе управления внешними (по отношению к субъекту энергопотребления) возможностями повышения энергетической эффективности за счет управления объемными потоками энергопотребления.
2. Внутренние объемные направления: повышение энергетической эффективности производится на основе управления внутренними (по отношению к субъекту энергопотребления) возможностями повышения энергетической эффективности за счет управления объемными потоками энергопотребления.
3. Внешние ценовые направления: повышение энергетической эффективности достигается на основе управления внешними (по отношению к субъекту энергопотребления) возможностями повышения энергетической эффективности за счет управления на основе ценовых (тарифных) факторов [10].
4. Внутренние ценовые направления: повышение энергетической эффективности производится на основе управления внутренними (по отношению к субъекту энергопотребления) возможностями повышения энергетической эффективности за счет управления на основе ценовых (тарифных) факторов.

Среди направлений «внешние объемные» можно привести пример замещения одного вида потребляемого энергетического ресурса другим. В качестве примера можно привести замещение потребления котельной, использующей в качестве основного топлива уголь, на более энергетически эффективный и экологичный природный газ.



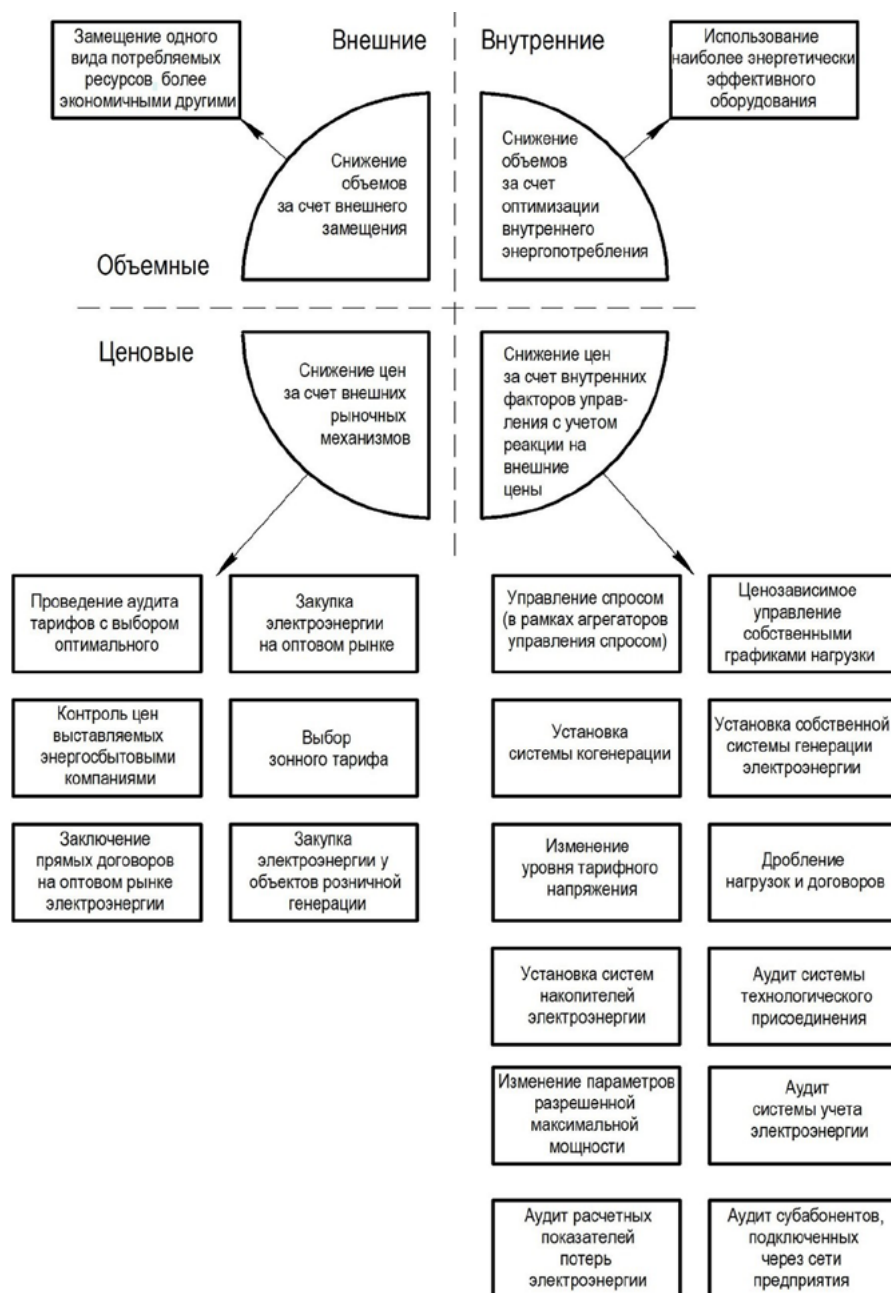


Рисунок 1. Направления повышения эффективности потребления электроэнергии для предприятий России

Figure 1. Ways to Improve the Efficiency of Electricity Consumption for Russian Industrial Enterprises

В качестве примера «внутреннего объемного направления» можно привести использование энергосберегающего оборудования, позволяющего снижать объемы потребления энергоресурсов за счет оптимизации работы внутренних объектов энергопотребления предприятия. В это направление входят классические методы повышения энергетической эффективности, реализуемые за счет внедрения более энергоэффективного оборудования, снижающего объемы внутреннего потребления предприятия.

На остальных направлениях повышения энергетической эффективности следует остановиться подробнее.

В таблице 1 представлено описание инструментов повышения энергетической эффективности потребления электроэнергии, принадлежащих к «внешним ценовым направлениям». Описание инструментов показывает, что на основе анализа внешних ценовых возможностей потребитель электроэнергии может получать достаточный экономический эффект. В примечании к таблице

Таблица 1. Описание инструментов повышения энергетической эффективности потребления электроэнергии, принадлежащих к направлению «внешние ценовые»**Table 1.** Description of electricity efficiency improvement instruments in the 'external price-based' category

№ пп	Наименование	Описание	Примечание
1	Проведение аудита тарифов с выбором оптимального	Проведение сравнительной оценки различных вариантов тарифов, предлагаемых к оплате поставщиком электроэнергии. Выбор наиболее оптимального тарифа	В некоторых случаях экономия при выборе более оптимального тарифа может достигать 15% от конечной стоимости электроэнергии
2	Закупка электроэнергии на оптовом рынке	Закупка электроэнергии на оптовом рынке напрямую, минуя услуги регионального гарантирующего поставщика электроэнергии	Сбытовая надбавка региональных гарантирующих поставщиков может достигать 5% от конечной стоимости электроэнергии
3	Контроль цен, выставляемых энергосбытовыми компаниями	Выполнение контроля ценовых параметров отпускаемой электроэнергии действующими поставщиками, на предмет избежания ошибок в расчетах и неучета отдельных факторов	В некоторых случаях ошибки в расчетах цен могут составлять 10% от конечной стоимости электроэнергии
4	Выбор зонного тарифа	Закупка электроэнергии по тарифам на электроэнергию, предусматривающих «зонную» дифференциацию	В некоторых случаях эффект от работы по «зонным» вариантам тарифов может достигать 10% от конечной стоимости электроэнергии
5	Заключение прямых договоров на оптовом рынке электроэнергии	Закупка электроэнергии у производителей электроэнергии на оптовом рынке по «прямым» договорам	Позволит гибко управлять графиком платежей за потребленную электроэнергию в адрес поставщиков
6	Закупка электроэнергии у объектов розничной генерации	Прямая закупка электроэнергии у производителей электроэнергии на розничном рынке	В некоторых случаях эффект от закупок электроэнергии у объектов розничной генерации может достигать 10% от конечной стоимости электроэнергии

Таблица 2. Описание инструментов повышения энергетической эффективности потребления электроэнергии, принадлежащих к направлению «внутренние ценовые»**Table 2.** Description of electricity efficiency improvement instruments in the 'internal price-based' category

№ пп	Наименование	Описание	Примечание
1	Управление спросом (в рамках агрегаторов управления спросом)	Участие в проекте по управлению режимами потребления электроэнергии в энергосистеме за получение соответствующей оплаты	В некоторых случаях эффект от участия в управлении спросом (в рамках агрегаторов спроса) может достигать 7% от конечной стоимости электроэнергии
2	Ценозависимое управление собственными графиками нагрузки	Управление собственными режимами потребления электроэнергии в зависимости от гибких механизмов ценовых параметров стоимости закупок электроэнергии	В некоторых случаях эффект от ценозависимого управления графиками может достигать 40% от конечной стоимости электроэнергии
3	Установка системы когенерации	Использование внутренних источников комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, замещающих закупку электрической и тепловой энергии от внешних поставщиков	В некоторых случаях эффект от использования систем когенерации может достигать 25% от конечной стоимости электроэнергии
4	Установка собственной системы генерации электроэнергии	Использование внутренних источников выработки электрической энергии, замещающих закупку электрической энергии от внешних поставщиков	В некоторых случаях эффект от использования систем собственной электрогенерации может достигать 15% от конечной стоимости электроэнергии
5	Изменение уровня тарифного напряжения	Корректировка параметров технологического присоединения потребителя с целью изменения точки технологического присоединения, определяющей уровень тарифного напряжения учитываемого при оплате услуг по передаче электроэнергии	В некоторых случаях эффект от изменения уровня тарифного напряжения может достигать 30% от конечной стоимости электроэнергии
6	Дробление нагрузок и договоров	Изменение параметров присоединенной мощности, договорных параметров потребления электроэнергии с целью получения права расчетов по более экономичным тарифам	В некоторых случаях эффект от дробления нагрузок и договоров может достигать 15% от конечной стоимости электроэнергии
7	Установка систем накопителей электроэнергии	Применение внутренних накопителей электроэнергии, способных ее накапливать в период низкой стоимости и последующей выдачи в сеть предприятия в периоды максимальной стоимости электроэнергии с целью замещения более дорогих цен	В некоторых случаях эффект от установки систем накопителей электроэнергии может достигать 5% от конечной стоимости электроэнергии



Таблица 2 (окончание). Описание инструментов повышения энергетической эффективности потребления электроэнергии, принадлежащих к направлению «внутренние ценовые»**Table 2 (ending).** Description of electricity efficiency improvement instruments in the 'internal price-based' category

№ пп	Наименование	Описание	Примечание
8	Аудит системы технологического присоединения	Учитывая то, что стоимость услуг по передаче электроэнергии рассчитывается на основе параметров технологического присоединения к электросетям потребителя, проведение аудита параметров технологического присоединения может привести к возможности снижения тарифа на передачу	В некоторых случаях эффект от аудита системы технологического присоединения может достигать 25% от конечной стоимости электроэнергии
9	Изменение параметров разрешенной максимальной мощности	Параметры разрешенной максимальной мощности оказывают влияние на величину сбытовой надбавки, оплачиваемой в адрес гарантирующих поставщиков. Изменение параметров разрешенной максимальной мощности может снизить величину оплачиваемой сбытовой надбавки	В некоторых случаях эффект от изменения параметров разрешенной максимальной мощности может достигать 3% от конечной стоимости электроэнергии
10	Аудит системы учета электроэнергии	Нарушение работы системы учета электроэнергии может привести к значительной переплате за потребление электроэнергии	В некоторых случаях эффект от аудита системы учета электроэнергии может достигать 50% от конечной стоимости электроэнергии
11	Аудит расчетных показателей потерь электроэнергии	При расчетах объемов потребления электроэнергии учитываются потери, возникающие в результате несовпадения точек поставки и расположения приборов учета электроэнергии, которые определяются расчетным способом	В некоторых случаях эффект от аудита расчетных показателей потерь электроэнергии может достигать 5% от конечной стоимости электроэнергии
12	Аудит субабонентов, подключенных через сети предприятия	Субабоненты, подключенные к электрическим сетям через электрические сети отдельного предприятия, в результате неверного учета потребления электроэнергии либо перевыставления неверных тарифов могут наносить ущерб предприятиям, через сети которых они присоединены	В некоторых случаях эффект от аудита субабонентов, подключенных через сети предприятия, может достигать 20% от конечной стоимости электроэнергии

указаны приблизительные масштабы достижения возможной экономии. При этом уровень экономического эффекта достигается не для всех без исключения потребителей электроэнергии, а лишь для тех, у кого могут быть резервы снижения затрат в этой области.

В таблице 2 представлено описание инструментов повышения энергетической эффективности потребления электроэнергии, принадлежащих к направлению «внутренние ценовые». Описание каждого инструмента свидетельствует о резервах снижения затрат на энергопотребление за счет управления внутренними процессами энергопотребления предприятий на основе реакции на внешние ценовые факторы. В примечании к таблице представлены возможные эффекты, получаемые от применения инструментов. При этом достижение эффектов допускается в случае достаточного применения предлагаемых механизмов. Указанные эффекты являются реальными и проверенными автором в рамках его практической деятельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях устойчивого роста цен на электроэнергию и сохранения внешних санкционных рисков для российской промышленности простые организационные меры

энергосбережения, характерные для периода 2009–2016 годов, уже недостаточны. Современное повышение эффективности требует перехода от сугубо объемного сокращения потребления к комплексному ценовому управлению затратами. Как показано в работе, наибольший потенциал экономии (до 30–50% в отдельных случаях) лежит не столько в замене ламп, сколько в оптимизации тарифного напряжения, аудите системы учета и технологического присоединения, участии в управлении спросом (агрегаторы), а также в развитии собственной генерации и когенерации. Внешние ценовые инструменты (выбор поставщика, работа на оптовом рынке) позволяют снизить сбытовую надбавку и избежать ошибок в расчетах. Внутренние ценовые механизмы (изменение договорных мощностей, дробление нагрузок, накопители) обеспечивают предприятиям гибкость в реагировании на колебания рыночных цен. Таким образом, стратегия энергоэффективности на 2027–2030 годы должна сместиться с чисто технических решений в сторону энергоменеджмента, тарифного инжиниринга и активного использования конкурентных механизмов электроэнергетических рынков.

Список литературы

1. Дзюба А. П., Конопелько Д. В. Повышение энергетической эффективности регионального энергоснабжения



- промышленных территорий на основе систем комбинированного теплоснабжения: монография / А. П. Дзюба, Д. В. Конопелько. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2024. 169 с.
2. Шведов Г. В., Васильева Е. Н. Ценозависимое управление нагрузкой и накопители энергии на промышленных предприятиях // «Энергоэксперт» № 1 (87), 2025. С. 34–41.
 3. Литвак В. В., Сидоренко Г. И. Энергосбережение и энергоаудит: практическое руководство для промышленных предприятий. Томск: Изд-во ТПУ, 2022. 340 с.
 4. Дзюба А. П. Управление спросом на энергоресурсы в глобальном экономическом пространстве: монография / А. П. Дзюба, И. А. Соловьева. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. 260 с.
 5. Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» (ред. от 23.11.2009, с изм. от 2024 г.) / URL: <https://www.consultant.ru>.
 6. Башмаков И. А., Мышак А. Д. Российская политика повышения энергоэффективности: результаты и новые вызовы // Энергосбережение. 2021. № 6. С. 12–19.
 7. Воропай Н. И., Стенников В. А., Стенников А. В. Управление спросом на электроэнергию в России: агрегаторы и ценозависимое потребление // Электрические станции. 2024. № 3. С. 2–9.
 8. Окорочков В. Р., Окорочков Р. В. Развитие распределенной генерации и когенерации в России: экономика и регулирование. М.: Издательский дом МЭИ, 2023. 280 с.
 9. Грибков А. М., Кириллова Н. А. Потери электроэнергии и оптимизация системы учета на промышленном предприятии // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 24–30.
 10. Постановление Правительства РФ N 1178 «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике» (ред. от 29.12.2011, с изм. от 2026 г.). URL: <https://www.consultant.ru>.

References

1. Parker J. R. and Epton J. B. A. (2018) 'The analysis of disturbances affecting paper machines', in The role of fundamental research in paper-making: Transactions of the VIIth

Fundamental Research Symposium, Cambridge, 1981. Cambridge: FRC, pp. 785–807. DOI: 10.15376/frc.1981.2.785.

2. Revunov M. S., Revunov D. S. and Semenov A. D. (2023) 'Improving the efficiency of the automated process control system for regulating paper web mass', Measurement. Monitoring. Control, 1 (43), pp. 17–23. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-1-2.
3. Revunov M. S. (2018) 'Improving the stabilisation systems of paper stock flow parameters using a cross-correlation algorithm', Measurement. Monitoring. Control, 4 (26), pp. 24–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-4-4.
4. Lysova N. V., Nikulin S. V. and Semenov A. D. (2017) 'Modeling an extreme control system for paper web weight dispersion', in Promising information technologies (PIT 2017): International Scientific and Technical Conference, March 14–16, 2017: collection of scientific papers. Samara, pp. 932–935.
5. Lysova N. V. and Myasnikova N. V. (2019) 'Paper web weight control based on the extreme filtering method for real-time systems using frame signal processing', Engineering Journal of Don, 5, pp. 31–39.
6. Lysova N. V. (2022) Improving the performance of information processing and control algorithms for an automated paper web forming system. PhD thesis. Penza State University.
7. Nikulin S. V. (2016) Improving the functional subsystems of the automatic process control system for paper production based on extreme, neural network and predictive control. PhD thesis. Penza State University.
8. Baykin N. V., Salmov E. N. and Baykin S. N. (2020) 'Method for controlling the weight per 1 m² of a paper web', Russian Patent 2735402. Filed 4 February 2020, issued 30 October 2020.
9. Kurov V. S. and Tikhonov Yu. A. (2010) Hydrodynamics of mass supply processes to a paper machine. Saint Petersburg: Polytechnic University Publishing House.
10. Anisimova M. D. and Surikov V. N. (2024) 'On improving the accuracy of paper web weight control under disturbance conditions', in Innovative solutions in the development of the pulp and paper industry and timber industry complex: Proceedings of the All-Russian industry scientific and practical conference. Saint Petersburg: VShTE SPbGUPTD, pp. 135–143.
11. O'Dwyer A. (2009) Handbook of PI and PID controller tuning rules. London: Imperial College Press.

Информация об авторе

Дзюба Анатолий Петрович, доктор экономических наук, профессор кафедры систем управления энергетикой и промышленными предприятиями ФГБОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б. Н. Ельцина», 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; SPIN-код: 1528–8220; AuthorID: 631417; e-mail: dzyuba-a@yandex.ru.

Information about the author

Dzyuba Anatoly Petrovich, Dr. Sci in Economics, Professor at the Department of Control Systems for Power Engineering and Industrial Enterprises at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin", 19 Mira Street, Ekaterinburg, 620002, Russia; SPIN-code: 1528–8220; AuthorID: 631417; e-mail: dzyuba-a@yandex.ru.



Оригинальное теоретическое исследование
УДК 620.9; 005.1
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_49-58

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГРЕССИОННОГО И ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Александр Дмитриевич Ширяев, Владимир Германович Злобин

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

© Ширяев А. Д., Злобин В. Г., 2026

Автор-корреспондент: А. Д. Ширяев, e-mail: a. d. shiryayev@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Развитие систем теплоснабжения и электроснабжения промышленных предприятий и потребителей коммунально-бытовой сферы осуществляется путем максимального использования возможностей ТЭС, а также совершенствования тепловых схем паротурбинных установок (ПТУ) и внедрения современных конструкций паровых и газовых турбин различной мощности. В последние годы разработан и освоен целый ряд высокоэкономичных паровых и газовых турбин. Технически грамотная эксплуатация таких тепловых электростанций возможна при постоянном поиске способов повышения эффективности управляемого процесса при использовании их оборудования. Поэтому актуальными становятся вопросы получения математических моделей зависимостей показателей эффективности тепловых электростанций от различных факторов, влияющих на их эксплуатацию [1]. Целью данного исследования является разработка рекомендаций по применению регрессионного и факторного анализа в системе эксплуатации тепловых электростанций на базе паровых и газовых турбин. Предметом исследования были выбраны зависимости показателей эффективности ТЭС и надежности основного оборудования от различных факторов, а также возможности применения методов регрессионного и корреляционного анализа для анализа показателей эффективности эксплуатации ТЭС. Научная новизна работы заключается в обосновании возможности применения корреляционно-регрессионного анализа для получения эмпирических зависимостей и использования полученных зависимостей в цифровых моделях энергетического оборудования. Исследуются вопросы оценки достоверности моделей при влиянии на них различных (в том числе случайных) факторов, и варианты проверки на адекватность по различным критериям. Практическая значимость заключается в предоставлении персоналу ТЭС математического аппарата, позволяющего получать цифровые модели процесса эксплуатации и правильно управлять этим процессом. Полученные выводы: управление такой сложной системой, как ТЭС, будет эффективным только при переходе на цифровое управление при построении цифрового прообраза энергетического оборудования с учетом влияния всех факторов на показатели работы.

Ключевые слова: системный анализ, случайная величина, эффективность управляемого процесса, регрессионный анализ, адекватность уравнений регрессии, коэффициент детерминации, математическая модель, цифровизация управления

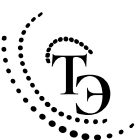
Для цитирования: Ширяев А. Д., Злобин В. Г. Методология применения регрессионного и факторного анализа при эксплуатации тепловых электростанций // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 49–58. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_49-58

METHODOLOGY OF REGRESSION AND FACTOR ANALYSIS APPLICATION FOR THERMAL POWER PLANT OPERATION

Alexander Dmitrievich Shiryayev, Vladimir Germanovich Zlobin

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

Corresponding author: A. D. Shiryayev, e-mail: a. d. shiryayev@rambler.ru



ABSTRACT

The advancement of heating and power supply systems for industrial facilities and residential utilities is achieved through the maximum utilization of thermal power plant (TPP) potential, along with the optimization of thermal cycle configurations for steam turbine units (STU) and the implementation of state-of-the-art steam and gas turbines across various power ratings. In recent years, a number of highly efficient steam and gas turbines have been developed and introduced into service. Technically competent operation of such thermal power plants requires a continuous search for methods to enhance the efficiency of the controlled process in the course of equipment utilization. Therefore, the development of mathematical models describing the dependence of thermal power plant performance indicators on various factors influencing their operation becomes a relevant task [1]. This study aims to develop recommendations for applying regression and factor analysis to the operation system of steam and gas turbine-based thermal power plants. This study focused on the relationships between TPP performance indicators, main equipment reliability, and various influencing factors, as well as the applicability of regression and correlation analysis methods for evaluating TPP operational efficiency. The scientific novelty of this research consists of validating the applicability of correlation-regression analysis for deriving empirical relationships, as well as the utilization of these relationships in digital models of power generation equipment. This paper addresses the challenges of assessing model reliability when exposed to various influencing factors (including random ones), as well as the options for adequacy checking employing diverse statistical criteria. The practical significance of this work consists of equipping thermal power plant staff with a mathematical framework that allows for obtaining digital models of the operational process and effectively controlling this process. Conclusions: effective management of a complex system like a TPP requires a transition to digital control through the development of a digital twin of the power equipment, accounting for all factors affecting performance.

Keywords: system analysis, random variable, efficiency of the controlled process, regression analysis, adequacy of regression equations, coefficient of determination, mathematical model, digitalization of management

For citation: Shiryayev A. D., Zlobin V. G. (2026) 'Methodology of regression and factor analysis application for thermal power plant operation', Technology and Energy, no. 2 (2), pp. 49–58. DOI: 10.46418/3033-7854_2026_2_2_49–58

ВВЕДЕНИЕ

Большинство задач по эксплуатации тепловых электростанций (ТЭС) требуют получения математических моделей, представляющих собой зависимость показателя, который выбран для оценки качества процесса эксплуатации, от других показателей, влияющих на него по физической сущности процесса или по предположению. Особенно это стало важно и актуально, когда в теплоэнергетике начался процесс создания цифровых двойников энергетического оборудования. Например, существует очевидная зависимость показателей безотказности от срока службы, количества пусков, режимов использования, качества технического обслуживания и ремонта и т. п. Но для того чтобы получить количественные оценки, необходимо описать эту связь математически, создать математическую модель [2].

Целью данного исследования является разработка рекомендаций по применению регрессионного и факторного анализа в системе эксплуатации тепловых электростанций на базе паровых турбин для построения математической модели, позволяющей определить влияние различных, в том числе случайных, факторов для достижения заданного уровня эффективной эксплуатации ТЭС.

Связь между различными показателями, характеризующими процесс эксплуатации ТЭС, и возможные

изменения самих показателей зависят от влияния многочисленных общих для них случайных факторов. Поэтому исследовать приходится систему случайных величин, каждая из которых представлена своей статистической выборкой и характеризуется полученными на их основе точечными оценками и законами распределения. При этом строгая функциональная зависимость между отдельными показателями нарушается, а её характеристика по данным отдельных наблюдений носит случайный (стохастический) характер. При стохастической связи одна случайная величина реагирует на изменение другой изменением своего закона распределения [3]. Поэтому предметом исследования стала стохастическая зависимость показателей эффективности ТЭС и основного оборудования от различных, в том числе случайных, факторов, а также возможность применения методов регрессионного и корреляционного анализов для оценки показателей эффективности эксплуатации ТЭС.

В статье последовательно решаются следующие задачи:

- выявляется связь между случайными величинами; исследуются их характеристики и форма связи, которая определяется функцией регрессии;
- определяется теоретическая линия регрессии, которая заключается в подборе и обосновании типа кривой и расчете коэффициентов её уравнения так,



чтобы она наилучшим образом отражала статистические данные;

- определяется вид уравнения регрессии, который заключается, как правило, в подборе известных моделей однофакторной или множественной корреляции;
- определяются коэффициенты уравнения регрессии методом максимального правдоподобия или методом наименьших квадратов;
- после построения регрессионной модели производится проверка её адекватности и значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию *Стьюдента*;

– рассматривается вопрос построения уравнений регрессии при наличии многих факторов в матричном виде.

Научная новизна данной работы заключается в обосновании возможности применения корреляционно-регрессионного анализа для получения эмпирических зависимостей от одного или множества факторов, в том числе случайных, и использовании полученных зависимостей в цифровых моделях энергетического оборудования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются массивы данных, полученных в результате эксплуатации энергетического оборудования тепловых электростанций, и факторы, оказывающие непосредственное влияние на параметры данного массива. К параметрам массива относятся, например, мощностные и экономические показатели, показатели безотказности и срока службы, количества пусков и режимов использования, качества технического обслуживания и ремонта и т. п. К факторам, оказывающим влияние на массив данных, можно отнести следующие: температуру, давление и влажность наружного воздуха, качество топлива (основного — природного газа и резервного — мазута), изменение нагрузки потребителей и т. п.

Для оценки влияния факторов на параметры эксплуатации энергетического оборудования ТЭС предлагается применить методы обработки математической статистики, в том числе регрессионный и факторный анализ.

1. СВЯЗЬ МЕЖДУ СЛУЧАЙНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ И ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИКА

Для характеристики связи между случайными величинами, к которым в теплоэнергетике можно отнести внешние условия, качество топлива, тепловую и электрическую нагрузку потребителей, скачки нагрузки, суточную и сезонную неравномерность и т. д., используют условное математическое ожидание. Для дискретной случайной величины Y условное математическое ожидание равно сумме произведений возможных её значений на их условные вероятности:

$$M(Y / X = x) = \sum_{i=1}^m y_i P(y_i / x). \quad (1)$$

Для непрерывной случайной величины:

$$M(Y / X = x) = \int_{-\infty}^{\infty} y \varphi(y / x) dy, \quad (2)$$

где $\varphi(y/x)$ — условная плотность случайной величины Y при условии, что независимая случайная величина приняла значение $X=x$.

Условное математическое ожидание одной случайной величины является функцией другой случайной величины [4]:

$$M(Y/x) = f(x); M(X/y) = f(y). \quad (3)$$

Зависимость между одной случайной переменной и условным средним значением другой случайной переменной называется корреляционной зависимостью. А условное математическое ожидание случайной величины Y , рассмотренное как функция другой случайной величины X , дает кривую, которая называется линией регрессии.

Считают, что показатель Y находится в корреляционной зависимости от показателя X , если:

- каждому значению аргумента x соответствует ряд распределения функции y , например, каждому значению температуры внешней среды соответствует мощность энергоблока при сохранении постоянными других факторов;
- теоретическая линия регрессии y по x не параллельна оси абсцисс.

Любая корреляционная зависимость характеризуется формой и теснотой связи. Первой задачей при исследовании корреляционной зависимости, в том числе и в теплоэнергетике, является установление формы связи, которая определяется функцией регрессии. Этот этап и называется собственно регрессионным анализом. Он заключается в аналитическом описании функции регрессии. Второй задачей исследования корреляционной зависимости является измерение тесноты связи между коррелированными случайными величинами. Этот этап называется корреляционным анализом. Иногда в литературе по статистическому анализу оба этапа объединяют и называют либо корреляционным анализом, либо регрессионным анализом, либо корреляционно-регрессионным анализом [5].



2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ СВЯЗИ МЕЖДУ СЛУЧАЙНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Предположение о виде функции регрессии делается на основе расположения точек на поле корреляции, которое показано на рисунке 1. Границы поля корреляции определяются размахом варьирования случайных величин. На оси координат наносят границы разрядов случайных величин. На поле указывают все значения случайной величины Y , полученные при определенных значениях, которые принимает независимая случайная величина X в процессе испытаний.

По полю корреляции строится корреляционная таблица, которой удобно пользоваться при расчетах, необходимых при регрессионном анализе. Корреляционная таблица, соответствующая корреляционному полю рисунка, приведена в таблице 1.

Если вычислить среднее значение случайной величины Y в каждом интервале случайной величины X , нанести эти точки на поле корреляции и соединить их между собой, то вид полученной ломаной линии показывает, как в среднем изменяется Y (например, давление в конденсаторе) в зависимости от изменения X (теплоты отведенной потребителю). Эта ломаная линия называется эмпирической линией регрессии.

Эмпирическую линию регрессии можно аппроксимировать (сгладить) функцией регрессии. В качестве функции регрессии выбирают:

- линейную модель;
- квадратичный полином;
- показательную функцию и т. п.

Таблица 1. Корреляционная таблица

Table 1. Correlation table

Границы и середина разрядов Y	Границы и середина разрядов X								Частота разряд., m_Y
	1–2 1,5	2–3 2,5	3–4 3,5	4–5 4,5	5–6 5,5	6–7 6,5	7–8 7,5	8–9 8,5	
10–20 15	4	5							9
20–30 25	1	3	1						5
30–40 35	2	3	6	5	3	1			20
40–50 45		5	9	19	8	7	2	1	51
50–60 55		1	2	7	16	9	4	2	41
60–70 65			1	5	6	4	2	2	20
70–80 75							1	3	4
Число значений Y в инт. X , m_X	7	17	19	36	33	21	9	8	150

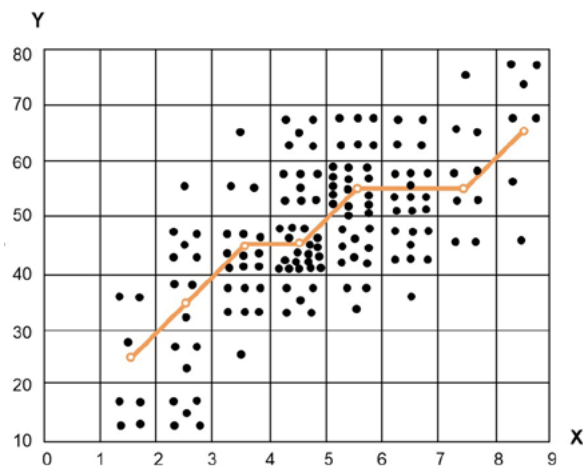


Рисунок 1. Поле корреляции

Figure 1. Correlation field

Функция регрессии представляет собой геометрическое место условных математических ожиданий одной из случайных величин, соответствующих заданным значениям другой случайной величины:

$$M(Y/X=x)=y(x) \vee M(X/r=y)=x(y). \quad (4)$$

Процесс определения теоретической линии регрессии заключается в подборе и обосновании типа кривой и в расчете коэффициентов её уравнения так, чтобы она наилучшим образом отражала статистические данные.

Для определения функции регрессии используют уравнение $y(x)=f(x)$, которое называется уравнением регрессии.

Определение вида уравнения регрессии заключается, как правило, в подборе известных моделей:

$$\hat{y}(x) = f(x) = b_0 + b_1 x \text{ — линейной,} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}(x) &= f(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 \\ \hat{y}(x) &= f(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_k x^k \end{aligned} \right\} \text{ — нелинейной.} \quad (6)$$

Если исследуется связь между несколькими показателями (например, изменение тепловой и электрической нагрузки потребителей), то корреляцию называют множественной $y(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Аппроксимация эмпирической линии регрессии при множественной корреляции наиболее часто осуществляется с помощью следующих моделей:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i; \quad (7)$$

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2; \quad (8)$$

$$\hat{y} = b_0 \prod_{i=1}^k b_i^{x_i}; \quad (9)$$

$$\hat{y} = b_0 \prod_{i=1}^k x_i^{b_i}. \quad (10)$$

Для определения коэффициентов уравнения регрессии используется несколько методов. Наиболее распространены метод максимального правдоподобия и метод наименьших квадратов.

Метод максимального правдоподобия заключается в максимизации общей вероятности попадания экспериментальных точек на сглаживающую кривую. Для этого вводят функцию правдоподобия:

$$L = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i). \quad (11)$$

Эта функция имеет максимальное значение (экстремум) при тех же параметрах, что и общая вероятность попадания экспериментальных точек на сглаживающую кривую. Параметры сглаживающей кривой определяются из условия максимизации функции правдоподобия:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial b_0} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial b_i} &= 0, \quad i \in \overline{1, k} \end{aligned} \right.,$$

где b_0, b_i — параметры сглаживающей кривой.

Метод наименьших квадратов (МНК) сводится к обеспечению выполнения требования: сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от сглаживающей кривой должна быть минимальной:

$$U = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \min. \quad (12)$$

Определим коэффициенты уравнения регрессии по методу наименьших квадратов:

$$\hat{y} = f(x, b_0, b_1, \dots, b_n).$$

Параметры $b_0, b_1, \dots, b_n$ должны быть вычислены таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$U = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, b_0, b_1, \dots, b_n)]^2 = \min.$$

Для отыскания экстремума этого функционала продифференцируем U по параметрам и приравняем производные к нулю:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial b_0} &= 0 \left[\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, b_0, b_1, \dots, b_n)] \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} \right)_i = 0 \right. \\ \frac{\partial U}{\partial b_1} &= 0 \left[\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, b_0, b_1, \dots, b_n)] \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} \right)_i = 0 \right. \\ &\dots \dots \dots \\ \frac{\partial U}{\partial b_n} &= 0 \left[\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, b_0, b_1, \dots, b_n)] \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial b_n} \right)_i = 0 \right] \end{aligned} \right. \quad (13)$$

где $\left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} \right)_i, \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} \right)_i, \dots, \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial b_n} \right)_i$ — значения частной производной функции $f(x, b_0, b_1, \dots, b_n)$ по соответствующему параметру в точке x_i .

Число уравнений системы (13) равно количеству неизвестных параметров, поэтому она решается известными методами. Рассмотрим для примера её решение, когда уравнение регрессии является линейной функцией $f(x) = b_0 + b_1 x$. В этом случае:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial b_0} \right)_i = 1; \quad \left(\frac{\partial f}{\partial b_1} \right)_i = x_i.$$

Подставляя уравнение функции $f(x)$ и значения частных производных в систему (13), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_i)] \cdot 1 &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [y_i - (b_0 + b_1 x_i)] \cdot x_i &= 0 \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Решение системы уравнений (14) дает статистические оценки коэффициентов b_0 и b_1 по известным выборкам X и Y :

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i) &= 0 \\ \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) x_i - \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i) \cdot x_i &= 0 \end{aligned} \right. \quad \left\{ \begin{aligned} nb_0 - b_1 \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \right.$$



$$\text{Из второго уравнения: } b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i}.$$

Подставив это выражение в первое уравнение, получим:

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (15)$$

Вычислив b_1 , легко найти b_0 из первого уравнения:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - b_1 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{y}^* - b_1 \bar{x}^*. \quad (16)$$

Характерная особенность МНК состоит в том, что для его использования необходим большой объем статистических данных на участке наблюдения в системе эксплуатации тепловой электростанции; без этого МНК дает существенные погрешности [6]. Объем выборки должен быть таким, чтобы на каждый входящий в модель аргумент приходилось несколько точек. В частности, для линейной модели $n_b \geq 3k + 1$.

Коэффициент уравнения регрессии b_i — это мера, которая в среднем показывает влияние изменения объясняющей переменной x_i на зависимую переменную y . Постоянная b_0 в уравнении регрессии является выравнивающей.

После построения регрессионной модели производят проверку её адекватности и значимости отдельных коэффициентов. Статистические выборки из одной и той же генеральной совокупности имеют разное рассеяние. Поэтому может случиться, что построение регрессионной модели одного и того же процесса по данным разных выборок дает разную степень соответствия модели опытным данным, несмотря на то, что тип модели выбирается один и тот же.

Для проверки адекватности регрессионной модели используется несколько статистических критериев, основанных на дисперсионном анализе статистических данных и широко применяемых в оценке реальных показателей работы энергообъектов [8, 9].

Общая дисперсия случайной переменной y , которая характеризует разброс её отдельных наблюдаемых значений около её среднего значения:

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}^*)^2, \quad (17)$$

раскладывается на две её составляющие:

$$S_y^2 = S_y^2 + S_{ост}^2, \quad (18)$$

где S_y^2 — дисперсия, обусловленная регрессией; она представляет ту часть рассеяния переменной y , которая обусловлена влиянием переменных $x_k, k \in \overline{1, m}$:

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}^*)^2, \quad (19)$$

где $S_{ост}^2$ — остаточная дисперсия; она измеряет ту часть рассеяния y , которая возникает из-за влияния прочих неучтенных факторов (l — число коэффициентов уравнения регрессии).

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{n-l} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (20)$$

Чем больше $S_{ост}^2$ приближается к нулю, тем меньше эмпирические значения y_i отклоняются от значений регрессии $\hat{y}_i$.

Проверка адекватности регрессионной модели по коэффициенту детерминации

$$B_{yx} = \frac{S_y^2}{S_y^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}^*)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}^*)^2}. \quad (21)$$

Чем больше S_y^2 , тем больше S_y^2 формируется за счет влияния объясняющей переменной x , и, следовательно, связь между переменными y и x более интенсивная.

$$0 \leq B_{yx} \leq 1.$$

Чем большую долю в общей дисперсии составляет S_y^2 , тем лучше регрессионная модель соответствует эмпирическим данным.

$B_{yx} = 1$, если $\hat{y}_i = y_i$; $B_{yx} = 0$, если $\hat{y}_i = \bar{y}^*$, т. е. величина y — детерминированная.

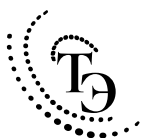
Проверка адекватности регрессионной модели по критерию Фишера

$$F_H = \frac{S_y^2}{S_{ост}^2} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}^*)^2}{\frac{1}{n-l} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (22)$$

где F_H — наблюдаемое (рассчитанное) значение критерия Фишера.

Критерий Фишера показывает, во сколько раз рассеяние относительно уравнения регрессии меньше рассеяния относительно среднего значения.

F_H сравнивается с табличным значением F_{α, f_1, f_2} , выбранным по таблицам математической статистики



по уровню значимости $\alpha = 0,01 \div 0,05$ и числам степеней свободы $f_1 = n - 1; f_2 = n - l$. Чем больше F_H превышает F_{α, f_1, f_2} , тем эффективнее уравнение регрессии.

Проверка адекватности уравнения регрессии по критерию Фишера — Снедекора

$$F_H = \frac{\bar{y}^*}{S_{ост}^2} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}{\frac{1}{n-l} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (23)$$

F_H сравнивается с табличным значением F_{α, f_1, f_2} , выбранным по таблицам математической статистики по уровню значимости $\alpha = 0,01 \div 0,05$ и числам степеней свободы $f_1 = n; f_2 = n - l$. При $F_H > F_{\alpha, f_1, f_2}$ регрессионную модель считают адекватной.

Проверка значимости коэффициентов уравнения регрессии производится по критерию Стьюдента.

Наблюдаемое значение критерия Стьюдента для каждого коэффициента уравнения:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}, \quad (24)$$

где $S_{b_j}^2 = \frac{S_y^2}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}^*)^2$ — дисперсия коэффициента,

сравнивается с табличным $t_{\alpha, f}$, выбранным по таблицам математической статистики для уровня значимости $\alpha = 0,05 \div 0,1$ и числа степеней свободы $f = n - 1$.

Если $t_j < t_{\alpha, f}$, то коэффициент b_j незначим.

Иногда определяют величину доверительного интервала для коэффициентов уравнения регрессии:

$$\Delta b_j = \pm t_{\alpha, f} S_{b_j} = \pm t_{\alpha, f} \frac{S_y}{\sqrt{n}}. \quad (25)$$

Значимым считается коэффициент, для которого $|b_j| \geq \Delta b_j$.

При исследованиях множественной корреляции (при числе факторов более двух) регрессионный анализ выполняют в матричной форме.

3. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ В МАТРИЧНОЙ ФОРМЕ

Пусть уравнение регрессии:

$$\hat{y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k,$$

где x_0 — фиктивная независимая переменная, равная 1.

Исходные данные для получения коэффициентов уравнения регрессии можно представить матрицами:

$$X = \begin{vmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0n} & x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{vmatrix}; Y = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{vmatrix}.$$

Требуется определить матрицу:

$$B = \begin{vmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{vmatrix}.$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяют методом наименьших квадратов из условия:

$$U = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min.$$

Система уравнений для определения коэффициентов имеет вид:

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{0i}^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{0i} x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{0i} x_{ki} = \sum_{i=1}^n x_{0i} y_i$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{0i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} = \sum_{i=1}^n x_{1i} y_i$$

.....

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{0i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ki} y_i.$$

В матричной форме эта система запишется:

$$X^T X B = X^T Y,$$

$$\text{где } X^T = \begin{vmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0n} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{k1} & x_{k2} & \dots & x_{kn} \end{vmatrix},$$

Тогда

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot X^T Y. \quad (26)$$

Аналогично можно определять коэффициенты более сложных регрессионных моделей, учитывающих эффекты взаимодействия факторов и квадратичные эффекты. Для этого надо расширить матрицу X , включив в неё столбцы взаимодействия и квадратичные эффекты. Такое расширение матрицы X называется линеаризацией. Она возможна только тогда, когда все коэффициенты входят в уравнение линейно, т. е. уравнение является линейным по параметрам.

Соответственно, в векторе B при этом появятся элементы, соответствующие эффектам взаимодействия и квадратичным. Для реализации матричного регрессионного анализа необходимо, чтобы матрица $(X^T X)$ была невырожденной, т. е. её определитель не должен быть



равен нулю. В противном случае она не будет иметь обратной матрицы. Для этого необходимо, чтобы переменные $x_1, x_2, \dots, x_k$ были линейно независимы.

Матрица $(X^T X)^{-1}$ называется ковариационной матрицей. Она недиагональна, следовательно, все коэффициенты регрессии взаимосвязаны, и нельзя проверить значимость каждого из них в отдельности. Поэтому

отношение $t_j = \frac{|b_j|}{S_{b_j}}$ можно рассматривать только как

средство ранжировки факторов. Можно исключать наименее значимые факторы последовательно до тех пор, пока уменьшается остаточная дисперсия.

Таким образом, при решении задач исследования зависимости любой характеристики, по которой оценивается эффективность управляемого процесса, от воздействующих на неё факторов всегда возникает проблема отбора факторов. Основными требованиями к ним являются независимость и значимость. В рассмотрение должны приниматься только независимые и значимые факторы, влияющие на исследуемую характеристику.

Так, при исследовании экономичности ТЭС в процессе эксплуатации обычно учитывают влияние факторов внешней среды, режимов использования, техническое состояние. При оценках трудоемкости технического обслуживания и ремонта ТЭС учитывают наработку оборудования, его техническое состояние, поломки и аварии, продолжительность периода от момента последнего технического осмотра и планового ремонта, срок службы оборудования ТЭС. Решению таких задач всегда предшествует предварительный анализ, основным содержанием которого является выбор и обоснование факторов, влияющих на процесс. Очень часто здесь руководствуются соображениями здравого смысла, опыта, сложившихся подходов в прошлом. Однако при этом всегда есть опасность упустить значимые факторы, и тогда модель будет неадекватной процессу, или получить громоздкую, сложную для расчетов модель, в которой большинство факторов оказывают незначительное влияние на исследуемую характеристику.

Примерами применения регрессионного и корреляционного анализа при эксплуатации тепловых электростанций могут служить аналитические характеристики

Таблица 2. Энергетические характеристики современных теплофикационных паровых турбин

Table 2. Energy performance of modern heating steam turbines

Типы турбин	Энергетические характеристики
T-105/120-130	$Q_{т.г} = 122,11 \cdot p_t + 2,326 \cdot N_s - 1,314 \cdot N_t + Q_i; N_m = \frac{0,546 \cdot (Q_m - 15,12)}{10 \cdot p_m}.$ При работе со встроенным пучком $N_m = \frac{0,602 \cdot (Q'_m - 134,9)}{10 \cdot p_m^{0,14}}, \text{ где } Q'_m = Q_m + Q_{пуч}$
T-175/210-130*	$Q_{т.г} = 226,8 \cdot p_t + 2,326 \cdot N_s - 1,302 \cdot N_t + Q_i; N_m = \frac{0,602 \cdot (Q_m - 24,42)}{10 \cdot p_m^{0,14}}$
T-250/300-240	При работе по электрическому графику $Q_{м.г} = 290,75 \cdot p_m + 1,977 \cdot N_s + 1,05 \cdot Q_m - \frac{0,65(Q_m - 40,7)}{(10 \cdot p_m^{0,14})} - 9,304 + \left[\frac{0,65}{(10 \cdot p_m^{0,07})} + 0,48 \right] \cdot Q_{с.н}.$ При работе по тепловому графику $Q_{м.г} = 290,75 \cdot p_m + Q_m + \frac{0,72 \cdot (Q_m - 40,7)}{(10 \cdot p_m^{0,07})} + \left[1,63 - \frac{0,72}{(10 \cdot p_m^{0,07})} \right] \cdot Q_{с.н};$ $N_m = \frac{0,709(Q_m - 140,7)}{10 \cdot p_m^{0,07}} - N_{м.н} + \left(0,619 - \frac{0,709}{10 \cdot p_m^{0,07}} \right),$ где $N_{м.н} = 0,0232 \cdot Q_{м.г} - 4,7$
ПТ-60/75-130/13*	$Q_{м.г} = 16,3 + 2,33 \cdot N_s - 1,314 \cdot N_m + Q_m + Q_n;$ $N_m = 0,529 \cdot Q_m \cdot (0,12/p_m)^{0,14} + 0,305 \cdot (1,3/p_n)^{0,34} \cdot Q_n - (9,9 - 0,048 \cdot Q_m)$
ПТ-80/100-130/13*	$Q_{м.г} = 16,3 + 1,98 \cdot N_s - 0,965 \cdot N_m + Q_m + Q_n;$ $N_m = 0,542 \cdot Q_m \cdot (10/p_m)^{0,14} + 0,301 \cdot (1,3/p_n)^{0,34} \cdot Q_n - (11,6 - 0,217 \cdot Q_m)$
ПТ-135/165-130/15	$Q_{м.г} = 20,9 + 1,95 \cdot N_s - 0,942 \cdot N_m + Q_m + Q_n;$ $N_m = 0,542 \cdot Q_m \cdot (0,12/p_m)^{0,14} + 0,284 \cdot (1,5/p_n)^{0,34} \cdot Q_n - (21 - 0,0553 \cdot Q_m)$
P-50-130/13	$Q_{м.г} = 1,16 + 1,01 \cdot N_m + Q_n; N_m = 0,301 \cdot (Q_n - 48,3) \cdot (1,3/p_n)^{0,55}$
P-100-130/15	$Q_{м.г} = 6,4 + 1,01 \cdot N_m + Q_n; N_m = 0,301 \cdot (Q_n - 98,9) \cdot (1,5/p_n)^{0,55}$



теплофикационных паровых турбин, представленных в таблице 2 [12]. Что позволяет, наряду с термодинамическими параметрами, применять в теплоэнергетике математические модели тепловых схем ТЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

Во-первых, процесс эксплуатации ТЭС с позиций системного анализа включает в себя ряд составляющих его этапов: подготовка к использованию, использование по назначению, техническое обслуживание различных видов, плановые ремонты оборудования, консервация, утилизация.

Во-вторых, поскольку целью деятельности инженерной службы ТЭС является обеспечение их технической готовности, то необходимо управлять всеми этими этапами. Это непростая задача, так как различные стадии процесса эксплуатации могут иметь место одновременно на разных агрегатах станции.

В-третьих, понимая сложность процесса управления энергетическим оборудованием ТЭС, приходится отказываться от привычного понимания эксплуатации ТЭС в рамках единичного объекта и отыскивать закономерности и тенденции процесса эксплуатации в рамках большой организационно-технической системы, которая его реализует. При этом под системой эксплуатации ТЭС понимается как организационно-техническая структура, предназначенная для реализации процесса эксплуатации, так и сам процесс.

В-четвертых, управление такой системой будет эффективно только при переходе на цифровизацию управления, то есть при построении цифрового прообраза энергетического оборудования и учета влияния всех факторов на показатели работы ТЭС на всех стадиях эксплуатации.

Список литературы

- Абрамов С. Ю. Системный анализ, комплексное оценивание, совершенствование учета и управления в системах централизованного теплоснабжения: дисс....канд. техн. наук: 05.13.01 Самара, 2007. 168 с.
- Бахтадзе Н. Н. Интеллектуальные алгоритмы идентификации состояния энергообъектов / Н. Н. Бахтадзе, В. А. Лотоцкий, Е. М. Максимов, Н. Е. Максимова // Информационные технологии и вычислительные системы. 2011. № 3. С. 45–50.
- ГОСТ Р 50779.42–99. Статистические методы. Контрольные карты средних арифметических с предупреждающими границами.
- Кузнецов Р. С. Регрессионный анализ архивной информации тепловычислителей с использованием информационно-аналитической системы СОНА / Р. С. Кузнецов, В. П. Чипулис // Коммерческий учет энергоносителей: материалы 21-й международной научно-практической конференции. СПб.: Борей-Арт, 2005. С. 430–434.
- Максимюк Е. В. Математическое моделирование для поддержки принятия решений в области обеспечения энергетической эффективности / Е. В. Максимюк, В. С. Микшина. // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 8. С. 54–63.
- Ефремов И. А., Таран А. С., Филиппова Т. А. Принципы повышения эффективности управления режимами работы электроэнергетических систем // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 1. С. 199–203.
- Боруш О. В. Оценка реального расхода топлива энергоблоками ТЭЦ на основе оптимизационных расчетов их режимов работы / О. В. Боруш, С. В. Зыков и др. // Доклады Академии наук Высшей школы Российской Федерации. Новосибирск: НГТУ, 2013. № 2 (21). С. 26–33.
- Draper N., Smith G. Applied regression analysis. М.: Диалектика, 2007. 911 p. ISBN: 978-5-8459-0963-3.
- Mises, Richard Edler von. Wahrscheinlichkeit Statistik und Wahrheit. М.: URSS, 2009. 253 p. ISBN: 978-5-397-00518-0.
- Grace Joel. Data science from scratch. First principles with Python. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. 416 с. ISBN: 978-5-9775-6731-2.
- Чимэд О. Сравнительный анализ методов расчета экономичности ТЭЦ / О. Чимэд, О. В. Боруш // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 39–42.
- Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / Под ред. В. Я. Гирифельда. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 328 с.

References

- Abramov S. Y. System analysis, integrated assessment, improvement of accounting and management in district heating systems: diss. for the academic degree in technical sciences: 05.13.01 Samara, 2007. 168 p.
- Bakhtadze N. H., Lototsky V. A., Maksimov E. M., Maksimova N. E. Intelligent algorithms for identifying the state of energy facilities. Information Technologies and Computing Systems. 2011. No. 3. Pp. 45–50.
- GOST R 50779.42–99 Statistical methods. Arithmetic mean control cards with warning borders.
- Kuznetsov P. C., Chipulis V. P. Regression analysis of archival information of thermal calculators using the SONA information and analytical system. Commercial accounting of energy resources: proceedings of the 21st International scientific and practical conference. St. Petersburg: Borey-Art, 2005. Pp. 430–434.
- Maksimyuk E. V., Mikshina B. C. Mathematical modeling to support decision-making in the field of energy efficiency. Quality. Innovation. Education. 2014. No. 8. Pp. 54–63.



6. Efremov I. A., Taran A. S., Filippova T. A. Principles of increasing the efficiency of operating modes of electric power systems // Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. 2012. No. 1. Pp. 199–203.
7. Borush O. V., Zykov S. V. and others. Assessment of the real fuel consumption by CHP power units based on optimization calculations of their operating modes. Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation. Novosibirsk: NSTU, 2013. № 2 (21). Pp. 26–33.
8. Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Dialektika, 2007. 911 p. SBN: 978-5-8459-0963-3.
9. Mises, Richard Edler von. Wahrscheinlichkeit Statistik und Wahrheit. Moscow: URSS, 2009. 253 p. ISBN: 978-5-397-00518-0.
10. Grace Joel. Data science from scratch. First principles with Python. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2022. 416 p. ISBN: 978-5-9775-6731-2.
11. Chimed O. A., Borush O. V. Comparative analysis of methods for calculating the efficiency of TETs. Science. Technologies. Innovations: a collection of scientific papers. Novosibirsk, 2014. NSTU Publishing House, 2014. pp. 39–42.
12. Ryzhkin V. Ya. Thermal power plants: textbook for universities. Edited by V. Ya. Girshfeld. 3rd ed., revised and supplemented. M.: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

■ Информация об авторах

Ширяев Александр Дмитриевич, ассистент 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: 7117–1745, Author ID: 1172930, e-mail: a. d. shiryaev@rambler.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.

■ Information about the authors

Shiryaev Alexander Dmitrievich, Assistant at the Department of Thermal Power Plants and Thermal Engines, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 7117–1745, Author ID: 1172930, e-mail: a. d. shiryaev@rambler.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.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ЦИКЛЕ ВОДОПОДГОТОВКИ

Владимир Германович Злобин¹, Борух Авсеевич Вороненко²,
Валерий Викторович Пеленко¹, Алексей Михайлович Хлыновский¹

¹ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна

² Национальный исследовательский университет ИТМО

© Злобин В. Г., Вороненко Б. А., Пеленко В. В., Хлыновский А. М., 2026

Автор-корреспондент: В. Г. Злобин, e-mail: zlobin_v@list.ru

АННОТАЦИЯ

Разработка эффективной системы водоподготовки для водогрейных и паровых котлов на ТЭЦ базируется на реализации процесса обработки воды в несколько ступеней подготовки. Выбор конкретного метода предподготовки основывается на специфике производства и предъявляемым требованиям к добавочной, подпиточной воде. Предварительная очистка индивидуальна для каждого предприятия и зависит от происхождения исходной воды, ее состава, состояния и назначения. Первой ступенью водоподготовки является предочистка, которая обеспечивает удаление взвешенных и коллоидных примесей, когда используются в основном методы отстаивания и фильтрования в сочетании с коагуляцией и флотацией. Материал статьи посвящен вопросу описания процесса механической предочистки методом гравитационного отстаивания воды, предназначенной для направления в систему дальнейшей обработки и подпитки паровых котлов.

Цель исследования — поиск решения и анализ интегро-дифференциального уравнения движения осаждаемых частиц при гравитационном разделении двухфазных систем в цикле водоочистки, позволяющие устанавливать технологические режимы осаждения. Задачами исследования являются разработка интегро-дифференциального уравнения процесса осаждения твердых частиц в жидкости, его решение и анализ влияния граничных условий на характер решения, а также получение зависимости скорости осаждения от температурных условий. Предметом исследования является выявление закономерностей процесса гидромеханического осаждения твердых частиц в жидкой среде.

В связи с высокой экономической и социальной значимостью последствий выхода из строя котельного оборудования вследствие недостатков водоочистки, наиболее часто в системе водоподготовки используется напорное механическое фильтрование через сорбент. Методы исследования базируются на использовании интегро-дифференциального уравнения движения твердых частиц в жидкости и на его решении посредством операционного исчисления. В результате исследования получены два решения интегро-дифференциального уравнения, одно из которых описывает скорость всплытия газового пузырька, а второе выражение отражает скорость осаждения частиц.

Ключевые слова: водоподготовка, гравитационное осаждение, дисперсность, твердые частицы, дифференциальное уравнение, краевая задача

Для цитирования: Злобин В. Г., Борух А. В., Пеленко В. В., Хлыновский А. М. Определение скорости осаждения механических примесей в предварительном цикле водоподготовки // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 59–67. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_59–67

DETERMINATION OF THE SEDIMENTATION RATE OF MECHANICAL IMPURITIES IN THE PRE-TREATMENT WATER CYCLE

Vladimir Germanovich Zlobin¹, Borukh Avseevich Voronenko², Valery Viktorovich Pelenko¹, Alexey Mikhailovich Khlynovsky¹

¹ Higher School of Technology and Energy of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design

² National Research University ITMO

Corresponding author: V. G. Zlobin, e-mail: zlobin_v@list.ru

ABSTRACT

Developing an effective water treatment system for hot water and steam boilers at a CHP plant relies on a multi-stage water treatment process. Selecting a particular pretreatment method is based on production-specific factors and the quality requirements for make-up and feed water. Pretreatment is unique to each facility and is determined by the origin, composition, condition, and intended application of the raw water. The first stage of water treatment is pre-treatment, which removes suspended and colloidal impurities, primarily using sedimentation and filtration methods in combination with coagulation and flotation. The subject of this article is the description of the mechanical pre-treatment process using sedimentation of water destined for subsequent treatment and steam boiler feedwater makeup.

The study seeks to solve and analyze the integro-differential equation of particle motion during gravitational separation of two-phase systems in the water treatment cycle, allowing for the establishment of technological sedimentation conditions. This research aims to develop an integro-differential equation for the sedimentation process of solid particles in a liquid, solve it and analyze the effect of boundary conditions on the solution characteristics, as well as obtain the dependence of settling velocity on temperature conditions. The subject of this study is to determine the regularities of the hydromechanical sedimentation of solid particles in a liquid medium.

Pressure mechanical filtration through a sorbent is the most commonly used method in water treatment systems because of the high economic and social importance of the consequences of boiler equipment breakdowns caused by inadequate water treatment. The research methods rely on the integro-differential equation of solid particle motion in a liquid, as well as on its solution via operational calculus. The research yielded two solutions to the integro-differential equation: one describes the rise velocity of a gas bubble, and the second expression reflects the settling velocity of particles.

Keywords: water treatment, gravitational sedimentation, dispersity, solid particles, differential equation, boundary value problem

For citation: Zlobin V. G., Voronenko B. A., Pelenko V. V., Khlynovsky A. M. (2026) 'Determination of the sedimentation rate of mechanical impurities in the pre-treatment water cycle', Technology and Energy, vol. 2, no. 2, pp. 59–67. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_59–67

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], отстаивание является одной из ступеней технологической линии подготовки питательной и подпиточной воды. Наряду с имеющимися недостатками метода осаждения, такими как значительные капитальные затраты на отстойники и осветлители, длительность процесса осаждения, невозможность удаления растворенных солей, метод имеет определенные достоинства. К ним можно отнести высокую эффективность против кремнезема при проведении отстаивания в связке с химической обработкой. Кроме того, в силу большого опыта применения в энергетике технология отработана и предсказуема. К положительным сторонам относятся низкие эксплуатационные затраты (по сравнению с мембранными методами на больших объемах [14]), а также простота и надежность. Осаждение

используется как предварительная, защитная ступень для грубого удаления взвесей [2].

В процессе работы котлов на жесткой питательной воде при отсутствии для нее эффективных водоочистных мероприятий возникает ряд проблем, ведущих к возникновению предпосылок аварии используемого оборудования. К числу таких проблем можно отнести образование отложений на внутренних стенках котлов, коррозия оборудования и, как результат, повышение затрат на эксплуатацию и ремонт. Учитывая особенности химического состава и состояния водных источников северных областей Российской Федерации, характеризующихся высоким содержанием природной органики и железа, можно отметить высокую актуальность решения этой проблемы.



Вопросам разработки математических моделей в системе водоподготовки и определения скорости осаждения посвящено огромное количество работ [1, 12, 15–22]. Отметим, в частности, получение аналитического решения линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка диффузионной модели в заданных граничных условиях, приведенного в работе [16].

В настоящей работе предпринята попытка получения уточненной математической модели кинетики процесса механической водоочистки методом осаждения, как предварительного этапа водоподготовки путем гравитационного разделения двухфазных систем на составные компоненты. **Целью** данного исследования является разработка и решение уравнения движения осаждаемых частиц при гравитационном разделении двухфазных систем. **Задачами** исследования являются составление дифференциального уравнения для скорости процесса осаждения, анализ граничных условий в зависимости от кинематических,

физико-механических и геометрических параметров компонентов двухфазных систем, а также получение зависимости скорости осаждения мелкодисперсных частиц от температурных условий. Поставленная задача реализуется в виде аналитического решения методом преобразования Лапласа краевой задачи, описывающей указанный процесс. **Предметом** изучения в данной работе является выявление закономерностей процесса гидромеханического осаждения твердых частиц в жидкой среде для гравитационного разделения двухфазных систем. Конкретным **объектом** исследования является двухфазная жидкая среда при движении в ней твердых частиц с близкой ей плотностью. К элементам **новизны** можно отнести получение решения определяющего дифференциального уравнения с учетом силы Бассе, а также уравнения для скорости всплытия газового пузырька, что может быть использовано в реализации задач флотации при очистке сточных вод; кроме того, получена зависимость скорости осаждения мелкодисперсных частиц от температурных условий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы и методы исследования базируются на использовании теоретических подходов, таких, как описание движения твердых частиц в жидкости дифференциальными уравнениями, решение дифференциального уравнения методом операционного исчисления — методом интегрального преобразования Лапласа, анализ и сравнение полученных результатов. Углубление знаний о механизме процесса разделения, о влиянии отдельных параметров на процесс позволит получить расчетным путем технологические параметры процесса разделения двухфазных и многофазных систем.

Как указывалось, водоподготовка включает механическую очистку. Одним из наиболее распространенных гидромеханических процессов в технике является гравитационное осаждение твердых частиц в жидкой среде, применяемое для разделения двух- или многофазных систем. Реологические свойства системы и условия обтекания оказывают определяющее влияние на количественные характеристики движения твердых частиц в жидкости [11]. При осаждении мелкодисперсных частиц основным параметром процесса служит скорость осаждения. В составе механической очистки как этапа водоподготовки выделяют два процесса: осаждение (выпадение наиболее тяжелых частиц) и отстаивание (всплытие наиболее легких частиц). Физические закономерности обоих процессов идентичны и различаются исключительно направлением движения частиц, удаляемых из среды [3, 5]. В работе [9], на которой базируется предлагаемый материал, отмечается, что если скорость

дисперсной частицы изменяется во времени, то сила сопротивления, действующая на неё со стороны потока жидкости, зависит не только от скорости частицы в рассматриваемый момент, но также от её ускорения и от скорости в предыдущие моменты времени, то есть от предыстории движения частицы.

Движение твердых частиц в жидкости может быть описано с помощью уравнений Навье — Стокса. Ламинарный (слоистый) режим течения характерен для малых скоростей движения потока жидкости. При таком режиме слои жидкости перемещаются параллельно друг другу, скользя без перемешивания. В условиях установившегося (стационарного) движения скорость потока W при ламинарном режиме постоянна в каждой его точке, т. е. $W = f(x, y, z)$, где x, y, z — текущие координаты. При осаждении в жидкости частиц микроскопического размера возникает ползущее течение, представляющее собой течение с очень малыми скоростями. При

значениях числа Рейнольдса $Re = \frac{W_0 d \rho}{\mu} = \frac{W_0 d}{\nu} < 1$, (W_0 —

скорость потока, обтекающего частицу вдали от нее; d — диаметр частицы; ρ — плотность жидкости; μ — динамический коэффициент вязкости; ν — кинематический коэффициент вязкости), уравнения движения Навье — Стокса упрощаются, и из них выводится формула полной кинетической силы сопротивления, проявляющаяся только в движущемся потоке:

$$F_k = 6\pi \cdot \mu \cdot R \cdot W_0, \quad (1)$$

где R — радиус шарообразной частицы.



Уравнение (1) выражает закон *Стокса*.

Полная сила сопротивления при обтекании частицы (шара) пропорциональна импульсу (количеству движения) и площади лобового сечения f (формула *Ньютона*):

$$F_k = C \frac{\rho W_0^2}{2} \cdot f. \quad (2)$$

Отсюда коэффициент пропорциональности:

$$C = \frac{2 \cdot F_k}{\rho \cdot W_0^2 \cdot f}. \quad (3)$$

Учитывая, что $f = \pi R^2$ и F_k из (1), получим [1]:

$$C = \frac{2 \cdot 6\pi R \mu W_0}{\rho W_0^2 \pi R^2} = \frac{12\mu}{\rho W_0 R} = \frac{24}{\mu} = \xi. \quad (4)$$

Уравнение (4) выражает закон сопротивления среды при ламинарном режиме ($Re < 1$).

При этих условиях скорость осаждения частицы описывается, как известно, формулой *Стокса* [11]:

$$W_{oc} = \frac{d^2 (\rho_{ms} - \rho) g}{18\mu}, \quad (5)$$

которая справедлива для области $10^{-4} < Re_{oc} < 2$.

В уравнении (5) ρ_{ms} — плотность частицы.

Для нестационарных условий (неустановившегося движения) и при движении твердых тел в жидкости близкой плотности формула *Стокса* (1) заменяется для силы сопротивления движущемуся в жидкости телу формулой *Буссинеска* [4, 6, 8, 9]:

$$\vec{F}_{comp} = -6\pi\mu R \vec{W}(t) - \frac{2}{3}\pi\rho R^3 \frac{d\vec{W}(t)}{dt} - 6\pi\mu R \left[\frac{R}{\sqrt{\pi\nu}} \int_0^t \frac{d\vec{W}(\tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} - \frac{2R}{\sqrt{\pi\nu t}} \vec{W}(0) \right], \quad (6)$$

где t — время.

Еще раз следует отметить, что в работе [7] и в предыдущих изданиях монографии [6] под знаком интеграла

ошибочно указана скорость $\vec{W}$, а не ускорение $\frac{d\vec{W}(\tau)}{d\tau}$,

а решение уравнения (6) дано только в [7], причем для указанного ошибочного случая.

Предполагается, что вдали от частицы жидкость неподвижна.

В формуле *Буссинеска* первый член представляет собой стационарную формулу *Стокса* (силу сопротивления *Стокса*) (1), второй — инерционную составляющую силы сопротивления, учитывающую присоединенную

массу жидкости (шара) (движение шара в жидкости можно рассматривать как происходящее в пустоте, если только к массе шара присоединить дополнительную массу, равную половине массы жидкости в объеме шара), третье слагаемое — так называемая сила *Бассе*. Сила *Бассе* обычно включается в выражение для силы сопротивления движущейся частице, если сила межфазного взаимодействия зависит от предыстории движения частиц при их нестационарном движении. Иногда слагаемыми типа силы *Бассе* пренебрегают [10], что значительно упрощает описание движения дисперсной частицы, однако при этом величина относительной погрешности при вычислении скорости осаждения твердой частицы может достигать 20 % [8].

Из формулы *Буссинеска* (6) следует, что при $t=0$ и $\vec{W}(0) \neq 0$ сила сопротивления становится бесконечной: невозможно шару, погруженному в вязкую жидкость, мгновенно сообщить конечную скорость. Именно поэтому нам следует принять $\vec{W}(0)=0$.

В случае шара, приведенного импульсивно из состояния покоя в состояние поступательного, прямолинейного и равномерного движения со скоростью $\vec{W}(0)$, из (6) следует величина силы сопротивления, равная [6]:

$$F_{comp} = 6\pi\mu R W_0 \left(1 + \frac{R}{\sqrt{\pi\nu t}} \right), \quad (7)$$

из которой при $t \rightarrow \infty$ вновь получается формула *Стокса* (1).

При вертикальном падении частицы в форме шара уравнение его движения запишется (основной закон динамики — второй закон *Ньютона*):

$$\vec{F}_{comp} + m\vec{g} + \vec{F}_a = m \frac{d\vec{W}}{dt} \quad (8)$$

или

$$\frac{4}{3}\pi\rho_1 R^3 \frac{d\vec{W}}{dt} = \vec{F}_{comp} + \frac{4}{3}\pi(\rho_1 - \rho) R^3 \vec{g}, \quad (9)$$

где $\vec{F}_a$ — выталкивающая сила (сила *Архимеда*); ρ_1 — плотность материала шара; $\vec{g}$ — ускорение свободного падения; $m\vec{g}$ — сила тяжести.

Проектируя (6) на направление движения с учетом (8), получим интегро-дифференциальное уравнение [4]:

$$\frac{dW(t)}{dt} + \alpha^2 W(t) + \frac{2\beta}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dW(\tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} = f_0, \quad (10)$$

где введены следующие обозначения:

$$\alpha^2 = \frac{9\mu}{2R^2 \left(\rho_1 + \frac{\rho}{2} \right)}; \quad 2\beta = \frac{9\sqrt{\mu\rho}}{2R \left(\rho_1 + \frac{\rho}{2} \right)}; \quad f_0 = \frac{g(\rho_1 - \rho)}{\rho_1 + \frac{\rho}{2}}.$$



Для решения уравнения (10) применим один из методов операционного исчисления — метод интегрального преобразования Лапласа. Он заключается в том, что изучается не сама функция (оригинал), а ее видоизменение (изображение). Это видоизменение функции — преобразование — производится при помощи умножения ее на некоторую экспоненциальную функцию и интегрирования в определенных пределах.

Преобразование Лапласа для функции $y=f(\tau)$ (оригинала) состоит в умножении ее на $e^{-s\tau}$ и интегрировании в пределах от 0 до ∞ [4, 9]:

$$\int_0^{\infty} f(\tau) e^{-s\tau} d\tau = F(s),$$

$$f(\tau) \xrightarrow{L} F(s),$$

где $s=\xi+i\cdot\eta$ — некоторая комплексная величина (операторная переменная); $i=\sqrt{-1}$; $F(s)$ — изображение функции $f(\tau)$.

Преобразованное уравнение (например, дифференциальное, интегро-дифференциальное) в области изображений значительно проще исходного, часто это обычные алгебраические уравнения, так как «порядок» исходного уравнения таким преобразованием понижается на единицу. Затем находим искомую функцию в изображениях и далее совершаем обратный переход (по обратному преобразованию Лапласа) к оригиналу искомой функции.

Если $W(t) \xrightarrow{L} W_L(s)$, то $\frac{dW(t)}{dt} \xrightarrow{L} sW_L(s) - W(0)$;

поскольку $W(0)=0$, то $\frac{dW(t)}{dt} \xrightarrow{L} sW_L(s) = sW_L$;

$$\int_0^t \frac{dW(\tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}} \xrightarrow{L} sW_L \frac{1}{\sqrt{s}} = \sqrt{s}W_L$$

(по теореме умножения изображений (теореме Бореля)):

$$\int_0^t \varphi(t)f(t-\tau)d\tau = \int_0^t \varphi(t-\tau)f(\tau)d\tau = f \cdot \varphi \xrightarrow{L} F(s)\Phi(s),$$

где $f \cdot \varphi$ — свертка непрерывных функций $f(t)$ и $\varphi(t)$; $F(s)$ и $\Phi(s)$ — изображения функций $f(t)$ и $\varphi(t)$.

Таким образом, после применения к уравнению (10) преобразования Лапласа, получим изображающее уравнение:

$$sW_L + \alpha^2 W_L + 2\beta\sqrt{s}W_L = \frac{f_0}{s}, \quad (11)$$

откуда задача сводится к разысканию искомой функции для изображения скорости:

$$W_L = \frac{f_0}{s(s + \alpha^2 + 2\beta\sqrt{s})}. \quad (12)$$

Обозначим $\sqrt{s} = x$ и разложим (12) на простейшие дроби методом неопределенных коэффициентов. В результате получим:

$$W_L = \frac{f_0}{x^2(x^2 + \alpha^2 + 2\beta x)} = \frac{f_0}{x^2(x-x_1)(x-x_2)} = \left[\frac{\frac{\alpha^2}{x^2} - \frac{2\beta}{x} + \frac{-2\beta^2 + 2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} + \alpha^2}{2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}(x-x_1)} + \frac{2\beta^2 - 2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} - \alpha^2}{2\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}(x-x_2)} \right] \cdot \frac{f_0}{\alpha^4}, \quad (13)$$

где x_1 и x_2 — корни квадратного трехчлена $(x^2 + 2\beta x + \alpha^2) = 0$:

$$x_1 = -\beta - \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}; \quad x_2 = -\beta + \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Здесь возможны два случая.

При $\beta > \alpha$, $\rho > 1,6\rho_1$ оба корня x_1 и x_2 действительны и отрицательны, плотность жидкости больше плотности тела (газовые пузырьки) [13, 23–25].

В этом случае:

$$W_L = \frac{f_0}{\alpha^4} \left[\frac{\frac{\alpha^2}{s} - \frac{2\beta}{\sqrt{s}} + \frac{-2\beta^2 + 2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} + \alpha^2}{2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}(\sqrt{s} - x_1)} + \frac{2\beta^2 - 2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} - \alpha^2}{2\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}(\sqrt{s} - x_2)} \right]. \quad (14)$$

По обратному преобразованию Лапласа (используя соответствующие таблицы изображений функций [9, 10]) получаем окончательное решение для скорости всплывания газового пузырька:

$$W(t) = \frac{f_0}{\alpha^4} \left[\frac{\alpha^2 - \frac{2\beta}{\sqrt{\pi t}} + \frac{-2\beta^2 + 2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} + \alpha^2}{2\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi t}} + x_1 e^{x_1 t} \operatorname{erfc}(-x_1 t) \right) + \frac{2\beta^2 - 2\beta\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} - \alpha^2}{2\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi t}} + x_2 e^{x_2 t} \operatorname{erfc}(-x_2 t) \right) \right], \quad (15)$$

где

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} e^{-z^2} dz \quad (16)$$

функция ошибок Гаусса.

При $\rho < 1,6\rho_1$, т. е. $\alpha > \beta$ (плотность жидкости меньше плотности тела), выражение для скорости осаждения частиц имеет вид:



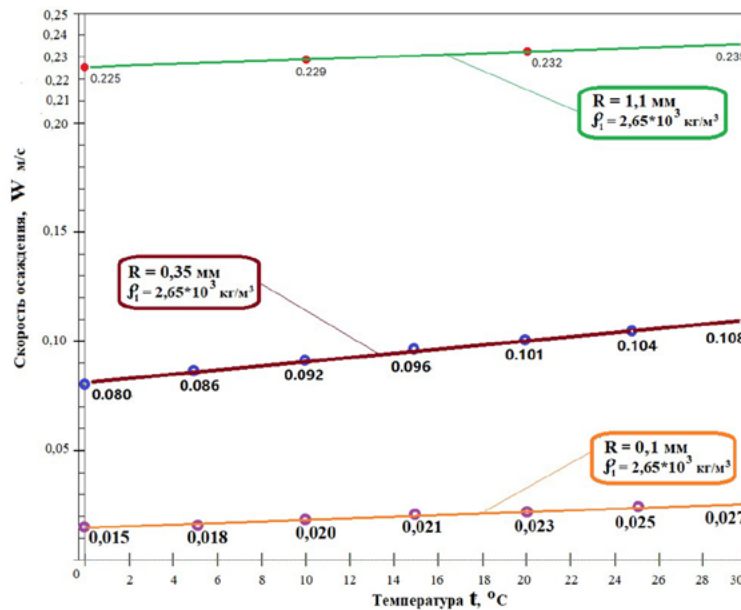


Рисунок 1. Зависимость скорости оседания твердой частицы от температуры
Figure 1. Dependence of the sedimentation velocity of a solid particle on temperature

$$W(t) = \frac{f_0}{\alpha^2} \times \left[\left(1 + e^{-\alpha^2 \left(1 - 2 \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2 \right) t} \right) \times \left(\frac{1 - 2 \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2}{\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2}} A_1 + \frac{2\beta}{\alpha^2} A_2 \right) \cos(2\beta\sqrt{t}) + \left(\frac{2\beta}{\alpha^2} A_1 - \frac{1 - 2 \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2}{\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2}} A_2 \right) \sin(2\beta\sqrt{t}) \right] \quad (17)$$

где

$$A_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\beta^2 t} \left(\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2} \varphi_1 + \beta \varphi_2 \right) - \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2} \operatorname{erfc}(\beta\sqrt{t});$$

$$A_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-\beta^2 t} \left(\beta \varphi_1 - \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2} \varphi_2 \right) - \beta \operatorname{erfc}(\beta\sqrt{t});$$

$$\varphi_1 = \int_0^{\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2} t} e^{y^2} \sin(2\beta\sqrt{t}y) dy;$$

$$\varphi_2 = \int_0^{\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^2} t} e^{y^2} \cos(2\beta\sqrt{t}y) dy.$$

Компьютерное исследование показало, что при достаточно большом времени движения частицы в вязкой жидкости в уравнениях (15) и (17) можно ограничиться только первым слагаемым:

$$W(t) = \frac{f_0}{\alpha^2}. \quad (18)$$

Подставляя в соотношение (18) значения аргументов скорости оседания в соответствии с обозначениями к уравнению (15), получаем:

$$W(t) = \frac{2gR^2(\rho_1 - \rho)}{9\mu}. \quad (19)$$

Учитывая, что динамический коэффициент вязкости воды μ существенно зависит от температуры (при нулевой температуре $\mu_0 = 1,79 \cdot 10^{-3}$ Па·с), эта зависимость приведена в таблице 1 и аппроксимирована авторами квадратичной параболой в заданном диапазоне температур. Представление температурной аналитической зависимости вязкости (более сложное) может быть приведено из справочных данных и в иной форме (например, в виде гиперболы).

Таблица 1. Зависимость динамического коэффициента вязкости воды от температуры

Table 1. Dependence of the dynamic viscosity of water on temperature

t, °C	0	5	10	15	20	25	30
μ , мПа·с	1,79	1,52	1,31	1,14	1,00	0,89	0,80

Уравнение зависимости динамического коэффициента вязкости воды от температуры имеет вид убывающей ветви параболы $\mu = \mu_0 (1 - 0,028t + 0,0003t^2)$.

Таким образом, приходим к температурной зависимости скорости оседания от параметров процесса оседания R , ρ_1 , $\rho(t)$, μ_0 :

$$W(t) = \frac{2gR^2(\rho_1 - \rho)}{9\mu_0(1 - 0,028 \cdot t + 0,0003 \cdot t^2)}. \quad (20)$$

График зависимости скорости осаждения для трех типоразмеров твердых частиц приведен на рисунке.

Расчёты показывают, что при реальных температурных условиях, а также с учётом исходных характеристик жидкости и компонентов примесей, скорость осаждения частиц имеет практически линейный характер и находится в интервале от 0,015 до 0,24 м/с.

Заключение. Многие процессы в теплоэнергетике, в частности первичная очистка воды от примесей, обладают определённой общностью, математическое описание которой достаточно хорошо разработано. Для нестационарных условий и при движении твёрдых частиц в жидкости близкой плотности (что характерно для рассматриваемых процессов) выбрана формула Буссинеска для силы сопротивления тела, движущегося в жидкости. Однако существующее решение нуждается в уточнении в части учёта силы Бассе.

Преобразованное интегро-дифференциальное уравнение решено методами математической физики. Полученное аналитическое решение представляет собой математическую модель одного из возможных процессов разделения двухфазных систем. Это может быть использовано, в частности, для инженерных расчётов процесса механической очистки при водоподготовке, а также других аналогичных процессов. В работе приведена зависимость скорости осаждения от температурных условий, параметров жидкости и твёрдых частиц, а также выполнена оценка порядка величины скорости осаждения.

Список литературы

1. Кандрушин А. А., Комарова Л. Ф., Сомин В. А. Совершенствование технологии водоподготовки на тепловых электростанциях. Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 186–190.
2. Комарова Л. Ф., Сомин В. А. Инженерные методы защиты гидросферы. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2020. 281 с.
3. Кук Г. А. Процессы и аппараты молочной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1973. 768 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953. 788 с.
5. Лисицын А. Н., Федоров А. А., Волков С. М., Федоров А. В., Романов Н. Н. Гидрогазодинамика всплытия пузырей перегретого водяного пара в подсолнечном масле в процессе барботажа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2022. № 4. С. 11–24. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. 7-е изд. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
7. Лурье А. И. Операционное исчисление и его приложение к задачам механики. М. — Л.: Гостехиздат, 1950. 432 с.
8. Наумов В. А. Влияние силы Бассе на динамику твердых частиц в придонном слое // Теоретические и практические аспекты применения инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств: сб. ст. / Моск. госуд. университет прикладной биотехнологии. М, 2002. С. 257–260.
9. Вороненко Б. А., Пеленко В. В., Поляков С. В. Решение задачи механической очистки пищевых сред // Теория и практика разработки ресурсосберегающего пищевого оборудования: сб. ст. СПб.: ГОУ ВПО «СПбГУНиПТ», 2008. № 2. С. 7–9.
10. Протодьяконов И. О., Чесноков Ю. Г. Гидромеханические основы процессов химической технологии. Л.: Химия, 1987. 360 с.
11. Романков П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288 с.
12. Терехов Л. Д., Воловник Г. И., Терехова Е. Л. Методы очистки воды. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 320 с.
13. Федосеев А. В., Сальников М. В., Остапченко А. Е. Моделирование динамики всплытия одиночного пузыря методом решеточных уравнений Больцмана // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 1. С. 191–200. DOI: 10.33048/SIBJIM. 2023.26.117.
14. Филимонова А. А. Недостатки баромембранных методов водоподготовки и способы их устранения в мировой практике / А. А. Филимонова, Э. К. Аракелян, Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров, С. Р. Саитов, Р. В. Бускин // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 98–112.
15. Филимонова А. А. Физико-химический анализ органических примесей в питательных и других производственных водах ТЭЦ с ПГУ / А. А. Филимонова, Э. К. Аракелян, А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, А. А. Баталова // Теплоэнергетика. 2020. № 5. С. 81–86.
16. Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Филиппов И. Е. Анализ процессов в системе ТЭЦ — открытая тепловая сеть с использованием модели реактора вытеснения с рециркуляцией // Промышленная Энергетика. 2014. № 13. С. 21–26.
17. Al-Amshawee S., Yunus M. Y. M., Azoddein A. A. M., Hassell D. G., Dakhil I. H. and Hasan H. A. (2020) 'Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review', Chemical Engineering Journal, vol. 380, pp. 1–19.
18. Chichirov A. A., Chichirova N. D., Filimonova A. A. and Babikov O. E. (2020) 'Mathematical modeling and improvement of ion exchange water treatment energy-saving technologies in power engineering', Journal of Physics: Conference Series, vol. 1652, 012027, pp. 1–5.
19. Filimonova A. A., Chichirova N. D., Chichirov A. A. and Batalova A. A. (2020) 'Physical and chemical methods of organic impurities control in the feed water of the thermal



- power plants waste heat boilers', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1565, 012028, pp. 1–6.
20. Filimonova A. A., Filimonov A. G. and Chichirova N. D. (2020) 'Study of methods and skill experience of diagnostics of the main heating network state diagnostics using a robotized diagnostic complex', in V International conference on information technologies in engineering education (Inforino). Moscow, pp. 1–4.
 21. Filimonova A. A., Chichirova N. D., Chichirov A. A. and Filimonov A. G. (2020) 'Technologies of monitoring and cleaning of return manufacturing condensate in the energy-technological complex of thermal power station — petrochemical facility', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1565, 012027, pp. 1–6.
 22. Gurreri L., Cipollina A. and Tamburini A. (2020) 'Electrodialysis for wastewater treatment — Part II: Industrial effluents', in *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment — Advances and Emerging Processes*. Oxford, UK: Elsevier BV, pp. 195–241.
 23. Li Y., Yang N., Xiao X., Jiang B., Sun Y. and Zhang L. (2023) 'Numerical study of the geometric characteristics and kinetic behavior of single bubble rise processes in different liquids', *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 7, article 073310. doi: 10.1063/5.0150547.
 24. Li S., Xue T. and Li Z. (2023) 'A simple 3D reconstruction algorithm based on laser scanning: Research on flow characteristics of bubbles rising vertically in liquid phase', *Chemical Engineering Science*, vol. 276, article 118796. doi: 10.1016/j.ces.2023.118796.
 25. Liu Z., Li S. and Ji J. (2023) 'Numerical simulation of the rise of two parallel unequal bubbles in a viscoelastic fluid', *Multiphase Science and Technology*. doi: 10.1615/MultScienTechn.2023047889.
 7. Lurie A. I. (1950) *Operational calculus and its application to problems of mechanics*. Moscow — Leningrad: Gostekhizdat.
 8. Naumov V. A. (2002) 'The influence of Basset force on the dynamics of solid particles in the bottom layer', in *Theoretical and practical aspects of applying engineering physicochemical mechanics to improve and intensify technological processes of food production*. Moscow: Moskovskiy gosudarstvennyy universitet prikladnoy biotekhnologii, pp. 257–260.
 9. Voronenko B. A., Pelenko V. V. and Polyakov S. V. (2008) 'Solving the problem of mechanical cleaning of food media', in *Theory and practice of developing resource-saving food equipment*. St. Petersburg: GOU VPO «SPbGUNiPT», vol. 2, pp. 7–9.
 10. Protodyakonov I. O. and Chesnokov Yu. G. (1987) *Hydro-mechanical foundations of chemical technology processes*. Leningrad: Khimiya.
 11. Romankov P. G. and Kurochkina M. I. (1982) *Hydromechanical processes of chemical technology*. Leningrad: Khimiya.
 12. Terekhov L. D., Volovnik G. I. and Terekhova E. L. (2023) *Water treatment methods*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya.
 13. Fedoseev A. V., Salnikov M. V. and Ostapchenko A. E. (2023) 'Modeling the dynamics of a single bubble rise using lattice Boltzmann equations', *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*, vol. 26, no. 1, pp. 191–200. doi: 10.33048/SIBJIM.2023.26.117.
 14. Filimonova A. A., Arakelyan E. K., Chichirova N. D., Chichirov A. A., Saitov S. R. and Buskin R. V. (2020) 'Disadvantages of baromembrane water treatment methods and ways to eliminate them in world practice', *Vestnik MEI*, vol. 4, pp. 98–112.
 15. Filimonova A. A., Arakelyan E. K., Chichirov A. A., Chichirova N. D. and Batalova A. A. (2020) 'Physicochemical analysis of organic impurities in feed and other process waters of combined heat and power plants with combined cycle gas units', *Teploenergetika*, vol. 5, pp. 81–86.
 16. Chichirov A. A., Chichirova N. D. and Filippov I. E. (2014) 'Analysis of processes in the CHP — open heating network system using a plug-flow reactor model with recirculation', *Promyshlennaya Energetika*, vol. 13, pp. 21–26.
 17. Al-Amshawee S., Yunus M. Y. M., Azoddein A. A. M., Hassell D. G., Dakhil I. H. and Hasan H. A. (2020) 'Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review', *Chemical Engineering Journal*, vol. 380, pp. 1–19.
 18. Chichirov A. A., Chichirova N. D., Filimonova A. A. and Babikov O. E. (2020) 'Mathematical modeling and improvement of ion exchange water treatment energy-saving technologies in power engineering', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1652, 012027, pp. 1–5.
 19. Filimonova A. A., Chichirova N. D., Chichirov A. A. and Batalova A. A. (2020) 'Physical and chemical methods of organic impurities control in the feed water of the thermal power plants waste heat boilers', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1565, 012028, pp. 1–6.

References

1. Kandrushin A. A., Komarova L. F. and Somin V. A. (2024) 'Improving water treatment technology at thermal power plants', *Polzunovskiy vestnik*, vol. 1, pp. 186–190.
2. Komarova L. F. and Somin V. A. (2020) *Engineering methods for hydrosphere protection*. Barnaul: Izd-vo AltGTU.
3. Kuk G. A. (1973) *Processes and equipment of the dairy industry*. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 768 p.
4. Landau L. D. and Lifshitz E. M. (1953) *Continuum mechanics*. Moscow: Gostekhizdat.
5. Lisitsyn A. N., Fedorov A. A., Volkov S. M., Fedorov A. V. and Romanov N. N. (2022) 'Hydrogasdynamics of superheated steam bubble rise in sunflower oil during sparging', *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, vol. 4, pp. 11–24. doi: 10.17586/2310-1164-2022-15-4-11-24.
6. Loytsyansky L. G. (2003) *Fluid and gas mechanics*. 7th ed. Moscow: Drofa.



20. Filimonova A. A., Filimonov A. G. and Chichirova N. D. (2020) 'Study of methods and skill experience of diagnostics of the main heating network state diagnostics using a robotized diagnostic complex', in V International conference on information technologies in engineering education (Inforino). Moscow, pp. 1–4.
21. Filimonova A. A., Chichirova N. D., Chichirov A. A. and Filimonov A. G. (2020) 'Technologies of monitoring and cleaning of return manufacturing condensate in the energy-technological complex of thermal power station — petrochemical facility', *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1565, 012027, pp. 1–6.
22. Gurreri L., Cipollina A. and Tamburini A. (2020) 'Electrodialysis for wastewater treatment — Part II: Industrial effluents', in *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes: Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment — Advances and Emerging Processes*. Oxford, UK: Elsevier BV, pp. 195–241.
23. Li Y., Yang N., Xiao X., Jiang B., Sun Y. and Zhang L. (2023) 'Numerical study of the geometric characteristics and kinetic behavior of single bubble rise processes in different liquids', *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 7, article 073310. doi: 10.1063/5.0150547.
24. Li S., Xue T. and Li Z. (2023) 'A simple 3D reconstruction algorithm based on laser scanning: Research on flow characteristics of bubbles rising vertically in liquid phase', *Chemical Engineering Science*, vol. 276, article 118796. doi: 10.1016/j.ces. 2023.118796.
25. Liu Z., Li S. and Ji J. (2023) 'Numerical simulation of the rise of two parallel unequal bubbles in a viscoelastic fluid', *Multiphase Science and Technology*. doi: 10.1615/MultScienTechn. 2023047889.

■ Информация об авторах

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.

Вороненко Борух Авсеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования Национального исследовательского университета ИТМО, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литера А; SPIN-код: 2843–1998, Author ID: 166845, e-mail: voronenkoboris@yandex.ru.

■ Information about the authors

Zlobin Vladimir Germanovich, PhD (Technical), 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.

Voronenko Borukh Avseevich, Doc. Sci in Engineering, Professor, Professor at the Department of Technological Machines and Equipment, ITMO National Research University, 49a, Kronverksky Prospect, Saint Petersburg; SPIN-code: 2843–1998, Author ID: 166845, e-mail: voronenkoboris@yandex.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.

Хлыновский Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплосиловых установок и тепловых двигателей Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 2278–2299; Author ID: 957517; e-mail: alexava@mail.ru.

Pelenko Valery Viktorovich, Dr. 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.

Khlynovsky Alexey Mikhailovich, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate 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: 2278–2299, Author ID: 957517, e-mail: alexava@mail.ru.



Оригинальное теоретическое исследование
 УДК 681.325.6; 681.38; 621.374.33
 DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_68-76

МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ СРАБАТЫВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СХЕМЫ D-ТРИГГЕРОМ НА ПРИМЕРЕ АВТОМАТА МУРА В ПАССАЖИРСКОМ ЛИФТЕ

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

В статье рассматривается метод повышения надежности систем управления пассажирским лифтом путем диагностирования контактной схемы с использованием D-триггера на примере автомата Мура. Актуальность исследования обусловлена необходимостью модернизации систем диспетчеризации, а также отсутствием единых стандартов в данной области. Цель работы — предложить метод проверки состояния контактной схемы при вызове лифта, позволяющий детектировать такие неисправности, как сваривание рабочих контактов, несанкционированное замыкание контактов, и минимизировать время простоя оборудования. В качестве методологической базы использован аппарат теории конечных автоматов, в частности модель автомата Мура, позволяющая описать последовательностные функции управления. В ходе исследования построена интегрированная таблица состояний, выполнена минимизация функций возбуждения для D-триггера аналитическим методом, получены оптимизированные логические выражения для выходных сигналов. Практическая значимость работы заключается в возможности аппаратной реализации решения в виде унифицированного интерфейсного модуля, что обеспечивает универсальность монтажа и упрощает интеграцию с существующими системами управления. Применение метода позволяет своевременно выявлять неисправности и, в отдельных случаях, завершать рабочий цикл лифта до перехода в аварийный режим, что повышает эффективность и безопасность вертикального транспорта.

Ключевые слова: техническое диагностирование контактной схемы, мониторинг состояния контактной схемы, самоподхват контакта лифта, конечный автомат Мура, D-триггер лифта, автоматическая система управления и диспетчеризации, FSM, FPGA/CPLD-based control, fault detection and diagnosis

Для цитирования: Дронов В. О. Метод верификации срабатывания контактной схемы D-триггером на примере автомата Мура в пассажирском лифте // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 68–76. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_68-76

A METHOD FOR VERIFYING THE ACTIVATION OF A CONTACT CIRCUIT BY A D-FLIP-FLOP USING THE EXAMPLE OF A MOORE MACHINE IN A PASSENGER ELEVATOR

Vladimir Olegovich Dronov

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design; LLC "CEPIKS"; St.
 Petersburg, Russia

e-mail: vvvvdr@mail.ru



ABSTRACT

The article presents a method for improving the reliability of passenger elevator control systems through diagnostics of the contact circuit using a D-flip-flop, based on the example of a Moore machine. The relevance of this research is determined by the need to modernize dispatching systems and the lack of uniform standards in this domain. The purpose of this work is to propose a method for checking the contact circuit status during an elevator call, capable of detecting faults such as contact welding and unauthorized contact shorting, and minimizing equipment downtime. The methodological framework of this study is based on the theory of finite automata, specifically the Moore automaton model, which allows for the description of sequential control functions. In the course of the investigation, an integrated state table was developed, the excitation functions for the D-type flip-flop were minimized by means of an analytical method, and optimized logical expressions for the output signals were obtained. The practical value of this research lies in the feasibility of hardware implementation of the solution as a standardized interface module, ensuring universal mounting and easier integration with existing control systems. Using this method makes it possible to detect faults in a timely manner and, in certain cases, to finish the elevator's working cycle before it enters emergency mode, which enhances both the efficiency and safety of vertical transport.

Keywords: technical diagnosis of the contact circuit, contact circuit status monitoring, elevator contact self-latching, Moore finite-state machine, D-trigger of the elevator, automatic control and dispatching system, FSM, FPGA/CPLD-based control, fault detection and diagnosis

For citation: Dronov, V. O. (2026) 'A method for verifying the activation of a contact circuit by a D-flip-flop using the example of a Moore machine in a passenger elevator', Technology and Energy, vol. 2, no. 2, pp. 68–76. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_68–76

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая схема лифтов содержит электрические и электронные аппараты, в которых коммутация осуществляется через контактную часть. Автоматическая система управления и диспетчеризации (АСУД) подает сигнал на реле, которые срабатывают, перемещая механические контакты в нужное положение. Рассмотрим ситуацию, что какой-то контакт схемы не среагировал (аварийное замыкание), в этом случае на диспетчерском пульте фиксируется сигнал «авария», и бригада электромехаников получает наряд и выезжает на место. Лифт в это время будет находиться в режиме «аварийный стоп» до устранения неисправности. В качестве примера предположим, что диагностировано несанкционированное замыкание контакта концевого выключателя положения на третьем этаже 9-этажного дома. Автоматика отрабатывает неисправность и останавливает работу электропривода. Рассмотрим ситуацию, что лифт в это время совершает цикл работы в час пик. Пассажиры не заказывают вызов на третий этаж, едут на другие. В этом случае цикл работы лифта может быть закончен выгрузкой пассажиров до перехода лифта в режим «аварийный стоп», если система способна на верификацию срабатывания сигнала технической неисправности.

Так как «единого документа, в котором были бы изложены все требования к системам диспетчеризации, в России нет» [1], необходимо повышать надежность релейно-контакторной схемы, а также

облегчать поиск и устранение неисправностей в системе электропитания лифта. При перебоях напряжения установка D-триггера может использоваться как самоподхват контактной части. В данной статье будет рассматриваться метод мониторинга состояния аппаратов контактной схемы при помощи установки D-триггера в кнопку вызова лифта.

Актуальность. Модернизация систем диспетчерского контроля должна производиться одновременно с совершенствованием методов обнаружения и устранения неисправностей. Данный метод описывается автоматом Мура, в котором определение состояния перехода соответствует выходным сигналам стандартных датчиков. При составлении программы для автомата могут быть определены различные характеристики срабатывания переходов между состояниями, учитывающие стандарты безопасности на наличие дребезгов и шумов в контактной схеме (в настоящей статье не освещаются).

Частые аварийные остановки лифта могут стать причиной его преждевременной замены. Нередко неисправность контактной части электрических аппаратов может свидетельствовать о неправильном функционировании целого узла электрической цепи. Поэтому своевременное обнаружение неисправности в электрической части схемы позволит оперативно произвести ее устранение. Предлагаемый метод верификации срабатывания поможет скорее восстановить энергоснабжение



поврежденного участка, а при составлении детального алгоритма работы механизма позволит завершить цикл работы — рейс на вызов, что даст возможность избежать «застревания» пассажиров в лифте.

Целью данной статьи является предложение метода верификации срабатывания состояния контактной схемы D-триггером при вызове лифта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Функции, значение которых зависит не только от текущих, но и от предыдущих значений входных переменных, называются последовательностными функциями, а их реализация — последовательностной цепью. Эта зависимость проявляется во времени, поэтому вместо таблиц истинности мы будем описывать математические функции конечным последовательным автоматом (с конечным числом состояний).

Конечный автомат можно представить в виде таблицы состояний. Ее строки — состояния автомата, столбцы — входные символы. Элемент, записанный в строке q_i столбца Q_j , характеризует следующее состояние и выходной символ, получаемые в том случае, если Q_j прикладывается в момент, когда автомат находится в состоянии q_i . Эти величины называются соответственно функциями перехода $N(q_i, Q_j)$ и функциями выходного сигнала $Z(q_i, Q_j)$. Для описания устройства управления (УУ) будет использоваться принцип работы микропрограммного автомата Мура: «В настоящее время программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) широко применяются для реализации схем УУ... Для уменьшения числа макроячеек ПЛИС в схеме УУ необходимо уменьшать число входных переменных и промежуточных термов в реализуемых системах булевых функций (СБФ)» [2, с. 44]; [3].

Опишем состояния схемы управления автомата Мура на языке символов:

- состояния исходного автомата Мура $Q = (q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7)$;
- входные сигналы $N = (x_1, x_2, x_3, x_4)$;
- выходные сигналы $Z = (y_0, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6)$.

Процедура синтеза последовательных цепей производится по шагам:

- 1) Составление таблицы состояний на основании словесного описания последовательностной функции;
- 2) Реализация таблицы состояний последовательностной цепью.

Для достижения цели поставлены задачи: рассмотреть принцип работы D-триггера в лифте на примере аварийного замыкания контакта, построить блок-схему алгоритма работы, описать рабочие состояния, построить модель автомата Мура для решения задачи мониторинга состояния, оптимизировать состояния методами алгебры логики, рассмотреть возможность реализации соединения в виде унифицированного аппаратного блока.

В настоящей работе строится интегрированная таблица состояний автомата Мура для D-триггера. Таблица объединяет состояния переходов и выходов. При определении значений выходных сигналов мы воспользуемся не методом карт Карно, а аналитическим методом.

Математически автомат Мура описывается следующим образом [4, с. 27–34]:

$$\begin{cases} q(t+1) = f(q(t) + x(t)), \\ z(t) = \phi(q(t)). \end{cases} \quad (1)$$

При задании состояний автомата принято составлять таблицы кодировки тех элементов памяти, которые были выбраны для целей проектирования, в нашем случае это D-триггер, таблица 1 (см. ниже). Для нахождения количества триггеров-состояний воспользуемся формулой:

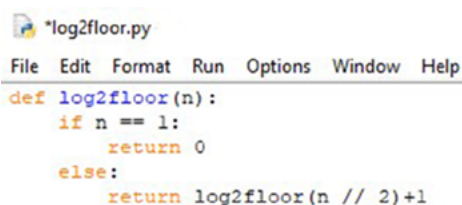
$$S_0 = \lceil \log_2 n \rceil. \quad (2)$$

Эта формула выводится из «Меры Хартли», полученная информация трактуется как уменьшение неопределенности [5, с. 4–6]. Подставим количество состояний в формулу и посчитаем количество задействованных триггеров по формуле 2:

$$S_0 = \log_2 n = S_0 = \log_2 8 = 3.$$

В проектируемой схеме будет использовано три триггера-состояния, что следует из максимального количества состояний в одном цикле: Q_1, Q_2, Q_3 .

Вычисление функции $\lceil \log_2 n \rceil$, где $n \in \mathbb{N}$, можно описать на Python, см. рисунок 1.



```
*log2floor.py
File Edit Format Run Options Window Help
def log2floor(n):
    if n == 1:
        return 0
    else:
        return log2floor(n // 2) + 1
```

Рисунок 1. Рекурсивная реализация функции определения разрядности кода состояний

Figure 1. Recursive implementation of the state code bit width determination function



Автоматам присуще свойство самовосстановления, при котором автомат в исходном условии, не перешедший по сигналу синхроимпульса в целевое состояние, должен перейти в него со следующим синхроимпульсом [6]. Выходные сигналы в ошибочном состоянии должны равняться нулю. Коэффициент ложных переходов определяет вероятность перехода одной рабочей кодовой комбинации в другую под влиянием помехи кратности, равной D . Для несимметричных кодов (где число тактов в цикле различно) при D -кратной ошибке коэффициент ложных переходов определяется как среднее значение, что характеризует их отказоустойчивость [7]. В этом случае тактирование осуществляется добавлением еще одного состояния, равного начальному. На этапе проектирования это условие наиболее наглядно возможно представить в модели модифицированного графа состояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, в качестве элемента памяти для мониторинга состояния контактной схемы будет взят D-триггер. Этот тип триггера ведет себя аналогично элементу задержки, выход у которого в момент времени t равен входу x в момент времени $t - D$; D — постоянная независимая величина задержки, значение которой определяется частотой следования импульсов синхронизации. Кодирование состояний автомата для срабатывания D-триггера показано в таблице 1.

Таблица 1. Кодирование состояний автомата

Table 1. Automaton state encoding

$q(t)$	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7
Q_3	0	0	0	0	1	1	1	1
Q_2	0	0	1	1	0	0	1	1
Q_1	0	1	0	1	0	1	0	1

Состояние входа D-триггера подается на выход без учета его текущего состояния. Приведем формулу, определяющую следующее состояние через D-триггер:

$$Q(t+1) = D \cdot \overline{Q(t)} + D \cdot Q(t) = D, \quad (3)$$

где $Q(t)$ — текущее состояние триггера в момент времени t ;

$Q(t+1)$ — следующее состояние триггера в момент времени $t+1$ после прихода синхроимпульса;

D — сигнал на входе D-триггера в момент времени t .

Срабатывание D-триггера приравнивается к независимой величине задержки Δ_n и рассматривается в сочетании со срабатыванием датчиков. Значение введенной величины дельты следования может соотноситься с временем переходных процессов, а также допустимой

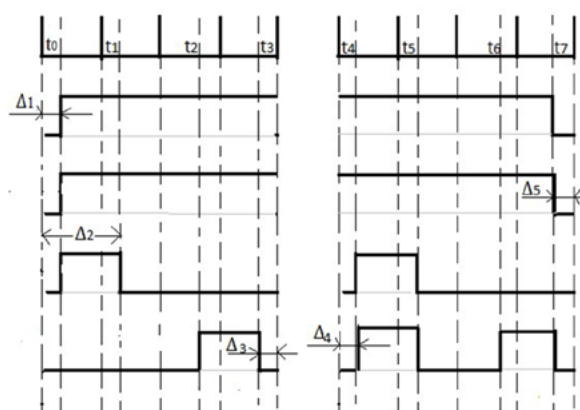


Рисунок 2. Дельта следования, способная привести к ошибке перехода: Δ_1 — сигнал, свидетельствующий о наличии питания при запуске электропривода для перемещения кабины лифта на этажный вызов, соответствует переменной x_1 ; Δ_5 — сигнал, синхронизированный с сигналом проверки по перегреву двигателя, x_4 (схематично изображен окончанием временного цикла работы); Δ_2 — проверка на отказ типа «ложное замыкание» контактов, синхронизированная с датчиком веса, на схеме соответствует переменной x_3 ; Δ_3, Δ_4 — сигнал проверки на рассогласование, синхронизированный с открыванием и закрыванием дверей кабины, соответствует переменной x_2 .

Figure 2. A succession delta that can lead to a transition error: Δ_1 — the signal indicating the presence of power when starting the electric drive for moving the elevator car to a floor call corresponds to the variable x_1 ; Δ_5 — the signal synchronized with the motor overhear verification signal, x_4 (represented schematically by the end of the operating time cycle); Δ_2 — the test for a false short-circuit type contact failure, which is synchronized with the weight sensor, is represented by the variable in the diagram x_3 ; Δ_3, Δ_4 — the mismatch check signal synchronized with the opening and closing of the elevator car doors, corresponds to variable x_2 .

точностью пуска/останова для эксплуатируемого механизма. Примем сигналы датчиков за переменные: x_1 — остановка при отсутствии питания; x_2 — отключение из-за неисправности дверей кабины лифта; x_3 — остановки из-за превышения по весу; x_4 — перегрев двигателя. Сигнал с триггера верифицирует срабатывание контактной части системы за время задержки Δ_n добавлением проверочного сигнала состояния, равного требуемому состоянию срабатывания. Вместо задержки $t-D$ вводится Δ_n , чтобы подчеркнуть возможность задания дельты срабатывания для диагностируемой системы.

Построим временную диаграмму следования сигналов для определяемых функций в виде комбинационной схемы с включенными переменными при допущении, что $\Delta_n \equiv x_n$, рисунок 2. По этой схеме определим состояния, которые необходимо учитывать при верификации срабатывания, чтобы избежать ошибки перехода.

Повторение верификации срабатывания аналогично нажатию пассажиром кнопки вызова и включению



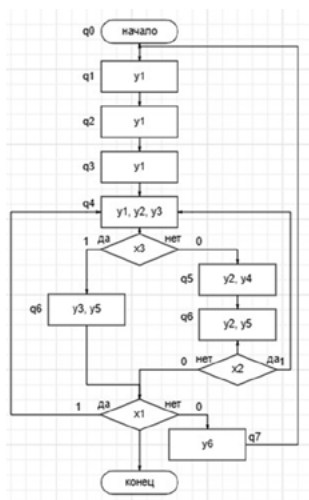


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма цикла работы лифта [8]

Figure 3. Block diagram of the elevator working cycle algorithm [8]

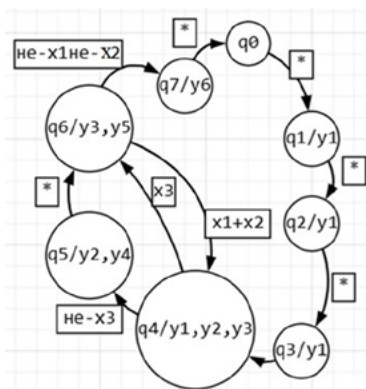


Рисунок 4. Граф-состояний автомата Мура, * — безусловный переход [9]

Figure 4. State graph of the Moore automaton, * — unconditional transition [9]

D-триггера в кнопке в наиболее вероятные моменты рассогласования работы механизма, приведенные на временной диаграмме рисунка 2.

Состояния автомата Мура опишем при помощи упрощенной блок-схемы алгоритма работы лифта, рисунок 3 (для простоты изложения исключим переменную перегрева x_4). Выходные сигналы y_1 , y_2 , y_3 свидетельствуют об исправной работе лифта в состояниях q_0 — q_4 (исходное состояние готовности к работе механизма при получении сигнала на вызов лифтом с этажной площадки). В состоянии q_4 срабатывает датчик веса, обозначаемый переменной x_3 (и отражающий необходимый сигнал D-триггера на рассогласование Δ_2). Датчик веса запрограммирован таким образом, что кабина должна быть пустая при начале нового цикла, а после прибытия на этаж вызова в кабине должен быть набран вес, иначе

лифт нельзя будет вызвать с пульта кабины. Если датчик веса $x_3=0$, лифт начинает новый цикл. В этом случае возможны два состояния:

- q_5 — выходной сигнал y_2 будет свидетельствовать, что в вызванном лифте нет пассажиров, а сигнал y_4 — что управление вызовом из кабины лифта в дальнейшем цикле осуществляется при наличии пассажиров;
- q_6 — выходной сигнал y_5 будет свидетельствовать о срабатывании сигнала на открывание и закрывание дверей (переменная x_2).

При срабатывании сигнала на открывание и закрывание дверей $x_2=1$ алгоритм возвращается в точку определения веса x_3 . Если же $x_2=0$, лифт перевызван, либо он уже едет с пассажирами в пункт вызова, состояние q_6 : выходной сигнал y_3 свидетельствует, что в лифте пассажиры, y_5 — о срабатывании сигнала на открывание и закрывание дверей кабины. На схеме не указан отдельный D-триггер для датчика веса, потому что для него нужно рассчитывать дельту времени, состояние объединено с действием открывания дверей (объединены временные диаграммы с рассогласованием Δ_2 , Δ_3 , Δ_4 — время рассогласования принято одинаковым). Сигнал y_2 будет свидетельствовать, что в вызванном лифте нет пассажиров, а сигналы y_4 , y_5 — что управление из кабины лифта осуществляется при наличии пассажиров, и он будет детектирован после получения вызова с пульта и закрывания дверей (согласно принципу работы датчика веса).

Далее алгоритм обрабатывает сигнал переменной x_1 , свидетельствующий о наличии питания, имеющий сигнал рассогласования Δ_1 . Сигнал на кнопку лифта можно «подхватывать» D-триггером при перебоях питания, чтобы лифт оставался в рабочем состоянии. Если $x_1=1$, то цикл работы продолжается. Если $x_1=0$, тогда либо отсутствует питание, либо кабина лифта в состоянии «аварийный стоп», либо лифт находится в режиме ожидания вызова (y_6).

Запрограммируем действующие состояния [3]:

- q_0 — этим символом отмечается начальное и конечное состояние;
- q_1 — состояние, свидетельствующее о наличии питания, Δ_1 , y_1 ;
- q_2 — проверка на залипание контактов Q_3 , Δ_1 , y_1 ;
- q_3 — состояние, следящее за нормой температуры в электроприводе, Δ_1 , y_1 ;
- q_4 — датчик веса, «опрашивание» Q_2 , здесь два сигнала рассогласования, Δ_1 , Δ_4 , y_1 , y_2 , y_3 ;
- q_5 — лифт вызван и останавливается на этаже, «подхват», Δ_3 , Δ_5 , y_2 и y_4 ;
- q_6 — механизм открывания и закрывания дверей, «опрашивание» Q_1 , Δ_3 , Δ_4 и Δ_5 , y_2 , y_3 и y_5 ;
- q_7 — стоп, y_6 .

Таблица 2. Интегрированная таблица состояний автомата Мура для D-триггера
Table 2. Integrated state table of the Moore automaton for the D-trigger

№	Исх.	Код исх. Сост			След.	Код сл. Сост.			Вх. Сигн.	Вых. Сигн.	Функц. Возб.		
		Q_3	Q_2	Q_1		Q_3	Q_2	Q_1			D_3	D_2	D_1
1	q_0	0	0	0	q_1	0	0	1	*	-	0	0	1
2	q_1	0	0	1	q_2	0	1	0	*	y_1	0	1	0
3	q_2	0	1	0	q_3	0	1	1	*	y_1	0	1	1
4	q_3	0	1	1	q_4	1	0	0	*	y_1	1	0	0
5	q_4	1	0	0	q_5	1	0	1	$\overline{x_3}$	y_1, y_2, y_3	1	0	1
6	q_4	1	0	0	q_6	1	1	0	x_3	y_1, y_2, y_3	1	1	0
7	q_5	1	0	1	q_6	1	1	0	*	y_2, y_4	1	1	0
8	q_6	1	1	0	q_4	1	0	0	$x_1 + x_2$	y_3, y_5	1	0	0
9	q_6	1	1	0	q_7	1	1	1	$\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$	y_3, y_5	1	1	1
10	q_7	1	1	1	q_0	0	0	0	*	y_6	0	0	0

На рисунке 4 изображен граф состояний в соответствии с кодированием алгоритма работы механизма. Вершины графа обозначают состояния автомата q_0-q_7 , каждому из которых поставлен в соответствие определенный выходной сигнал y_i , характеризующий работу механизма в данном такте. Учтено условие, что две разные операторные вершины графа не могут быть обозначены одним и тем же символом. На графе состояния можно увидеть 10 переходов, значит в автомате Мура будет задействовано 10 состояний. Эти состояния описываются интегрированной таблицей состояний автомата Мура для D-триггера, таблица 2. К этой таблице относятся кодированные состояния автомата Q_1, Q_2, Q_3 из таблицы 1.

По структурной совмещенной таблице 2 составляем функции возбуждения для каждого триггера. Так как у нас много переменных: 3 переменных Q и 3 переменных x ($2^6 = 64$ переменных), мы не будем использовать метод карт Карно, воспользуемся аналитическим методом [10].

Пример. Вес функции возбуждения D_3 измеряется шестью истинностными значениями ($D_3 = 1$) по таблице 2. Первое истинностное значение № 4: $q_3 = \overline{Q_3}Q_2Q_1$. Объединенные в функцию суммы произведений шести истинностных значений функции возбуждения D_3 выражаются в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ). Эта функция может быть упрощена по методу Куайна — Мак-Класки [11] следующим образом:

Имеем функцию состояния q_6 :

$$Q_3Q_2\overline{Q_1}(x_1 + x_2) + Q_3Q_2\overline{Q_1}(\overline{x_1}\overline{x_2});$$

— по закону де Моргана $(x_1 + x_2) = (\overline{x_1} \cdot \overline{x_2})$, значит $(x_1 + x_2)$ и $(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2})$ являются одной переменной с противоположным значением истинности, что говорит

о возможности исключения этой переменной из описания состояния, так как она не влияет на выходной сигнал;

— получившееся выражение $Q_3Q_2\overline{Q_1} + Q_3Q_2\overline{Q_1} = Q_3Q_2\overline{Q_1}$ преобразуется согласно логическому закону идемпотентности;

— при минимизации суммы произведений истинностных состояний функции возбуждения используется также операция склеивания: отличающиеся на одну переменную с противоположным знаком терм-произведения склеиваются $Q_3Q_2\overline{Q_1} + Q_3Q_2Q_1 = Q_3Q_2$.

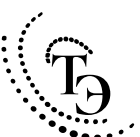
Выпишем сумму произведений, которые дают единицы для каждой функции возбуждения, и оптимизируем функции возбуждения:

$$\begin{aligned} D_3 &= q_3 + q_4\overline{x_3} + q_4x_3 + q_5 + q_6(x_1 + x_2) + q_6(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) = \\ &= \overline{Q_3}Q_2Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1}\overline{x_3} + Q_3Q_2\overline{Q_1}x_3 + Q_3Q_2Q_1 + \\ &+ Q_3Q_2\overline{Q_1}(x_1 + x_2) + Q_3Q_2\overline{Q_1}(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) = \overline{Q_3}Q_2Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1} + \\ &+ Q_3Q_2Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1} = \overline{Q_3}Q_2Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1} + Q_3Q_2Q_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_2 &= q_1 + q_2 + q_4x_3 + q_5 + q_6(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) = \\ &= \overline{Q_3}Q_2Q_1 + \overline{Q_3}Q_2Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1}x_3 + Q_3Q_2Q_1(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) = \\ &= \overline{Q_3}Q_1 + \overline{Q_3}Q_2\overline{Q_1} + Q_3Q_2\overline{Q_1}x_3 + Q_3Q_2Q_1(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_1 &= q_0 + q_2 + q_4\overline{x_3} + q_6(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) = \\ &= \overline{Q_3}Q_2\overline{Q_1} + \overline{Q_3}Q_2Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1}\overline{x_3} + Q_3Q_2Q_1(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) = \\ &= \overline{Q_3}Q_1 + Q_3Q_2\overline{Q_1}\overline{x_3} + Q_3Q_2Q_1(\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}). \end{aligned}$$

По полученным функциям D_1, D_2, D_3 строится схема проектируемой цепи, которая обеспечивает заданный выходной сигнал. Для автомата Мура выходной сигнал зависит только от внутреннего состояния [2]. По таблице 2 получим функции выхода:



$$\begin{aligned}
y_1 &= q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = \\
&= \bar{Q}_3 \bar{Q}_2 Q_1 + \bar{Q}_3 Q_2 \bar{Q}_1 + \bar{Q}_3 Q_2 Q_1 + Q_3 \bar{Q}_2 \bar{Q}_1 = \\
&= \bar{Q}_3 Q_1 + \bar{Q}_3 Q_2 + Q_3 \bar{Q}_2 \bar{Q}_1; \\
q_4 + q_4 + q_5 &= q_4 + q_5 = Q_3 \bar{Q}_2 \bar{Q}_1 + Q_3 \bar{Q}_2 Q_1 = Q_3 \bar{Q}_2; \\
y_3 &= q_4 + q_4 + q_6 + q_6 = q_4 + q_6 = Q_3 \bar{Q}_2 \bar{Q}_1 + Q_3 Q_2 \bar{Q}_1 = Q_3 \bar{Q}_1; \\
y_4 &= q_5 = Q_3 \bar{Q}_2 Q_1; \\
y_5 &= q_6 = Q_3 Q_2 \bar{Q}_1; \\
y_6 &= q_7 = Q_3 Q_2 Q_1.
\end{aligned}$$

Мы произвели процедуру проектирования переключающей цепи с D-триггером для верификации срабатывания контактной схемы. Полученные сигналы были оптимизированы. Симуляция электрической цепи может быть проведена в программах Proteus, LTSpice и др.

В настоящее время основная масса электронных компонентов, составляющих базу современных технических устройств, не являются стандартным вариантом для производителей, из этого следует увеличение сроков их проектирования и производства [12]. Поэтому в данной статье предлагается аппаратная реализация посредством проектирования унифицированного интерфейсного модуля. На рисунке 5 изображен пример сборочного чертежа проекта кабельного модуля, который сконструирован для подключения лифтового оборудования. В проекте инженер распределяет контакты оптимизированного нами числа сигналов между доступными пинами разъема. Монтажник собирает кабельный жгут, который является важным элементом коммутации: осуществляет передачу сигналов контактной схемы во время работы механизма. На рисунке показан типовой разъем DB-9, через который может быть передан массив информации

в коде протоколов RS-232, RS-485 или проприетарных протоколов FSF (собственническое программное обеспечение) [13]. Информация поступает на пульт управления, обеспечивая качественную обратную связь при появлении неисправности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен и теоретически обоснован метод верификации срабатывания контактной схемы с использованием D-триггера, реализованный на модели автомата Мура применительно к системе управления пассажирским лифтом. В отличие от традиционных подходов, фиксирующих аварию лишь после полного отказа механизма и перехода в состояние «аварийный стоп», предложенное решение позволяет на этапе проектирования электрической цепи заложить алгоритмы раннего обнаружения таких неисправностей, как отказ типа «ложное замыкание» контактов или кратковременное отсутствие питания в сети. Посредством минимизации функций возбуждения D-триггеров аналитическим методом и построения интегрированной таблицы состояний достигнуто сокращение числа логических элементов, что упрощает техническую реализацию устройства. Практическая ценность работы подтверждена возможностью воплощения метода в виде унифицированного интерфейсного модуля, что обеспечивает бесшовную интеграцию разработки в существующие линейки лифтового оборудования без кардинальной замены станции управления [14, 15].

Перспективы использования предложенного метода выходят далеко за пределы лифтового хозяйства. Алгоритмическая основа, базирующаяся на детекции

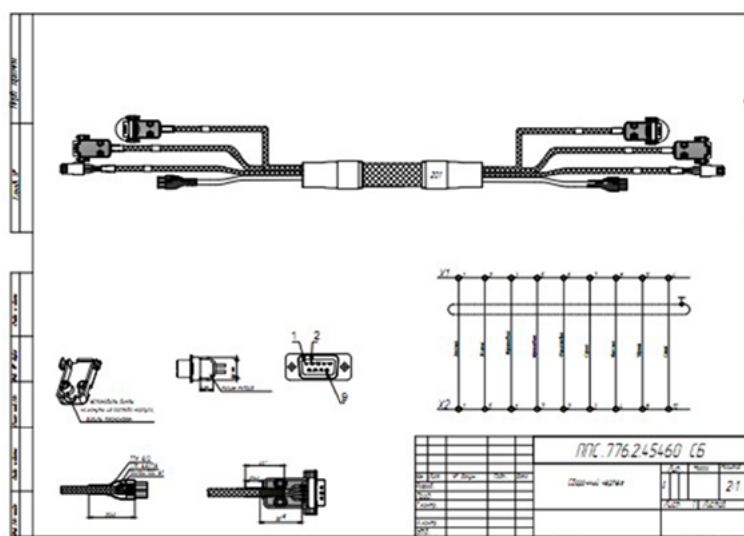


Рисунок 5. Сборочный чертеж проекта унифицированного интерфейсного модуля

Figure 5. Assembly drawing for the standardized interface module project

рассогласования временных интервалов (дельта следования) через D-триггеры, может быть адаптирована для систем мониторинга состояния промышленных релейно-контакторных схем, в частности в станкостроении и на конвейерных линиях. Кроме того, в контексте развития проектов «Умный дом» данный подход применим для повышения отказоустойчивости систем автоматического управления зданий (инженерное оборудование, вентиляция, насосные станции), где критически важна своевременная техническая диагностика исполнительных механизмов. Возможность программной имплементации полученных логических выражений в программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и контроллеры открывает путь к созданию универсальных модулей «умного опроса», востребованных в любой сфере, где требуется высокая надежность дискретного управления и оперативное устранение неисправностей без остановки технологического цикла.

Список литературы

1. Попов А. Г. Системы диспетчеризации: взгляд производителя и интегратора // Информатизация и системы управления в промышленности. 2017. № 4 (70). С. 41–45.
2. Баркалов А. А., Мальцева Р. В., Солдатов К. А. Оптимизация схемы автомата Мура, реализуемой в базе ПЛИС / Радиоэлектроника, информатика, управления, 2012. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-shemy-avtomata-mura-realizuemoy-v-bazise-plis/viewer>.
3. Barkalov A., Titarenko L., Mielcarek K., Chmielewski S. Logic Synthesis for FPDА-Based Control Units. Structural Decomposition in Logic Design. Springer Nature Link, 2020. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-38295-7>.
4. Борисенко Н. Технические аспекты построения управляющих автоматов при проектировании цифровых устройств на основе современных ПЛИС // Компоненты и технологии. 2011. № 12. С. 27–34. URL: <https://kit-e.ru/tehnicheskie-aspekty-postroeniya-upravlyayushhih-avtomatov-pri-proektirovaniicifrovyyh-ustrojstv-na-osnove-sovremennyh-plis>.
5. Луценко Е. В. Количественная мера информации Хартли как частный случай энтропийной меры информации Больцмана, мера Шеннона как применение меры Хартли для сложного сообщения и мера Харкевича как обобщение меры Хартли для неравновероятных событий // Научный журнал КубГАУ. 2023. № 185 (01). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kolichestvennaya-mera-informatsiihartli-kak-chastnyy-sluchay-entropiynoy-mery-informatsiiboltsmana-mera-shennona-kak-primenenie-mery-hartli-dlya-slozhnogo-soobsheniya-i-mera-harkevicha-kak-obobshenieme-mer-hartli-dlya-neravnoveryatnykh-sobytiy>
6. Тахаан О. Разработка корректирующих кодов для информационной защиты телекоммуникаций компьютерных сетей: дисс. ... канд. техн. наук. ВлГУ: Волгоград, 2012. 172 с.
7. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М.: Надежность, 2016. 546 с.

8. Единая система программной документации (ЕСПД). ГОСТ 19.701–90 Схемы Алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения.
9. Опе О. Теория графов. М.: Либроком, 2009. 352 с.
10. Klimovich A. S., Solov'ev V. V. (2011) A method for minimizing Moore finite-state machines by merging two states. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. Vol. 50, no. 6. Pp. 907–920. DOI: 10.1134/S1064230711040113.
11. Bedhouche L., Koalal M., Ayed A., Biskri I. (2023) Efficient Association Rules Minimization Using a Double-Stage Quine-McCluskey-Based Approach. *Proceedings of Communicational Collective Intelligence*, 15th International Conference, ICCCI 2023, Budapest, Hungary, September 27–29. Pp. 245–255. DOI: 10.1007/978-3-031-41456-5_19.
12. Кобер П. Особый подход: почему кастомизация техники стала ключевым трендом в машиностроении / Исследовательское подразделение медиахолдинга «Эксперт». Эксперт Урал, 2026. URL: <https://expert-ural.com/articles/osobiypodhodpochemu-kastomizaciya-tehniki-stalaklyuchevim-trendom-v-mashinostroenii.html>.
13. Бидвелл Д. 30 лет свободного ПО // Linux Format. 2015. № 12 (203). С. 44–47.
14. Kubica M., Kania D. and Kulisz J. (2019) A Technology Mapping of FSMs Based on a Graph of Excitations and Outputs. *IEEE Access*. Vol. 7. Pp. 16123–16131. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895206.
15. Al-Kodmany K. (2023) Smart Elevator Systems. *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research*. Vol. 6, no. 1. Pp. 41–54. DOI: 10.30564/jmmmr.v6i1.5503.
16. Geku D. (2025) Fault Detection and Diagnosis in Control Systems: Methods for detecting and diagnosing faults in control systems. *International Journal of Research (IJR)*. Pp. 531–548. DOI: 10.5281/ZENODO.15529493.
17. Chae H., Lee J.-E., Oh K.-Y. (2022) Fault Diagnosis of Elevator Doors Using Control State Information. *IEEE Access* PP (99). Pp. 1–9. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3141074.
18. Технологии разработки и отладки сложных технических систем // Сб. ст. VI Всероссийской научно-практической конференции / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента». Москва, 27–28 марта 2019 г. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. 242 с.

References

1. Popov A. G. (2017) 'Dispatching systems: a manufacturer's and integrator's view', *Informatization and Control Systems in Industry*, vol. 70, no. 4, pp. 41–45.
2. Barkalov A. A., Malcheva R. V. and Soldatov K. A. (2012) 'Optimization of the Moore automaton scheme implemented in the FPGA basis', *Radioelectronics, Informatics, Management*, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-shemy-avtomata-mura-realizuemoy-v-bazise-plis/viewer>.
3. Barkalov A., Titarenko L., Mielcarek K. and Chmielewski S. (2020) Logic Synthesis for FPDА-Based Control



- Units. Structural Decomposition in Logic Design. Springer Nature Link. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-38295-7>.
4. Borisenko N. (2011) 'Technical aspects of constructing control automata in the design of digital devices based on modern FPGAs', *Components and Technologies*, no. 12, pp. 27–34. Available at: <https://kit-e.ru/tehnicheskie-aspekty-postroeniya-upravlyayushhih-avtomatov-pri-proektirovanii-czi-frovyh-ustroystv-na-osnove-sovremennyh-plis>.
 5. Lutsenko E. V. (2023) 'Hartley quantitative measure of information as a special case of Boltzmann's entropy measure of information, Shannon's measure as an application of Hartley's measure for complex messages, and Kharkevich's measure as a generalisation of Hartley's measure for unequal probability events', *Scientific Journal of KubSAU*, vol. 185, no. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kolichestvennaya-mera-informatsii-hartli-kak-chastnyy-slychay-entropiynoy-mery-informatsii-boltsmana-mera-shennona-kak-primenenie/viewer>.
 6. Takhaan O. (2012) Development of correcting codes for information protection of telecommunications in computer networks. PhD thesis. Vladimir State University (VIGU), Volgograd.
 7. Shubinsky I. B. (2016) Reliable fault-tolerant information systems. Synthesis methods. Moscow: Nadezhnost.
 8. GOST 19.701–90 (1990) Unified System for Program Documentation (USPD). Diagrams of algorithms, programs, data and systems. Conventions and execution rules.
 9. Ore O. (2009) Graph Theory. Moscow: Librokom.
 10. Klimovich A. S. and Solov'ev V. V. (2011) 'A method for minimizing Moore finite-state machines by merging two states', *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 50 (6), pp. 907–920. DOI: 10.1134/S1064230711040113.
 11. Bedhouche L., Koalal M., Ayed A. and Biskri I. (2023) 'Efficient Association Rules Minimization Using a Double-Stage Quine-McCluskey-Based Approach', in Proceedings of Communicational Collective Intelligence, 15th International Conference, ICCCI 2023, Budapest, Hungary, September 27–29, pp. 245–255, DOI: 10.1007/978-3-031-41456-5_19.
 12. Kober P. (2026) 'A special approach: why customisation of equipment has become a key trend in mechanical engineering', *Expert Ural (Research division of the Expert media holding)*. Available at: <https://expert-ural.com/articles/osobiy-podhod-pochemu-kustomizaciya-tehniki-stala-klyuchevim-trendom-v-mashinostroenii.html>.
 13. Bidwell D. (2015) '30 years of free software', *Linux Format*, 12 (203), pp. 44–47.
 14. Kubica M., Kania D. and Kulisz J. (2019) 'A Technology Mapping of FSMs Based on a Graph of Excitations and Outputs', *IEEE Access*, 7, pp. 16123–16131. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2895206.
 15. Al-Kodmany K. (2023) 'Smart Elevator Systems', *Journal of Mechanical Materials and Mechanics Research*, vol. 6, no. 1, pp. 41–54. DOI: 10.30564/jmmmr.v6i1.5503.
 16. Geku D. (2025) 'Fault Detection and Diagnosis in Control Systems: Methods for detecting and diagnosing faults in control systems', *International Journal of Research (IJR)*, pp. 531–548. DOI: 10.5281/ZENODO.15529493.
 17. Chae H., Lee J.-E. and Oh K.-Y. (2022) 'Fault Diagnosis of Elevator Doors Using Control State Information', *IEEE Access*, 99, pp. 1–9. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3141074.
 18. Technologies for development and debugging of complex technical system. Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference, Moscow, 27–28 March 2019. Moscow State Technical University named after N. E. Bauman & Exponent Centre for Engineering Technologies and Modelling. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Press.

Информация об авторе

Дронов Владимир Олегович, студент, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, Россия;

а также инженер в ООО «ЦЭПукс», Санкт-Петербург, Поэтический бульвар, д. 2; ORCID: 0009-0002-4177-3651, e-mail: vvvvdr@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 and engineer at LLC «CEPIKS», St. Petersburg, Poeticheskoy Boulevard, 2; ORCID: 0009-0002-4177-3651, e-mail: vvvvdr@mail.ru.

Корректировки

В предыдущем выпуске журнала (01) 2026 редакцией были утверждены корректировки по просьбе авторов статей. На стр. 43–46 был добавлен еще один автор; исправлена фактическая ошибка в сведениях о предприятии «Светогорский ЦБК». Приносим свои извинения читателям; в электронной версии произведена коррекция: из статьи изъят «Кейс» о предприятии. Основной смысл статьи и выводы авторов достоверны. На стр. 58 откорректировано имя автора: Виктор Александрович Марков.



Научный журнал ВШТЭ СПбГУПТД

«ТЕХНОЛОГИЯ И ЭНЕРГЕТИКА»

приглашает ученых, аспирантов и специалистов!

Для публикации принимаются оригинальные научные статьи, обзорные статьи, тематически соответствующие рубрикам:

Технология: 4.3.4 Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины;
2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий;
2.6.10 Технология органических веществ

Энергетика: 2.4.1 Теоретическая и прикладная электротехника;
2.4.2 Электротехнические комплексы и системы;
2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника

- Журнал в «Белом списке» RSCI
- Публикация безвозмездная
- Полнотекстовая версия в свободном доступе в eLIBRARY.ru
- Статьям присваивается DOI
- Индексация в РИНЦ
- Двойное анонимное рецензирование



Требования к оформлению и содержанию (см. QR-код)

Подробнее на сайте: <https://journalbcc.ru>

E-mail редакции: journal.bcc@sutd.ru