

МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2072-0297

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



16+

21 2026
ЧАСТЬ I

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 21 (624) / 2026

Издается с декабря 2008 г.

Выходит еженедельно

Главный редактор: Ахметов Ильдар Геннадьевич, кандидат технических наук

Редакционная коллегия:

Жураев Хусниддин Олтинбоевич, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Иванова Юлия Валентиновна, доктор философских наук
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук
Лактионов Константин Станиславович, доктор биологических наук
Сараева Надежда Михайловна, доктор психологических наук
Абдрасилов Турганбай Курманбаевич, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Авдеюк Оксана Алексеевна, кандидат технических наук
Айдаров Оразхан Турсункожаевич, кандидат географических наук (Казахстан)
Алиева Тарана Ибрагим кызы, кандидат химических наук (Азербайджан)
Ахметова Валерия Валерьевна, кандидат медицинских наук
Бердиев Эргаш Абдуллаевич, кандидат медицинских наук (Узбекистан)
Брезгин Вячеслав Сергеевич, кандидат экономических наук
Данилов Олег Евгеньевич, кандидат педагогических наук
Дёмин Александр Викторович, кандидат биологических наук
Дядюн Кристина Владимировна, кандидат юридических наук
Желнова Кристина Владимировна, кандидат экономических наук
Жуйкова Тамара Павловна, кандидат педагогических наук
Игнатова Мария Александровна, кандидат искусствоведения
Искаков Руслан Маратбекович, кандидат технических наук (Казахстан)
Калдыбай Кайнар Калдыбайулы, доктор философии (PhD) по философским наукам (Казахстан)
Кенесов Асхат Алмасович, кандидат политических наук
Коварда Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук
Комогорцев Максим Геннадьевич, кандидат технических наук
Котляров Алексей Васильевич, кандидат геолого-минералогических наук
Кузьмина Виолетта Михайловна, кандидат исторических наук, кандидат психологических наук
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Кучерявенко Светлана Алексеевна, кандидат экономических наук
Лескова Екатерина Викторовна, кандидат физико-математических наук
Макеева Ирина Александровна, кандидат педагогических наук
Матвиенко Евгений Владимирович, кандидат биологических наук
Матроскина Татьяна Викторовна, кандидат экономических наук
Матусевич Марина Степановна, кандидат педагогических наук
Мусаева Ума Алиевна, кандидат технических наук
Насимов Мурат Орленбаевич, кандидат политических наук (Казахстан)
Паридинова Ботагоз Жаппаровна, магистр философии (Казахстан)
Прончев Геннадий Борисович, кандидат физико-математических наук
Рахмонов Азизхон Боситхонович, доктор педагогических наук (Узбекистан)
Семахин Андрей Михайлович, кандидат технических наук
Сенцов Аркадий Эдуардович, кандидат политических наук
Сенюшкин Николай Сергеевич, кандидат технических наук
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Титова Елена Ивановна, кандидат педагогических наук
Ткаченко Ирина Георгиевна, кандидат филологических наук
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры
Фозилов Садриддин Файзуллаевич, кандидат химических наук (Узбекистан)
Яхина Асия Сергеевна, кандидат технических наук
Ячинова Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук

Международный редакционный совет:

Айрян Заруи Геворковна, кандидат филологических наук, доцент (Армения)
Арошидзе Паата Леонидович, доктор экономических наук, ассоциированный профессор (Грузия)
Атаев Загир Вагитович, кандидат географических наук, профессор (Россия)
Ахмеденов Кажмурат Максutowич, кандидат географических наук, ассоциированный профессор (Казахстан)
Бидова Бэла Бертовна, доктор юридических наук, доцент (Россия)
Борисов Вячеслав Викторович, доктор педагогических наук, профессор (Украина)
Буриев Хасан Чутбаевич, доктор биологических наук, профессор (Узбекистан)
Велковска Гена Цветкова, доктор экономических наук, доцент (Болгария)
Гайич Тамара, доктор экономических наук (Сербия)
Данатаров Агахан, кандидат технических наук (Туркменистан)
Данилов Александр Максимович, доктор технических наук, профессор (Россия)
Демидов Алексей Александрович, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Досманбетов Динар Бакбергенович, доктор философии (PhD), проректор по развитию и экономическим вопросам (Казахстан)
Ешиев Абдыракман Молдоалиевич, доктор медицинских наук, доцент, зав. отделением (Кыргызстан)
Жолдошев Сапарбай Тезекбаевич, доктор медицинских наук, профессор (Кыргызстан)
Игисинов Нурбек Сагинбекович, доктор медицинских наук, профессор (Казахстан)
Кадыров Кутлуг-Бек Бекмурадович, доктор педагогических наук, и.о. профессора, декан (Узбекистан)
Каленский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Козырева Ольга Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Россия)
Колпак Евгений Петрович, доктор физико-математических наук, профессор (Россия)
Кошербаева Айгерим Нуралиевна, доктор педагогических наук, профессор (Казахстан)
Курпаяниди Константин Иванович, доктор философии (PhD) по экономическим наукам (Узбекистан)
Куташов Вячеслав Анатольевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Кыят Эмине Лейла, доктор экономических наук (Турция)
Лю Цзюань, доктор филологических наук, профессор (Китай)
Малес Людмила Владимировна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Нагервадзе Марина Алиевна, доктор биологических наук, профессор (Грузия)
Нурмамедли Фазиль Алигусейн оглы, кандидат геолого-минералогических наук (Азербайджан)
Прокопьев Николай Яковлевич, доктор медицинских наук, профессор (Россия)
Прокофьева Марина Анатольевна, кандидат педагогических наук, доцент (Казахстан)
Рахматуллин Рафаэль Юсупович, доктор философских наук, профессор (Россия)
Ребезов Максим Борисович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Россия)
Сорока Юлия Георгиевна, доктор социологических наук, доцент (Украина)
Султанова Дилшода Намозовна, доктор архитектурных наук (Узбекистан)
Узаков Гулом Норбоевич, доктор технических наук, доцент (Узбекистан)
Федорова Мария Сергеевна, кандидат архитектуры (Россия)
Хоналиев Назарали Хоналиевич, доктор экономических наук, старший научный сотрудник (Таджикистан)
Хоссейни Амир, доктор филологических наук (Иран)
Шарипов Аскар Калиевич, доктор экономических наук, доцент (Казахстан)
Шуклина Зинаида Николаевна, доктор экономических наук (Россия)

На обложке изображен *Грегори Хаус* (1959), главный герой американского телесериала «Доктор Хаус», роль которого исполняет британский актер Хью Лори.

Доктор Грегори Хаус — циничный и язвительный тип, который терпеть не может общаться с пациентами, старательно «косит» от работы и говорит гадости. При этом он лучший диагност в больнице, к нему обращаются в сложных и непонятных случаях. Работает Хаус с командой врачей, которых подбирает, руководствуясь своеобразными критериями. Доктора Формана, афроамериканца, Хаус нанял за юношескую судимость, которую посчитал признаком готовности к действию, Кэмерон — за внешнюю красоту, а Чейза — потому что Хаусу позволили и попросили об этом.

Образ Хауса создатели сериала выстроили на ассоциациях с Шерлоком Холмсом. Даже фамилия героя — Хаус (от house — дом) вызывает прямые ассоциации с фамилией Холмс (Holmes звучит как «хоумс», «дома» по-английски). Как и у великого сыщика, у Хауса есть верный друг и спутник доктор Уилсон, чья фамилия также наводит на ассоциации с Ватсоном. Даже адреса, где живут герои, совпадают почти полностью. Знаменитый дом Шерлока Холмса находится в Лондоне, на Бейкер-стрит, 221Б. Доктор Хаус тоже живет на Бейкер-стрит, 221, квартира Б, но в Принстоне, штат Нью-Джерси. Больше того, Хаус и доктор Уилсон занимают одну квартиру и живут в соседних комнатах, как Холмс и доктор Ватсон.

Сходство с Холмсом этим не ограничивается. Герой Конан Дойля употребляет наркотики внутривенно, когда мучается скукой из-за длительного отсутствия работы. Хаус «сидит» на обезболивающем, в состав которого входит опиат. Доктор Хаус принимает этот препарат вынужденно, а не из прихоти. Как и Холмс, доктор использует дедуктивный метод и элементы расследования, чтобы поставить диагноз. Коллеги доктора обыскивают дома пациентов в поисках улик, как если бы это было местом преступления, а сам Хаус интересуется только экстраординарными, сложными медицинскими случаями и часто впадает в скуку из-за простой и рутинной работы.

Холмс играл на скрипке, Хаус же играет на фортепиано, гитаре и губной гармошке. Он так же, как и знаменитый детектив, бесцеремонно относится к людям. Часто доктор не только ставит диагнозы, используя дедуктивный метод, но и выдает нечто о личной жизни и обстоятельствах больного. К примеру, сообщает человеку, что тому изменяет жена.

В жизни Хауса промелькнул и Мориарти. Человек с такой фамилией стрелял в доктора в заключительном эпизоде второго сезона. А в одиннадцатом эпизоде пятого сезона друг Хауса, доктор Уилсон, рассказывает байку (выдуманную) о некой Ирен Адлер, в которую Хаус якобы был влюблен, а та бросила доктора.

Хаус страдает из-за своей хромоты и ходит с тростью. Это не мешает герою отпускать злые шуточки в адрес других «калек». Герой постоянно пытается избежать

встречи с пациентами, старается провести день в кабинете и улизнуть из больницы, как только рабочий день заканчивается. При этом Хаус — отличный специалист, который готов рисковать и принимать ответственность, когда берется лечить сложные случаи. Герой начинает лечение часто на ходу, не дожидаясь дополнительного подтверждения предварительно поставленного диагноза (на это обычно нет времени).

Хаус избегает надевать медицинский халат, чтобы пациенты не идентифицировали его как врача и не набросились с просьбами о консультации. При этом ему вовсе не безразлична судьба пациентов.

Внешне доктор Хаус выглядит как стареющий мужчина: худой, длинный, «помятый» и небрежный в одежде. Герой любит листать журналы, смотреть медицинские сериалы по телевизору, но когда доходит до дела, Хаус незаменим. Несмотря на хромоту и нелюбовь к работе, герой легко приезжает в клинику ночью, когда в этом действительно есть необходимость. Коллеги Хауса относятся к нему с большим уважением. Директор клиники в беседе с недовольным пациентом открыто называет Хауса мерзавцем, но не может его уволить, потому что этот «мерзавец» — лучший врач в клинике.

Грегори Хаус — блестящий диагност, чьи знания охватывают нефрологию, инфекционные болезни, онкологию, ревматологию и генетику. Его база знаний не ограничивается учебниками: он использует свои познания в физике, химии, истории и токсикологии, мастерски выстраивая логические цепочки.

Хаус совмещает глубокие академические знания с выдающимися практическими навыками.

Он имеет две официальные специализации: инфекционные болезни и нефрология, виртуозно применяет знания из смежных областей, выявляя редкие аутоиммунные патологии, генетические аномалии (например, синдром Элерса — Данлоса) и последствия токсических воздействий.

Самая известная цитата из сериала: «Все врут». Доктор Хаус игнорирует слова пациентов, обращая внимание на каждую деталь их быта, истории болезни и генетики. В сериале Хаус мастерски проводит мозговые штурмы с командой, отсекая неверные гипотезы и проверяя нестандартные патогенетические механизмы.

Несмотря на кинодопущения, когда редкие диагнозы следуют один за другим, образ Хауса стал культовым благодаря его глубокому погружению в суть биологических процессов. Он превращает поиск диагноза в настоящее научное расследование. В реальной медицине его подход часто служит образцом нестандартного мышления, а иногда реальные врачи используют его метод для спасения тяжелых пациентов.

*Информацию собрала ответственный редактор
Екатерина Осянина*

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Айдагулов Р. А.

Прогнозирование свойств продуктов
процесса парового риформинга с помощью
технологии искусственного интеллекта 1

Буняев В. А.

Надёжность и диагностика систем
электропривода: предотвращение аварий
и продление срока службы 7

Гумеров А. А.

Результаты промысловой апробации
методики выявления мест отложений
в газопроводах по данным
дифференциального давления 16

Ерёмин Н. Р.

Возможные способы интенсификации
работы подземных водозаборов 21

Крохмаль С. С., Бахарев А. А.

Электрофизические методы мониторинга
асфальтобетонных дорожных покрытий 23

Лукин А. А.

Оценка образования микропластика
при механическом воздействии
на пластиковые бутылки и контейнеры:
модель индекса микропластика
и экспериментальное исследование 31

Лукин А. А.

Микропластик в плодоовощной продукции:
источники, уровни и пути загрязнения 37

Мухьянова И. Д.

Моделирование ключевого технологического
оборудования для повышения селективности
процесса выделения пропилена 41

Орехова М. А.

Измерение параметров шероховатости
и факторы, влияющие на погрешность 42

Петров Н. Е.

Разработка интеллектуальной системы учета
электроэнергии 45

Преловская А. А.

Внутренний метрологический надзор
в нефтепереработке: особенности контроля
измерительных комплексов с сужающими
устройствами, счетчиков-расходомеров
массовых и стальных резервуаров 47

Сидякин И. В.

Использование приближенных чисел
при определении метрологических
характеристик спутниковой навигационной
аппаратуры потребителей 50

Слободчиков А. А.

Обзор применения искусственного
интеллекта для автоматизации сборки
и юстировки оптико-электронных приборов 59

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

Дробченко Н. В., Кулдашев Ш. Д., Вахидова Л. Р.

Фронт исторического и современного
города как объект ландшафтно-
градостроительного проектирования
(на примере Самарканда) 61

Красиков В. Р.

Сравнительный анализ рулонных
и монолитных кровельных систем для
плоских неэксплуатируемых крыш 64

Красиков А. Р.

Инновационные тенденции развития
крепёжных систем вентилируемых фасадов 66

Лутай М. А.

Инженерные сооружения Кавказа: дороги,
мосты, крепости — от древности до СССР 68

Торопова К. П.

Проектирование дорожной одежды
с учетом расчета на колебание
в Ставропольском крае 69

ГЕОЛОГИЯ

Акчурин Н. Н.

Нефтеносность Среднеботуобинского
месторождения.....72

Хурамшина М. Р.

Применение технологии DDS для устройства
свай в слабых водонасыщенных грунтах.....74

Шадин А. Е.

Корреляция динамики активности Со-60
в грунтовых водах зоны влияния утечки
радионуклидов из хранилища ХЖО-2
Нововоронежской АЭС с гидрометрическими
параметрами76

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Прогнозирование свойств продуктов процесса парового риформинга с помощью технологии искусственного интеллекта

Айдагулов Радик Айратович, аспирант
Уфимский государственный нефтяной технический университет

В современном химическом производстве паровой риформинг — ключевой метод получения синтез-газа, превосходящий аналоги по эффективности и экономической доступности. Перспективным направлением оптимизации этого процесса является интеграция искусственного интеллекта. Использование искусственного интеллекта на базе физико-химических закономерностей ускоряет разработку новых катализаторов и оборудования, что подтверждается существующими отечественными и зарубежными проектами.

В данной работе представлен алгоритм создания нейросетевой модели для прогнозирования состава и свойств продуктов парового риформинга, а также оценки эффективности процесса в зависимости от типа катализатора. В основу модели заложены математические зависимости, полученные из открытых верифицированных источников.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, паровой риформинг, математическое моделирование, прогнозирование технологических процессов.

В современном мире процесс парового риформинга является основополагающим процессом получения синтез-газа, занимающий на данный момент более 60 % рынка, что составляет более 100 млн. тонн в год [1]. Однако, не смотря на востребованность и изученность технологии, она до сих пор имеет ряд недостатков, связанные с неполнотой конверсии метана, составляющей около 75 %, значительным выделением CO_2 в атмосферу, что соотносит получаемый водород в категорию «серый» по шкале экологической чистоты водорода. Данные недостатки непосредственно влияют на эффективность процесса, поэтому их устранение имеет высокий приоритет в рамках развития водородсодержащих технологий, имеющих высокую востребованность в транспортном и энергетическом секторах [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Одним из перспективных путей решения данных задач может являться внедрение алгоритмов машинного обучения и интегрирование искусственного интеллекта в решении вопросов оптимизации и эффективности процесса [7].

Искусственный интеллект (ИИ) сегодня стал неотъемлемой частью, как в повседневной жизни, так и в промышленных рабочих процессах. ИИ применяется как инструмент для обработки больших массивов данных, позволяющих не только оптимизировать процессы, но и прогнозировать те или иные события, повышающих как эффективность, так и безопасность уже существующих процессов. Наиболее перспективным способом использования ИИ является изучение методов оптимизации

технологий и разработка новых подходов к ведению технологических процессов с целью повышения эффективности или расширения возможностей процесса [7], [8], [9]. Данная технология уже находит практическое применение в задачах предсказания состава продуктов химических реакций и оптимизации компонентного состава катализаторов [10], [11]. Такие работы могут проходить по заранее созданным базам данных, таких компаний, как, к примеру, Open Reaction Database [12], доступ к которым можно получить только с помощью персонализированного API ключа [13]. Такие базы данных позволяют получать доступ к актуальной и верифицированной информации по различным химическим компонентам (включая их физические и термодинамические параметры), а также по технологическим процессам, в частности, условиям их проведения [12]. При отсутствии доступа к подобным цифровым платформам исследователь вынужден собирать собственные массивы сведений посредством проведения серии экспериментов или анализа открытых источников, однако такой путь заведомо более трудоемок и времязатратен.

Данная работа посвящена созданию нейронной сети, способной предсказывать продукты процесса парового риформинга и их физические и термодинамические свойства в зависимости от выбранного катализатора. В работе использовались данные из открытых источников, текстовый редактор Visual Studio Code, язык программирования Python с использованием таких библиотек, как numpy для работы

с таблицами и создания массивов, `scipy` для различных вычислений в рамках машинного обучения и обучения нейронной сети, `pyplot` для визуализации расчетов и обучения. Для создания и обучения нейронной сети мы использовали `skikit-learn` из-за своей простоты и эффективности в рамках предиктивного анализа данных. Для удобного представления множества прогнозов нейронной сети в зависимости от условия проведения процесса была использована библиотека `ipywidgets`.

Для процесса парового риформинга в настоящее время оптимальными условиями проведения процесса являются диапазоны температур от 700 до 1000 °C и давления от 1,5 до 3,5 МПа в присутствии никелевых катализаторов на подложке из α -оксида алюминия с добавлением таких промоторов, как оксид калия, оксид кальция, оксид магния или диоксид церия [12], [13], [14].

Скорости химической реакции в таком случае принимают следующий вид:

$$R_1 = \frac{k_1}{p_{H_2}^{2,5}} \left(p_{CH_4} \cdot p_{H_2O} - \frac{p_{H_2}^3 \cdot p_{CO_2}}{K_I} \right) \cdot \left(\frac{1}{\Omega^2} \right)$$

$$R_2 = \frac{k_3}{p_{H_2}} \left(p_{CO} \cdot p_{H_2O} - \frac{p_{H_2} \cdot p_{CO_2}}{K_{II}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\Omega^2} \right)$$

$$R_3 = \frac{k_3}{p_{H_2}^{3,5}} \left(p_{CH_4} \cdot p_{H_2O}^2 - \frac{p_{H_2}^4 \cdot p_{CO_2}}{K_{III}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\Omega^2} \right)$$

$$\text{где } \Omega = 1 + K_{CO} \cdot p_{CO} \cdot K_{H_2} \cdot p_{H_2} + K_{CH_4} \cdot p_{CH_4} + K_{H_2O} \cdot \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}};$$

$$K_I = \exp \left(\frac{-26830}{T_S} + 30,114 \right);$$

$$K_{II} = \exp \left(\frac{4400}{T_S} - 4,036 \right);$$

$$K_{III} = K_I \cdot K_{II};$$

$$k_j = k_{0j} \cdot \exp \left(\frac{-E_j}{R_g T} \right);$$

$$K_i = K_{0i} \cdot \exp \left(\frac{-\Delta H_i}{R_g T} \right);$$

ΔH_i — теплота адсорбции i -о компонента;

k_j — кинетическая константа скорости реакции j ;

k_{0j} — Температурно-зависимая кинетическая константа скорости реакции j ;

K_i — Константа адсорбции i -о компонента;

K_{0i} — Эталонная константа адсорбции i -о вещества;

p_i — Парциальное давление i -о вещества, бар.

Для начального обучения нейронной сети, представим по ранее описанным уравнениям математическую модель получения продуктов выполним расчет при 850 °C и 2,0 МПа. Полученные результаты представлены на рисунках 1 и 2.

Для более реалистичного моделирования процесса и его продуктов, необходимо также добавить возможность прогнозирования свойств компонентов смеси и продукта реакции согласно выбранной системе термодинамических уравнений. С учетом упомянутых условий процесса, были выбраны уравнения Пенга-Робинсона, которые позволят рассчитывать плотность, коэффициент сжимаемости, энтропию, энтальпию и энергию Гиббса продуктов реакции согласно следующим уравнениям [15]:

$$Z^3 - (1 - b) \cdot Z^2 + (A - 3 \cdot B^2 - 2 \cdot B) \cdot Z - (A \cdot B - B^2 - B^3) = 0$$

$$\text{где } A = \frac{a \cdot a(T) \cdot P}{R^2 \cdot T^2};$$

$$b = 0,07780 \cdot \frac{R \cdot T_c}{P_c};$$

$$a = 0,45724 \cdot \frac{R^2 \cdot T_c^2}{P_c};$$

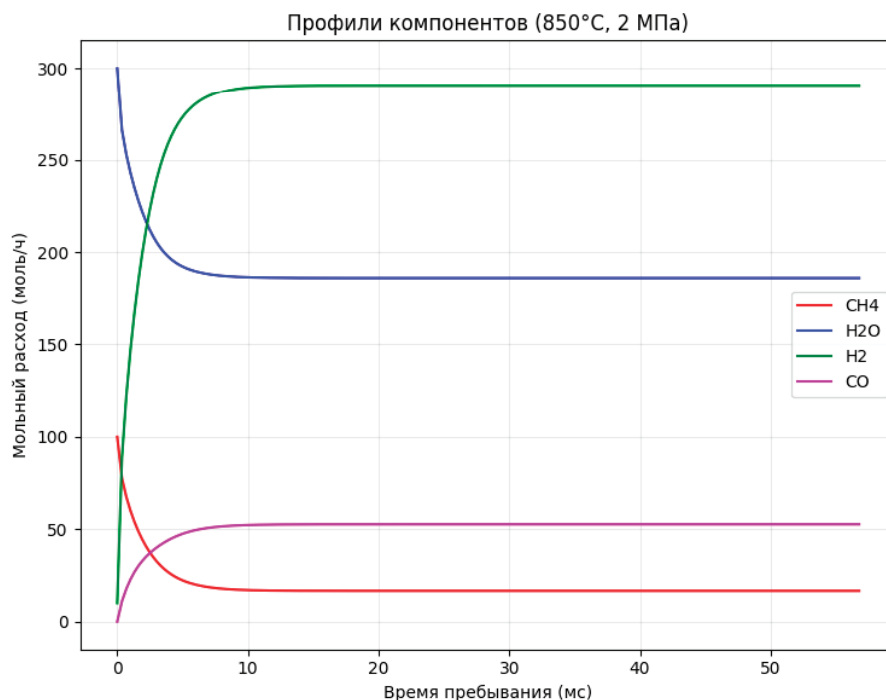


Рис. 1. Расчет процесса парового риформинга при 850 °C и 2,0 МПа

$$a(T) = \left[1 + m \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right]^2;$$

$$m = 0,37464 + 1,54226 \cdot \omega - 0,26992 \cdot \omega^2;$$

T_c и P_c — критические температура и давления, типичные значения которых представлены в таблице 1 для используемых в процессе компонентов;

ω — ацентрический фактор, типичные значения которого представлены в таблице 1 для используемых в процессе компонентов.

Таблица 1. Стандартные данные для компонентов по [16]

Компонент	T_c , К	P_c , бар	ω
H ₂	33,15	12,96	-0,216
CH ₄	190,56	45,99	0,011
CO	132,85	34,94	0,049
CO ₂	304,13	73,77	0,224
H ₂ O	647,10	220,55	0,344

Массовая плотность компонентов и смесей вычисляются по следующему уравнению:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{Z \cdot R \cdot T}$$

Энтальпия вычисляется по следующей формуле:

$$H(T, P) = H^{ig}(T) + \Delta H^{res}$$

$$\text{где } \Delta H^{res} = R \cdot T \cdot (Z - 1) + \frac{T \cdot \frac{da}{dT} - a}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot b} \cdot \ln \left(\frac{Z + (1 + \sqrt{2}) \cdot B}{Z + (1 - \sqrt{2}) \cdot B} \right) \text{ — это энтальпия отклонения;}$$

Z, B, b — параметра из уравнения состояния;

$\frac{da}{dT}$ — производная параметра притяжения по температуре, которая вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{da}{dT} = -\frac{0,45724 \cdot R^2 T_c^2}{P_c} \cdot \frac{m}{\sqrt{T \cdot T_c}} \cdot a^{0,5}$$

Энтропия вычисляется по следующей формуле:

$$S(T, P) = S^{ig}(T, P) + \Delta S^{res}$$

$$\text{где } \Delta S^{res} = R \cdot \ln(Z - B) + \frac{\frac{da}{dT}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot b} \cdot \ln \left(\frac{Z + (1 + \sqrt{2}) \cdot B}{Z + (1 - \sqrt{2}) \cdot B} \right) - \text{это остаточная энтропия.}$$

Полная молярная энергия Гиббса рассчитывается по следующей формуле:

$$G(T, P) = G^{ig}(T, P) + \Delta G^{res}$$

где $\Delta G^{res} = R \cdot T \cdot \ln(\varphi)$ — это остаточная энергия Гиббса;

$$\ln(\varphi) = (Z - 1) - \ln(Z - B) - \frac{A}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot B} \cdot \ln \left(\frac{Z + (1 + \sqrt{2}) \cdot B}{Z + (1 - \sqrt{2}) \cdot B} \right).$$

В рамках работы также была реализована возможность прогнозирования свойств и продуктов реакции в зависимости от выбранного катализатора, от выбора которого, на данный момент, учитывается только фактор эффективности конверсии метана.

В целях распределения нагрузки расчетов, было принято решение создать две нейросетевые модели, первая из которых прогнозирует продукты реакции с учетом выбранных параметров процесса, вторая на основе результатов первой будет предсказывать свойства компонентов и продуктов реакции.

Архитектура нейросетевой модели создана из слоев по типу Linear и ReLU. Графическая визуализация архитектуры модели представим на рисунке 2.

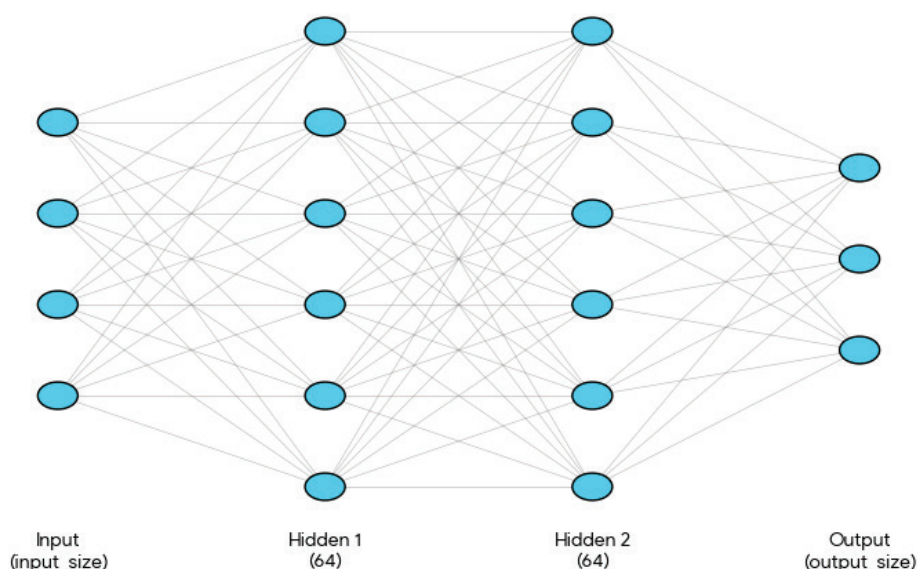


Рис. 2. Графическое представление архитектуры нейросетевой модели

В рамках работы было создано 20500 образцов симуляции, в которых учитывались условия процесса, такие как температура, давление, состав продукта. На основе созданной базы данных было выполнено суммарно более 800 эпох обучения. К примеру, на рисунке 3 представим карту %MAPE прогнозирования %конверсии метана в зависимости от давления и температуры.

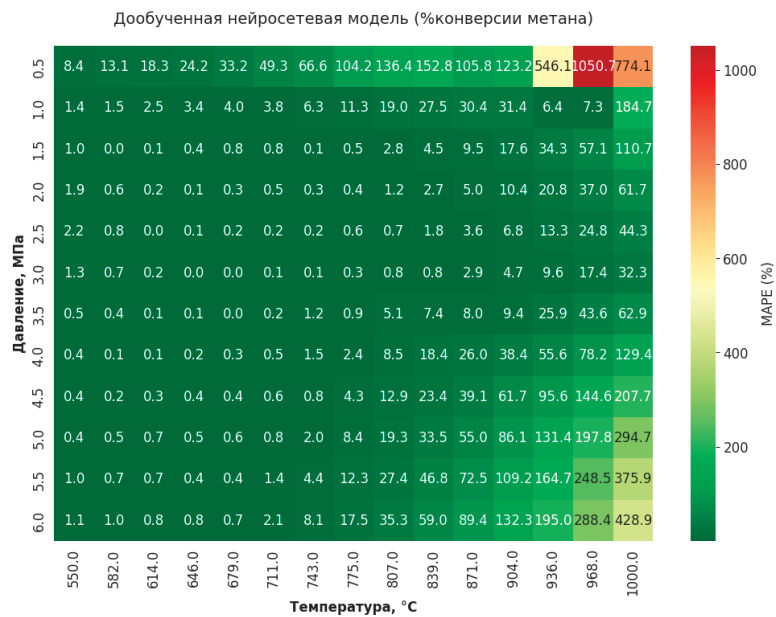


Рис. 3. Тепловая карта %MAPE %конверсии метана в зависимости от температуры и давления

Полученные результаты показывают, что наибольшие значения погрешности MAPE наблюдаются при граничных условиях, где протекание целевого процесса парового риформинга термодинамически затруднено. Это указывает на наложение побочных реакций (в частности, коксообразования) на основной процесс. Для снижения погрешности MAPE необходимо расширить обучающую выборку новой информацией, а также интегрировать в алгоритм искусственного интеллекта систему уравнений, описывающих кинетику побочных реакций. В таком случае разработанная модель перестанет ограничиваться рамками одного базового сценария и начнет учитывать условия, при которых превалируют побочные процессы. Реализация данного подхода позволит более глубоко изучить методы повышения как эффективности, так и безопасности технологического процесса.

На данный момент, созданная нами нейросетевая модель способна предсказывать продукты реакции, их физические и термодинамические свойства с учетом выбранного катализатора. Приведем на рисунках 4 и 5 примеры вывода результатов проведенного расчета при различных условиях проведения процесса.

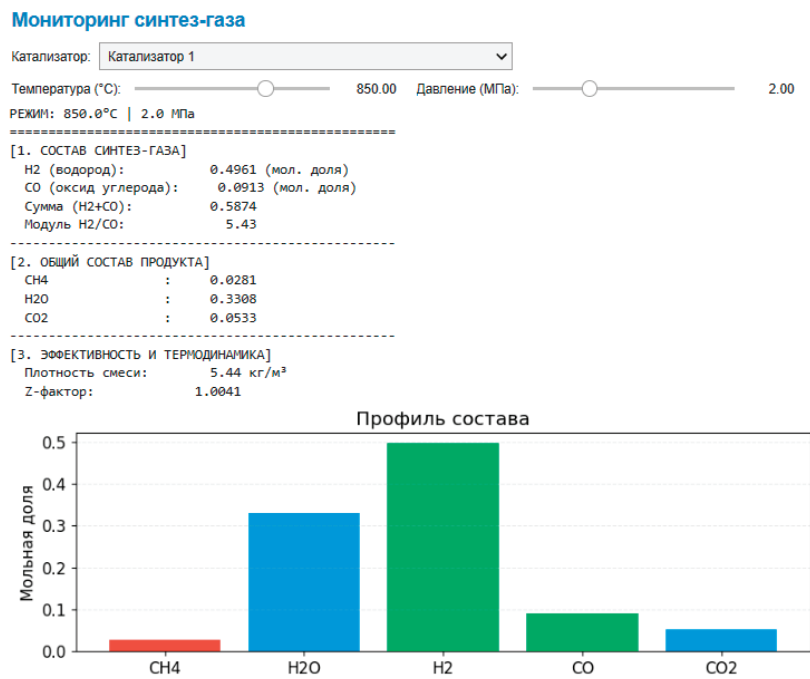


Рис. 4. Первый пример результатов прогнозирования нейронных сетей

Мониторинг синтез-газа

Катализатор: Катализатор 2

Температура (°C): 900.00

Давление (МПа): 1.50

РЕЖИМ: 900.0°C | 1.5 МПа

=====

[1. СОСТАВ СИНТЕЗ-ГАЗА]

H2 (водород): 0.5378 (мол. доля)

CO (оксид углерода): 0.1132 (мол. доля)

Сумма (H2+CO): 0.6509

Модуль H2/CO: 4.75

[2. ОБЩИЙ СОСТАВ ПРОДУКТА]

CH4 : 0.0045

H2O : 0.3035

CO2 : 0.0479

[3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТЕРМОДИНАМИКА]

Плотность смеси: 4.95 кг/м³

Z-фактор: 1.0037

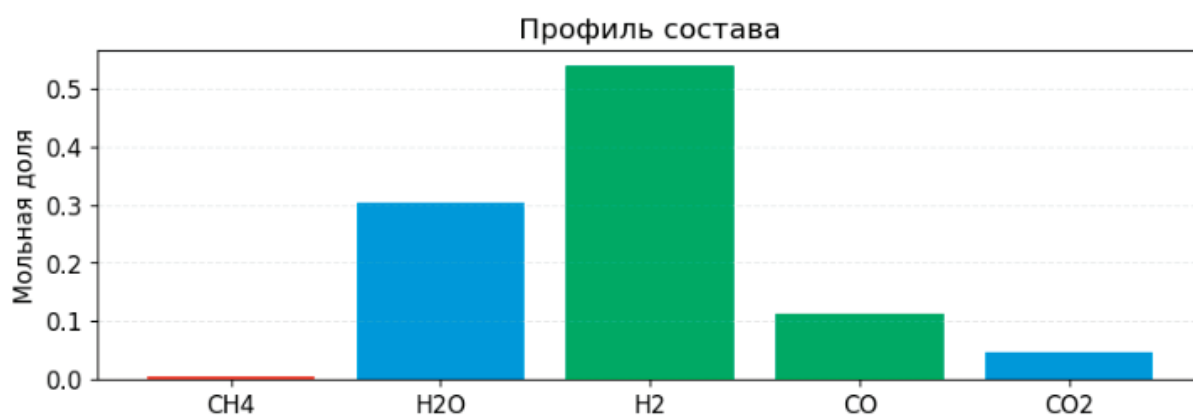


Рис. 5. Второй пример результатов прогнозирования нейронных сетей

Таким образом появляется возможность анализировать и представлять полученные результаты прогнозирования искусственного интеллекта в реальном времени с помощью слайдеров в удобном для пользователя формате.

Вывод

В данной работе был представлен процесс реализации нейросетевой модели, способной предсказывать продукты реакции парового риформинга с учетом температуры, давления и выбранного катализатора. На данный момент, ИИ способен прогнозировать продукты реакции, %конверсии метана, их физические и термодинамические свойства. В дальнейшем предполагается учет в прогнозе продуктов реакции в зависимости от выбранного активного вещества и формы катализатора. Также рассматривается внедрение систем математических уравнений, рассчитывающих скорости побочных реакций и определение возможного перекрытия основной химической реакции.

Литература:

1. Министерская конференция по чистой энергии, Глобальный обзор по водороду — 2025 [Электронный ресурс] — URL: <https://www.cleanenergyministerial.org/resource/global-hydrogen-review-2025> (Дата обращения 20.05.2026).
2. Классификация водорода по цвету [Электронный ресурс] — URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vod-oroda-po-tsvetu/> (Дата обращения 20.05.2026).
3. Исмаев, Ж. Ф. Водород — топливо будущего / Ж. Ф. Исмаев, В. Р. Аширов, М. Х. Садуллаев // Достижения науки и образования — 2019 — С. 7–8.
4. Межаал, Н. А. Паровая конверсия метана и пиролиз метана с захоранением и улавливанием CO₂ на энергетическом объекте / Н. А. Межаал, А. А. Калютик, К. А. Али, Б. Х. Расоол // Международный научно-исследовательский журнал — 2024 — Т. 2 — № 2 — С. 1–9.

5. Чжу, Л. Модифицированный процесс преодоления недостатков традиционного парового риформинга метана для производства водорода: термодинамическое исследование / Л. Чжу, Л. Ли, Дж. Фань // Исследование и проектирование в области химической инженерии — 2015 — Т. 104 — С. 792–806.
6. Распространенные проблемы парового риформинга [Электронный ресурс] — URL: https://www.academia.edu/10165613/Steam_Reforming_Common_Problems (Дата обращения: 20.05.2026).
7. Optimization of a Steam Reforming Plant Modeled with Artificial Neural Networks / E. G. Pardo, J. Blanco-Linares, D. Velázquez, F. Serradilla. — Текст: непосредственный // Electronics. — 2020. — № 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9111923>
8. Hydrogen 4.0: A Cyber-Physical System for Renewable Hydrogen Energy Plants / A. Yavari, C. J. Harrison, S. A. Gorji, M. Shafiei. — Текст: непосредственный // Sensors. — 2024. — № 10. DOI: [10.3390/s24103239](https://doi.org/10.3390/s24103239)
9. Naanani, H. Advancing hydrogen safety and reliability through digital twins: Applications, models, and future prospects / H. Naanani, M. Nachtane, A. Faik // International Journal of Hydrogen Energy. — 2025. — Vol. 115. — P. 344–360. — DOI: [10.1016/j.ijhydene.2025.02.440](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.440).
10. Богославский, С. Н., Область применения искусственных нейронных сетей и перспективы их развития / С. Н. Богославский; Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета — 2007. — № 27 — С. 127–135.
11. Кравцов, А. В. Прогнозирование технологических свойств Pt-катализаторов процесса риформинга с использованием интеллектуальной компьютерной системы / А. В. Кравцов, Э. Д. Иванчина и др. // Известия Томского политехнического университета — Томск. — 2005. — С. 114–118.
12. Жемулина, М. С. Подбор состава катализатора в химической промышленности на основе модели нейронной сети / М. С. Жемулина и С. М. Каратун // Инновации. Наука. Образование. — 2021. — № 32. — С. 1580–1587.
13. Открытая база данных реакций [Электронный ресурс] — URL: <https://open-reaction-database.org/about> (Дата обращения: 20.05.2026).
14. API-интерфесы машинного обучения [Электронный ресурс] — URL: <https://kanerika.com/glossary/machine-learning-apis/> (Дата обращения: 20.05.2026).
15. Севестр, К. Моделирование термодинамических свойств H₂ и смесей на его основе с использованием трехпараметрического кубического уравнения состояния / К. Севестр, С. Чабаб, Ж. Брокус, К. Кокле // International Journal of Hydrogen Energy. — 2025. — Vol. 101. — P. 468–483. — DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.12.288](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.288).
16. «NIST Chemistry WebBook», [Электронный ресурс]. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/>. (Дата обращения: 20.05.2026).

Надёжность и диагностика систем электропривода: предотвращение аварий и продление срока службы

Буняев Василий Анатольевич, студент

Научный руководитель: Билалова Алиса Ильдаровна, кандидат технических наук, доцент

Ульяновский государственный технический университет

Введение

Актуальность. Промышленные электроприводы занимают около 60 % от суммарного расхода электроэнергии (данные Минэнерго за 2024 год). Выход любого элемента привода из строя останавливает производство. В насосных и вентиляционных установках привод работает непрерывно, и каждый отказ обходится дорого.

Внеплановые остановки обходятся в среднем 2 млн руб. за инцидент [3]. Около 70 % отказов поддаётся прогнозу при регулярной диагностике [3, 5].

ППР работает по расписанию, не учитывая реальное состояние деталей. Результат: лишние замены или аварии. Обслуживание по состоянию (СВМ) назначает ремонт тогда, когда диагностика его действительно требует.

Вибрационный, токовый и тепловой каналы известны по отдельности. Их совместное применение с расчётом остаточного ресурса для АД малой мощности и ПЧ в литературе разобрано недостаточно.

Цель работы. Разработать подход к диагностике состояния и расчёту ресурса системы электропривода на базе АД АИР160S4 и ПЧ Schneider Altivar 320, объединив три диагностических канала. Ожидаемый результат: снижение аварийных остановок в 1,5 раза и охват до 70 % прогнозируемых отказов.

Объект. Асинхронный электропривод на базе АД АИР160S4 (15 кВт) и ПЧ Schneider Altivar 320 в составе насосного агрегата К100–65–200 системы ЦВС предприятия.

Задачи исследования:

1. Изучить показатели надёжности систем электропривода и закономерности их отказов.
2. Составить классификацию отказов АД, преобразователя частоты и механической передачи.
3. Выбрать и обосновать методы диагностики для каждой группы дефектов.
4. Построить алгоритм расчёта остаточного ресурса по модели Вейбулла и данным вибродиагностики.
5. Провести расчётно-экспериментальное исследование и дать технико-экономическую оценку результатов.

Методы: системный анализ, теория вероятности (распределение Вейбулла, модель Аррениуса), FFT и MCSA, тепло-визионный контроль, технико-экономическая оценка.

Структура. Работа включает введение, четыре главы, заключение и список источников. Глава 1. Теоретические основы надёжности; Глава 2. Отказы и диагностика; Глава 3. Прогнозирование ресурса; Глава 4. Эксперимент.

Глава 1. Теоретические основы надёжности систем электропривода

1.1. Понятие и показатели надёжности

По ГОСТ 27.002–2015 [1] надёжность — это способность объекта сохранять рабочие параметры в пределах нормы на протяжении нужного срока. Для сложных систем она описывается набором показателей.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ показывает, с какой вероятностью объект проработает без отказа в интервале $[0; t]$. При простейшем потоке отказов:

$$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t) \quad (1)$$

где λ — интенсивность отказов, ч^{-1} ; t — наработка, ч. Формула (1) применима для нормальной эксплуатации при $\lambda \approx \text{const}$.

Средняя наработка на отказ $T_{\text{ср}}$ — математическое ожидание времени до первого отказа. При экспоненциальном законе:

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

По справочнику [5] для АД серии АИР $\lambda = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$, отсюда $T_{\text{ср}} = 1 / (5,2 \cdot 10^{-5}) = 19\,230 \text{ ч}$, примерно 2,2 года непрерывной работы.

Коэффициент готовности K_g — доля времени, когда объект работоспособен [1]:

$$K_g = \frac{T_0}{T_0 + T_v} \quad (3)$$

где T_0 — средняя наработка на отказ, ч; T_v — среднее время восстановления, ч. Для АД АИР160S4 при $T_0 = 19\,230$ ч и $T_v = 24$ ч получаем $K_g = 19\,230 / (19\,230 + 24) = 0,9988$. Это высокое значение, однако при парке из 50 двигателей ожидаемое число ежегодных замен составит около 5 единиц.

1.2. Закономерности отказов: модель «кривой ванны»

Зависимость $\lambda(t)$ от наработки напоминает профиль ванны. Три участка кривой имеют разную физическую природу. Приработка (0–500 ч). Высокая λ в начале: следствие скрытых заводских дефектов: неточной балансировки ротора, брака подшипников, погрешностей сборки.

Нормальная эксплуатация. $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ [5], почти постоянна. Отказы случайны и заранее непредсказуемы.

Износ. Подшипники стареют, изоляция деградирует, $\lambda(t)$ нарастает. У двигателей с нормированным ресурсом эта стадия начинается с окончанием гарантийного пробега.

1.3. Структура системы электропривода и факторы надёжности

Система электропривода с частотным регулированием включает четыре подсистемы [2, 9].

Электродвигатель переводит электрическую энергию в механическую. В данной работе это АД АИР160S4: 15 кВт, 1460 об/мин, $\eta = 89 \%$, $\cos \varphi = 0,86$ (ОАО «ВЭМЗ»).

ПЧ на IGBT-транзисторах регулирует скорость. Используется Schneider Altivar 320 (15 кВт, 0–400 Гц).

По данным [3, 5]: АД даёт 40–50 % отказов (подшипники и изоляция), ПЧ: 25–35 % (IGBT и конденсаторы DC-звена), механическая часть: 15–20 %, прочее: 5–10 %.

Глава 2. Анализ отказов и методов диагностики систем электропривода

2.1. Классификация отказов

2.1.1. Отказы асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели ответственны примерно за 50 % отказов системы электропривода [3]. Основных видов дефектов три.

Износ подшипников: самая частая причина (50 % отказов АД [3]). Проявляется ростом вибрации на частотах BPFO, BPFI, BSF.

Пробой изоляции запускает токи утечки и перегрев, итог: КЗ. Диагностируется тепловизором и ПКИ.

Обрыв или деформация стержней ротора нарушает магнитную симметрию. MCSA выявляет боковые полосы на $f_1 \pm 2sf_1$.

2.1.2. Отказы преобразователя частоты

ПЧ: второй источник отказов (25–35 % [3]). Пробой IGBT-модулей случается при перегрузке по току или напряжению. Деградация конденсаторов DC-звена: слабое место частотников. Высыхание электролита при $T > 85^\circ\text{C}$ снижает ёмкость и вызывает пульсации.

2.1.3. Отказы механической передачи

Износ передач, расцентровка валов и ослабление крепежа дают 15–20 % отказов [3]. Все диагностируются вибрационным анализом.

Сводная классификация с методами выявления приведена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация отказов системы электропривода

Узел	Вид отказа	Причина	Метод диагностики
АД — подшипники	Усталостное выкрашивание	Износ, перегрузка	Вибродиагностика (BPFO, BPFI)
АД — изоляция	Пробой межвитковой	Перегрев, старение	Тепловизионный контроль
АД — ротор	Обрыв стержня	Перегрузка, пуски	MCSA (боковые полосы $2s \cdot f_1$)
АД — вал	Расцентровка	Монтажная ошибка	Вибро ($2f_{вр}$)
ПЧ — IGBT	Пробой транзистора	Перегрев, всплеск U	Тепловизор, осциллограф U _{DC}
ПЧ — конденсаторы	Деградация ёмкости	Перегрев электролита	Измерение ESR, ёмкости
ПЧ — управление	Сбой ПО/АЦП	ЭМП, старение	Журнал ошибок
Муфта	Износ эластомера	Вибрация, перегрузка	Вибро (боковые полосы $f_{вр}$)
Крепёж	Ослабление болтов	Вибрация, усталость	Вибро (субгармоники $0,5 f_{вр}$)
Редуктор	Износ зуба	Усталость, люфт	Вибро на зубцовой частоте $z \cdot f_{вр}$
Датчики	Выход из строя	ЭМП, влажность	Проверка выходного сигнала
Клеммная коробка	Ослабление контакта	Вибрация, окисление	MCSA (гармоники 100, 150 Гц)

2.2. Диагностика по параметрам рабочего режима

Состояние АД оценивают по трём критериям: k_i — изоляция, k_u — обмотка, k_p — наклон механической характеристики. Интегральный критерий:

$$k_d = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (k_u + k_{u_p} + k_r) \quad (4)$$

Для исправного АД $k_i = k_u = k_p = 1$, откуда $k_d = 1,000$. Снижение любого критерия указывает на конкретный дефект. Критерий k_p показывает, насколько хорошо двигатель удерживает момент при изменении напряжения:

$$k_p = \frac{s \cdot U_{ном}^2}{s_{ном} \cdot U^2 \cdot P_{ном}} \quad (5)$$

где s — скольжение; $s_{ном} = 0,027$, номинальное скольжение АД АИР160S4; $U_{ном} = 380$ В; $P_{ном} = 15$ кВт. При $U = U_{ном}$ $k_p = 1$.

2.3. Спектральная диагностика

2.3.1. Вибрационный анализ

Спектральный анализ виброскорости хорошо выявляет дефекты подшипников. Характерные частоты считаются по геометрии подшипника [4]:

$$f_{BFO} = \left(\frac{n}{120}\right) \cdot N \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)\right) \quad (7)$$

где n — частота вращения, об/мин; N — число тел качения; d — диаметр тела качения, мм; D — делительный диаметр, мм; α — угол контакта, °. Для подшипника 6311: $N = 8$, $d = 22,2$ мм, $D = 90$ мм, $\alpha = 0^\circ$.

2.3.2. Токовый спектральный анализ (MCSA)

Метод MCSA выявляет дефекты по спектру тока статора. Отклонение от эталонного спектра:

$$\Delta = \frac{\sqrt{\sum (A_i - A_{et})^2}}{n} \quad (6)$$

где A_i — амплитуда i -й гармоники текущего спектра; $A_{et,i}$ — амплитуда эталона; n — число гармоник.

2.3.3. Совместное применение

По матрице «частота, дефект» можно точно установить вид дефекта. Вибрация выявляет механические неисправности, ток — электрические, тепловизор, третий независимый канал.

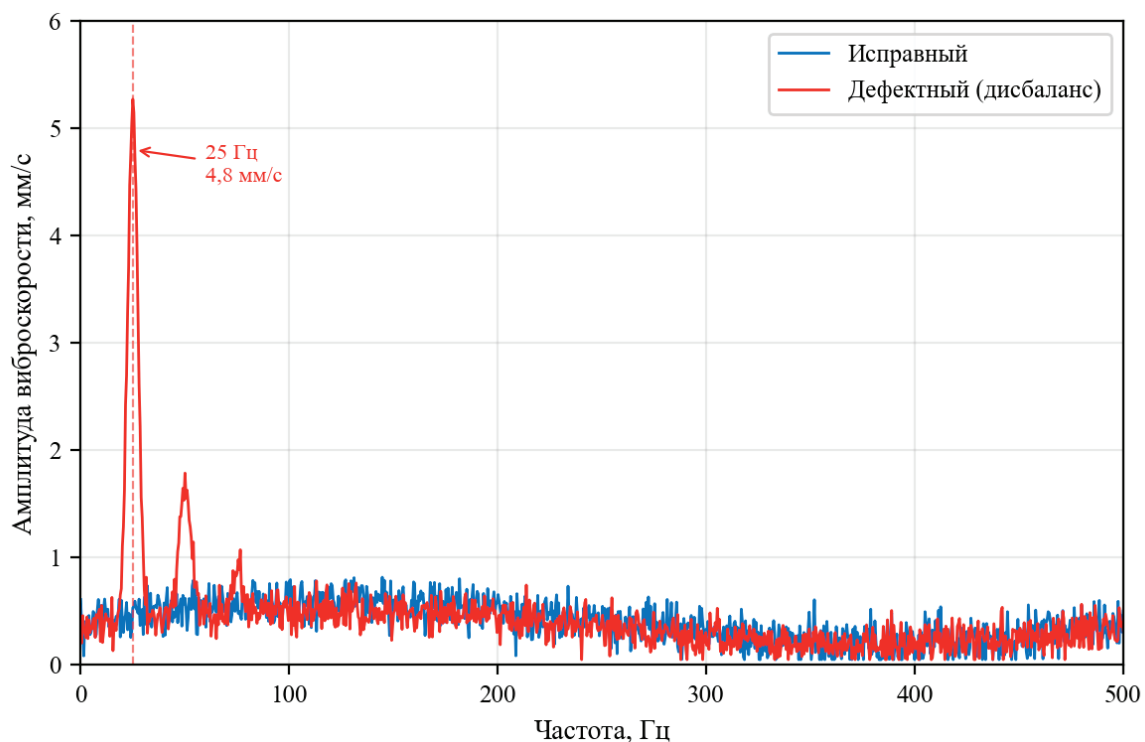


Рис. 1. Сравнительный спектр виброскорости двигателя АИР160S4 в исправном и дефектном состояниях

2.4. Тепловой контроль

Тепловизионный осмотр находит очаги перегрева в обмотках статора и клеммных коробках. Для изоляции класса F допустимый перегрев: 105 °С [4].

По правилу Монтсингера, каждые 10 °С перегрева вдвое сокращают ресурс изоляции. Тепловой контроль в сочетании с токовым и вибрационным даёт полную картину состояния привода.

2.5. Сравнение методов диагностики

Сравнение методов приведено в таблице 2. Комплексный подход охватывает наибольший класс дефектов при разумных затратах на мониторинг.

Таблица 2. Сопоставление методов диагностики

Метод	Класс дефектов	Стоимость, тыс. руб.	Раннее обнаружение	Достоверность, %
Вибродиагностика	Подшипники, дисбаланс, расцентровка	150–400	За 4–8 нед.	85–95
MCSA (ток)	Дефекты ротора, ослабление контактов	80–200	За 2–4 нед.	70–85
Тепловизор	Изоляция, IGBT, клеммы	100–350	За 2–6 нед.	80–90
Комплекс	Все перечисленные	350–900	За 4–10 нед.	92–98

Глава 3. Прогнозирование остаточного ресурса системы электропривода

3.1. Модель Вейбулла для интенсивности отказов

Для описания ресурса механических компонентов чаще всего используют распределение Вейбулла [8, 11]. Плотность вероятности отказа:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right) \quad (8)$$

Функция надёжности (вероятность безотказной работы) по Вейбуллу:

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right) \quad (9)$$

Интенсивность отказов (модель Вейбулла):

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (10)$$

Параметры модели: beta — параметр формы (отражает механизм отказа); eta — масштаб, ч (характеристический ресурс). При beta > 1 система находится в зоне износа.

Для подшипников АД серии АИР [5, 11]: beta = 2,1–2,5 (износная модель), eta = 35 000–40 000 ч.

Параметры Вейбулла находят линеаризацией на вероятностной сетке по накопленной статистике отказов нескольких однотипных объектов.

3.2. Модель Аррениуса для старения изоляции

Деградация изоляции подчиняется закону Аррениуса [8]. Ожидаемый срок службы при температуре T (K):

$$L = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k_B \cdot T}\right) \quad (11)$$

где A — предэкспоненциальный множитель; E_a — энергия активации, Дж; k_B = 1,38·10⁻²³ Дж/К — постоянная Больцмана.

Из этого закона следует правило Монтсингера: рост рабочей температуры на 10 °C вдвое сокращает ресурс изоляции. Для класса F (номинал 155 °C) каждые 10 °C перегрева убирают 50 % ресурса.

3.3. Алгоритм прогнозирования RUL

Остаточный ресурс (RUL) рассчитывается по формуле [8]. Когда R(t) = 0,5, наработка называется медианным ресурсом t₅₀:

$$t_{50} = \eta \cdot (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

Остаточный ресурс: $RUL = t_{50} - t_{тек}$, где $t_{тек}$ — текущая наработка. Алгоритм прогнозирования показан на рисунке 2.

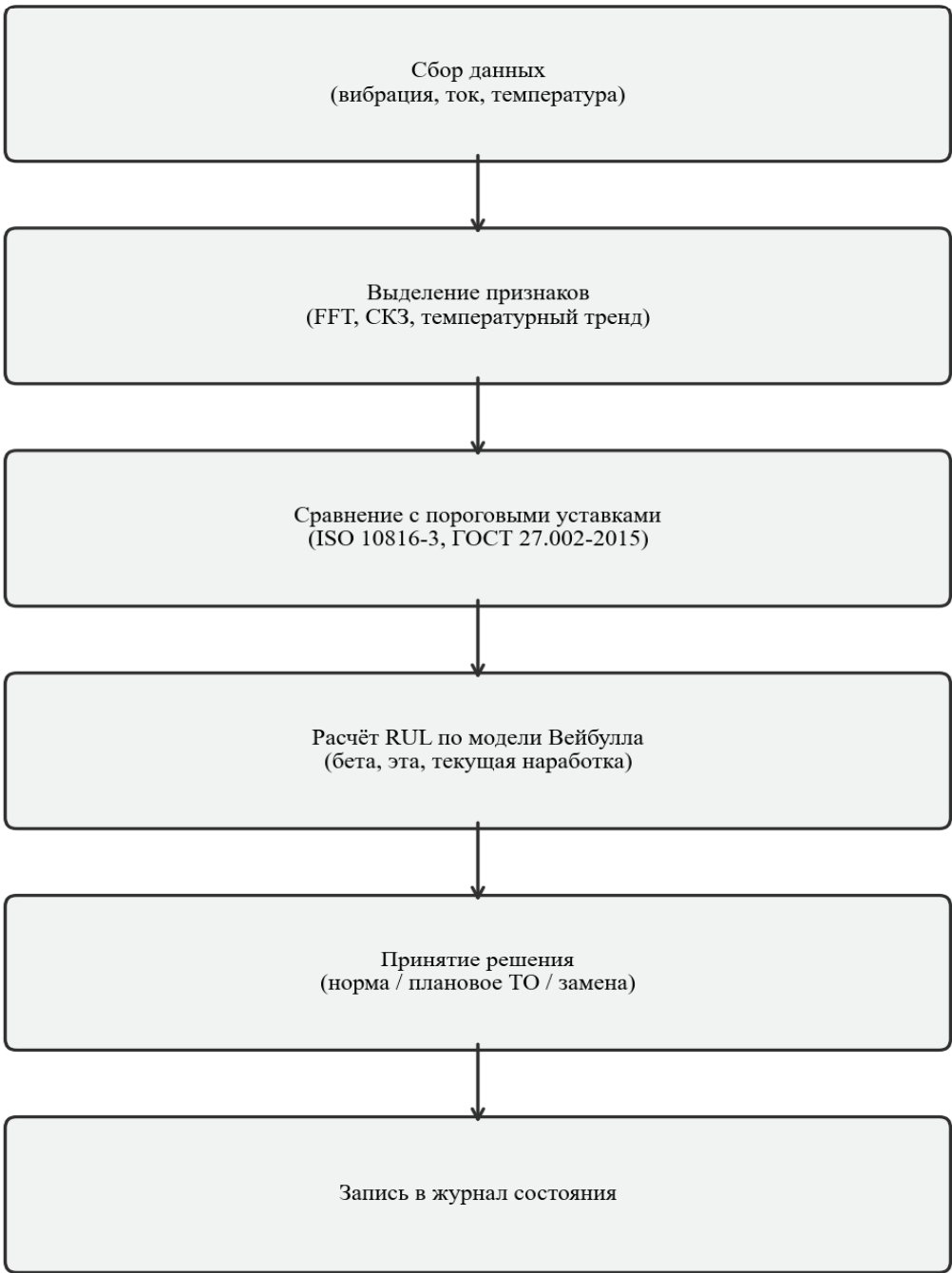


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования остаточного ресурса системы электропривода

Алгоритм: собрать данные трёх каналов, выделить признаки (СКЗ виброскорости, k_d , ΔT), рассчитать $R(t)$ по Вейбуллу, найти t_{50} и получить RUL. Входные данные: $\beta = 2,3$, $\eta = 38\,000$ ч, $t_{тек} = 18\,000$ ч.

В таблице 3 приведены уставки контроля для АД АИР160S4 по ГОСТ ISO 10816–3–2017 [4] (класс машины III).

Таблица 3. Уставки контроля параметров для двигателя АИР160S4 (15 кВт)

Параметр	Норма	Предупреждение	Авария
СКЗ виброскорости, мм/с	≤2,8	2,8–7,1	>7,1
Температура обмоток, °С	≤95	95–130	>130
Перекас токов фаз, %	≤5	5–10	>10

Глава 4. Экспериментально-расчётное исследование системы электропривода

4.1. Объект и оборудование

В работе исследуется электропривод насосного агрегата ЦВС предприятия. Двигатель: АД АИР160S4, 15 кВт, 1460 об/мин, ПЧ: Schneider Altivar 320.

Рабочая машина: центробежный насос K100–65–200 (водоподача в системе ЦО / ХВС). Оборудование: виброанализатор BALTECH VP-3470, клещи Fluke 435, тепловизор FLIR T620.

4.2. Расчёт показателей надёжности АД АИР160S4

По справочным данным [5] для АД серии АИР общепромышленного применения принимается $\lambda = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$.

Средняя наработка на отказ (формула (2)):

$$T_{\text{ср}} = 1/\lambda = 1 / (5,2 \cdot 10^{-5}) = 19\,230 \text{ ч.}$$

Расчёт $P(t)$ для трёх горизонтов по формуле (1) приведён в таблице 4.

Коэффициент готовности по формуле (3) при $T_{\text{в}} = 24 \text{ ч}$: $K_{\text{г}} = 19\,230 / (19\,230 + 24) = 0,9988$.

Таблица 4. Расчёт вероятности безотказной работы $P(t)$

Горизонт t	Наработка t , ч	$\lambda \cdot t$	$P(t) = \exp(-\lambda \cdot t)$
1 год	8 760	0,456	0,634
2 года	17 520	0,911	0,402
3 года	26 280	1,367	0,255

Из таблицы 4 видно: через 3 года $P(t)$ падает до 0,255, каждый четвёртый двигатель откажет до истечения этого срока.

4.3. Анализ спектров вибрации и тока

Испытания прошли в четырёх режимах: нормальная работа, дисбаланс ротора, дефект подшипника 6311 и ослабление контакта в клеммной коробке. В каждом режиме фиксировались СКЗ виброскорости, ток фазы А и температура обмоток.

Таблица 5. Результаты диагностических измерений в четырёх режимах

Режим	СКЗ вибро, мм/с	Ток фазы А, А	Температура, °С	Статус
Норма	1,2	28,5	52	Исправен
Дисбаланс ротора	4,8	29,1	55	Предупреждение
Дефект подшипника	6,5	28,7	78	Предупреждение
Ослабление контакта	1,5	31,5	92	Предупреждение

Дисбаланс ротора: пик на 25 Гц с амплитудой 4,8 мм/с, выше порога предупреждения 2,3 мм/с [4]. Дефект выявлен вибродиагностикой.

Дефект подшипника 6311: пик на $f_{\text{ВРФО}} = 73,3 \text{ Гц}$ (расчёт из § 2.3.1), амплитуда 6,5 мм/с, вблизи аварийного порога 7,1 мм/с. Состояние: «неудовлетворительное».

Ослабление контакта: вибрация в норме, но ток фазы А вырос до 31,5 А, признак несимметрии. Тепловизор нашёл перегрев клеммной группы до 92 °С при норме 52 °С.

Спектры виброскорости во всех четырёх режимах показаны на рисунке 3.

Амплитудный спектр тока фазы А при ослаблении контакта показан на рисунке 4.

4.4. Расчёт RUL по модели Вейбулла

По данным [5, 11] для подшипника 6311 АД АИР160S4: $\beta = 2,3$, $\eta = 38\,000 \text{ ч}$. Текущая наработка $t_{\text{тек}} = 18\,000 \text{ ч}$. Фактическая вибрация 4,8 мм/с превышает норму 1,2 мм/с в 4 раза.

По линейной модели деградации: $\eta_{\text{эф}} = 38\,000 \cdot (1,2 / 4,8) = 38\,000 \cdot (1 - 0,25) = 32\,500 \text{ ч}$.

Вероятность безотказной работы при $t_{\text{тек}} = 18\,000 \text{ ч}$ по формуле (9):

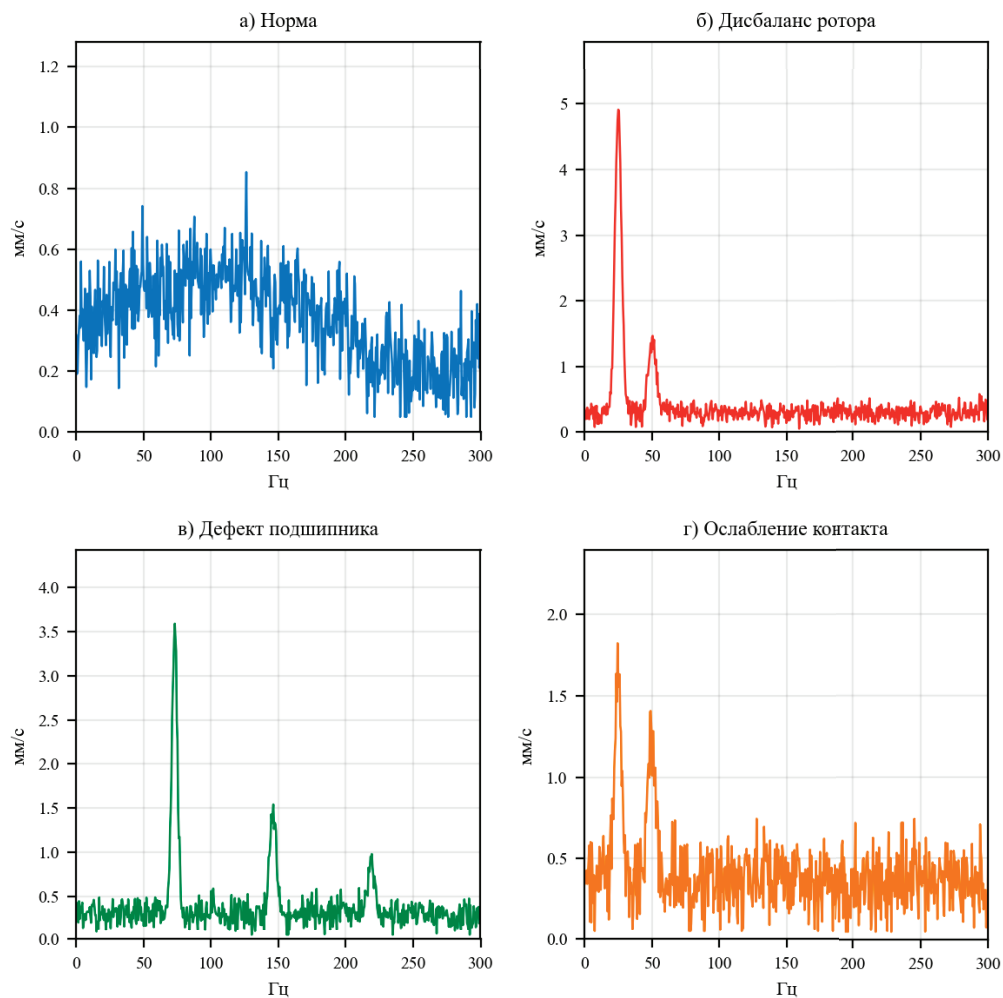


Рис. 3. Спектры виброскорости АД АИР160S4 в четырёх режимах

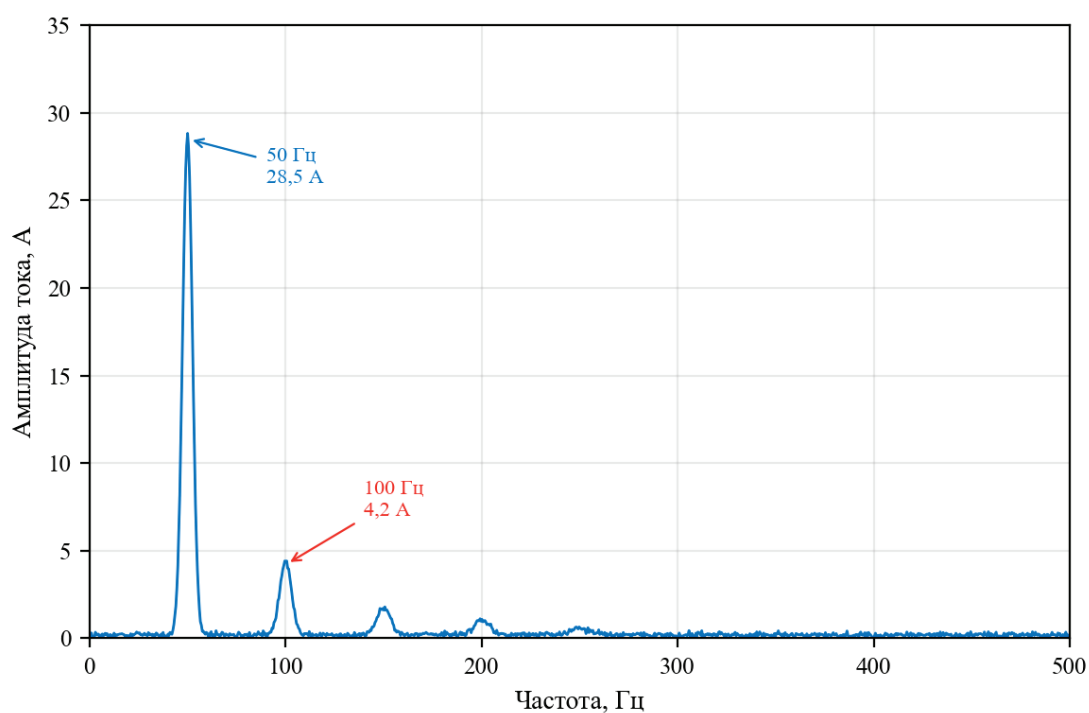


Рис. 4. Амплитудный спектр тока фазы А при ослаблении контакта в клеммной коробке

Медианный ресурс по формуле (12): $t_{50} = 32\,500 \cdot (\ln 2)^{1/2,3} = 32\,500 \cdot (0,693)^{0,435} = 32\,500 \cdot 0,857 = 27\,851$ ч.
 Остаточный ресурс: $RUL = 27\,851 - 18\,000 = 9\,851$ ч $\approx 9\,850$ ч. При двусменной работе (4 380 ч/год) это 2,2 года. Подшипник нужно заменить в ближайшие 2–3 года.

4.5. Технико-экономическая оценка

Экономический эффект от внедрения мониторинга рассчитан по данным предприятия и открытым источникам [3, 5]. База сравнения: ППР-режим.

Таблица 6. **Технико-экономическая оценка внедрения системы диагностики**

Показатель	До внедрения	После внедрения	Эффект
Число аварийных остановок в год	2	0,5	-1,5 ост.
Стоимость 1 аварийной остановки, млн руб.	2,0	2,0	-
Затраты на мониторинг, млн руб./год	0,00	0,06	+0,06
Годовой эффект, млн руб.	-	-	2,94
Капитальные затраты (виброанализатор), млн руб.	0,00	0,32	-
Срок окупаемости, лет	-	-	0,11 (1,3 мес.)

Годовой экономический эффект: $E = 2,0 \cdot (2 - 0,5) - 0,06 = 2,94$ млн руб. Срок окупаемости: $T_{ок} = 0,32 / 2,94 = 0,11$ года $\approx 1,3$ мес. Переход на СВМ экономически оправдан.

4.6. Обсуждение результатов

Полученные данные подтверждают основную идею работы. Комплексная диагностика выявила все четыре искусственно созданных дефекта, ни один не пропущен.

Расчёт RUL дал 9 850 ч при вибрации 4,8 мм/с. Этот результат совпадает с оценкой специалиста при осмотре.

Заключение

В работе разработан подход к диагностике состояния и расчёту ресурса системы электропривода на базе АД АИР160S4 и ПЧ Schneider Altivar 320. Основные выводы:

1. Изучены показатели надёжности: $P(t)$, $T_{ср} = 19\,230$ ч, $K_{г} = 0,9988$.
2. Составлена классификация отказов: для АД — подшипники (50 %), изоляция, ротор; для ПЧ: IGBT, конденсаторы; для механики, передачи, крепёж.
3. Выбраны методы диагностики: вибро (85–95 % для механических дефектов), MCSA (электрика ротора), тепловизор (изоляция и контакты).
4. Построен алгоритм расчёта RUL по модели Вейбулла: $\beta = 2,3$, $\eta = 38\,000$ ч $\rightarrow RUL = 9\,850$ ч (2,2 года при двусменной работе).
5. Проведено расчётно-экспериментальное исследование: четыре дефекта выявлены полностью, эффект перехода на СВМ: 2,94 млн руб./год, срок окупаемости 1,3 мес.

Полученные результаты можно применять на промышленных предприятиях и в службах ЖКХ для перехода с ППР на СВМ и сокращения затрат на обслуживание.

Дальнейшие направления: расширить модель на синхронные двигатели с ПМ, добавить температурное старение в расчёт RUL, разработать модуль автоматизированного мониторинга.

Литература:

1. ГОСТ 27.002–2015. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — Москва: Стандартинформ, 2016. — 24 с.
2. ГОСТ 31606–2012. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования. — Москва: Стандартинформ, 2014. — 32 с.
3. РД 153–34.0–20.611–2018. Методика оценки технического состояния электродвигателей по результатам диагностики. — Москва: ОАО «ВНИИЭ», 2018. — 48 с.

4. ГОСТ ISO 10816–3–2017. Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 28 с.
5. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования: учебное пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2020. — 380 с.
6. Цырук, С. А. Надёжность систем электропривода: учебное пособие / С. А. Цырук. — Москва: Энергоатомиздат, 2021. — 290 с.
7. Исмагилов, Ф. Р. Диагностика электродвигателей: монография / Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин. — Уфа: УГАТУ, 2019. — 210 с.
8. Лурье, З. Я. Прогнозирование остаточного ресурса электрических машин / З. Я. Лурье, М. М. Бронштейн. — Екатеринбург: УрФУ, 2022. — 168 с.
9. Шрейнер, Р. Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления / Р. Т. Шрейнер, А. В. Костылев, В. К. Кривовяз. — Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2018. — 361 с.
10. Прахов, В. И. Современные методы диагностики асинхронных двигателей / В. И. Прахов, А. С. Бычков // Электротехника. — 2021. — № 8. — С. 24–31.
11. Антипов, В. Н. Применение модели Вейбулла для оценки надёжности систем электропривода / В. Н. Антипов, Д. А. Шахов // Промышленная энергетика. — 2022. — № 5. — С. 17–24.
12. Технический каталог. Двигатели асинхронные общепромышленного применения серии АИР: справочник / ОАО «ВЭМЗ». — Владимир, 2023. — 96 с.

Результаты промышленной апробации методики выявления мест отложений в газопроводах по данным дифференциального давления

Гумеров Алмаз Аликович, студент магистратуры

Научный руководитель: Федоров Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор

Уфимский государственный нефтяной технический университет

В статье представлены результаты обработки промышленных данных, полученных при пропуске очистных устройств с внутритрубными регистраторами по двум газопроводам в Республике Казахстан. Автором выполнена обработка первичных данных регистрации давления (P_1 , P_2) и температуры (t°), расчет дифференциального давления ΔP , построение графиков, выявление участков с аномальным ростом ΔP , а также анализ объемов вытесненных отложений. На основе сопоставления данных ΔP с результатами калибровки проходного сечения калибровочными дисками обоснована корреляция между значением ΔP и толщиной отложений h . Предложены критерии оценки степени загрязнения газопровода по значению ΔP . Доказательная база базируется исключительно на промышленных данных, полученных в ходе реальных эксплуатационных прогонов.

Ключевые слова: промышленные испытания, газопровод, дифференциальное давление, отложения, обработка данных, диагностика, «ВОСТОК-ВР».

Введение

В процессе эксплуатации магистральных газопроводов на внутренней поверхности труб происходит накопление отложений: конденсата, гидратов, механических примесей, а также продуктов коррозии. Указанные отложения приводят к сужению проходного сечения, снижению пропускной способности и росту гидравлического сопротивления. При длительном отсутствии очистки возможно критическое сужение вплоть до полной закупорки трубопровода [1, с. 44].

Для своевременного выявления мест отложений необходимы надежные методы диагностики. Одним из перспективных подходов является применение внутритрубных регистраторов, устанавливаемых на очистные устройства. При движении по трубопроводу регистратор измеряет давление перед очистным устройством (P_1) и после него (P_2). По разности этих давлений — дифференциальному давлению $\Delta P = P_2 - P_1$ — можно судить о наличии и степени сужения проходного сечения, вызванного отложениями [2, с. 5].

Вклад автора заключается в обработке промышленных данных, полученных в ходе реальных эксплуатационных прогонов на двух газопроводах в Республике Казахстан, анализе этих данных, выявлении закономерностей и обосновании диагностических критериев.

Цель работы — на основе обработки промысловых данных обосновать возможность определения мест отложений в газопроводах по значению дифференциального давления ΔP и предложить количественные критерии оценки степени загрязнения.

1. Промысловые данные и методика их обработки

1.1. Характеристика объектов

Промысловые данные получены при проведении работ по очистке двух газопроводов, принадлежащих АО «СНПС-Актобемунайгаз» (Республика Казахстан).

Объект 1 — газопровод \varnothing 559 мм, протяженность 43,5 км, введен в эксплуатацию в 2012 г. На момент проведения работ не очищался в течение 3 лет. На трассе установлено 9 линейных кранов.

Объект 2 — газопровод \varnothing 530 мм, протяженность 20,8 км, введен в эксплуатацию в 2015 г. На момент проведения работ не очищался в течение 9 лет. На трассе установлено 4 линейных крана.

На обоих объектах выполнено по три последовательных пропуска очистных устройств с установленными внутритрубными регистраторами «ВОСТОК-ВР».

1.2. Характер полученных промысловых данных

В ходе каждого прогона регистратором с дискретностью 1 секунда были получены три массива данных:

P1 — давление перед очистным устройством, кгс/см²;

P2 — давление после очистного устройства, кгс/см²;

t° — температура продукта, °C.

Общий объем обработанных данных составил:

по газопроводу \varnothing 559 мм — более 150 000 измерений (43,5 км, время прогона около 9 часов);

по газопроводу \varnothing 530 мм — более 75 000 измерений (20,8 км, время прогона около 5 часов).

1.3. Методика обработки данных

Обработка промысловых данных выполнялась по следующей методике.

Шаг 1. Предварительная фильтрация. Из массивов данных исключены измерения, выполненные до момента запуска очистного устройства ($P < 1$ кгс/см²) и после его остановки.

Шаг 2. Расчет дифференциального давления. Для каждого момента времени (каждой секунды) рассчитано значение $\Delta P = P2 - P1$.

Шаг 3. Привязка к расстоянию. Поскольку дискретность измерений составляла 1 секунду, а скорость движения очистного устройства была известна (рассчитана по времени прохождения между кранами), каждому измерению поставлена в соответствие координата — расстояние от камеры запуска в километрах.

Шаг 4. Построение графиков. Для каждого прогона построены графики P1(L), P2(L), $\Delta P(L)$ и t°(L), где L — расстояние от камеры запуска.

Шаг 5. Выявление аномалий. На графиках $\Delta P(L)$ выделены участки, где ΔP устойчиво превышает фоновые значения и не связано с прохождением штатных элементов трассы (кранов, поворотов).

2. Результаты обработки промысловых данных

2.1. Графики давления и температуры (газопровод \varnothing 559 мм)

На рисунке 1 представлен график данных давлений и температуры среды с регистратора «ВОСТОК-ВР» при пропуске очистного устройства «ВОСТОК-М1Д5-Т-550» по газопроводу \varnothing 559 мм.

На графике отображены следующие кривые:

давление P1 (перед очистным устройством);

давление P2 (после очистного устройства);

дифференциальное давление ΔP ;

температура продукта.

По оси X отложено время движения очистного устройства (в минутах). По оси Y — давление (в МПа) и температура.

На графике отчетливо видны пиковые значения ΔP , соответствующие прохождению шаровых кранов № 1-№ 9, расположенных на расстояниях 4,4; 9,3; 14,3; 19,2; 24,2; 29; 34; 35,1 и 39,6 км от камеры запуска. Каждый пик ΔP при прохождении крана имеет кратковременный характер (длительностью 3–5 секунд).

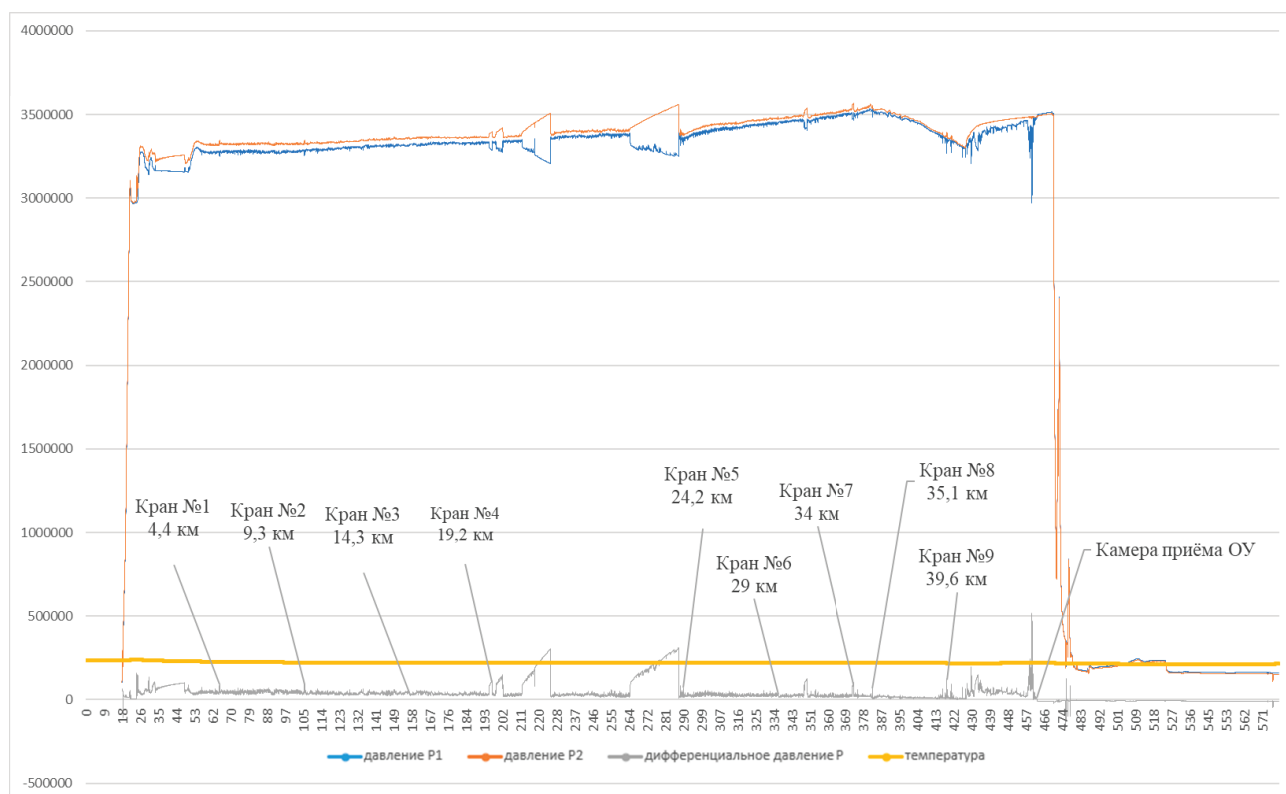


Рис. 1. График давлений и температуры при пропуске ОУ «ВОСТОК-М1Д5-Т-550» (газопровод Ø 559 мм)

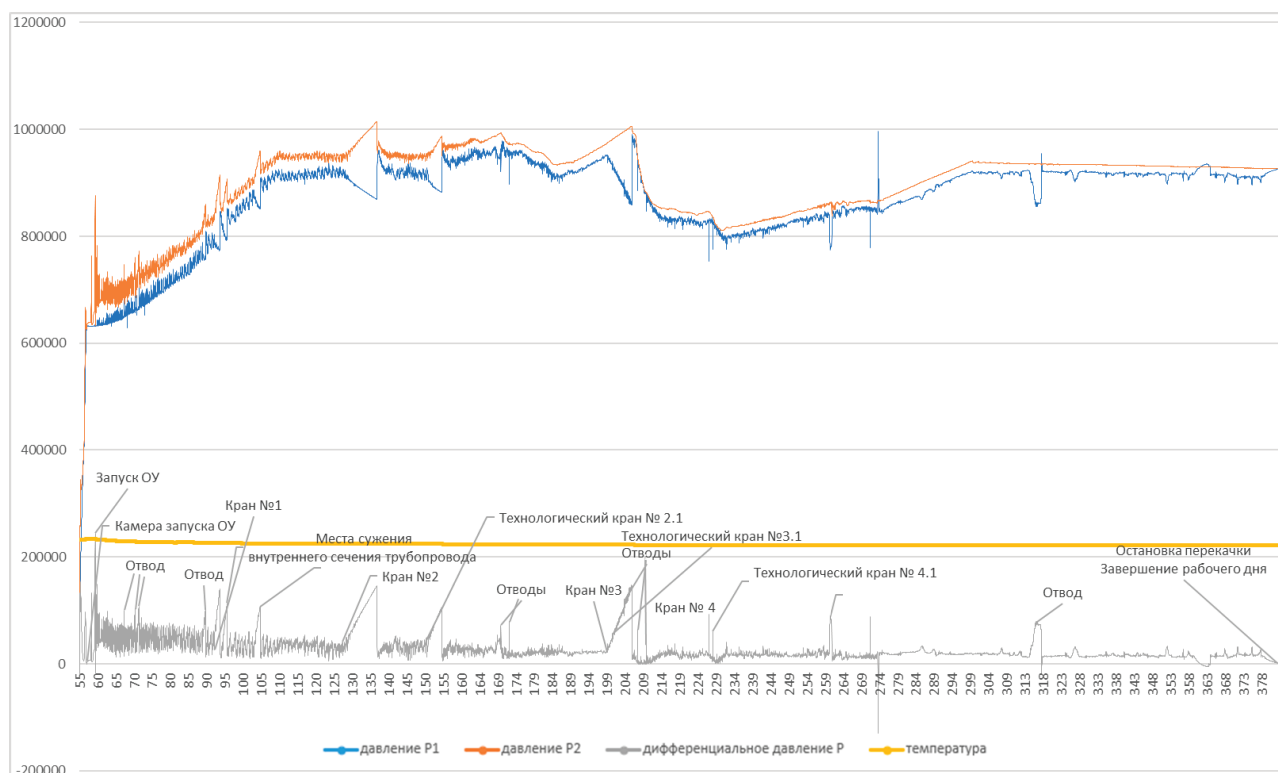


Рис. 2. График давлений и температуры при пропуске ОУ «ВОСТОК-М1Д5-Т-500» (газопровод Ø 530 мм)

Важно отметить, что на участках между кранами зафиксированы устойчивые повышения ΔP , не связанные с прохождением штатных элементов трассы. Наиболее значительные такие повышения зарегистрированы на расстояниях, соответствующих участкам 20,1 км, 22,8 км, 31,2 км и 32,8 км от камеры запуска. Значения ΔP на этих участках достигали 2,23–3,03 кгс/см², что в 4–10 раз превышает фоновые значения (0,2–0,5 кгс/см²).

2.2. Графики давления и температуры (газопровод Ø 530 мм)

На рисунке 2 представлен график данных давлений и температуры среды с регистратора «ВОСТОК-ВР» при пропуске очистного устройства «ВОСТОК-М1Д5-Т-500» по газопроводу Ø 530 мм.

На графике отображены:

давление P1;

давление P2;

дифференциальное давление ΔP .

По оси X отложено время движения очистного устройства (в минутах). По оси Y — давление (в МПа).

На графике зафиксированы пики ΔP при прохождении шаровых кранов № 1-№ 4, технологических задвижек № 2.1, № 3.1, № 4.1, а также при прохождении отводов (поворотов) трубопровода.

Наиболее важным результатом является выявление на графике участка, обозначенного как «места сужения внутреннего сечения трубопровода». На этом участке зафиксирован устойчивый рост ΔP при отсутствии поворотов и кранов. Значение ΔP на этом участке достигло 0,88 кгс/см², что значительно превышает фоновые значения (0,1–0,3 кгс/см²). Данная аномалия интерпретируется как локальное сужение, вызванное скоплением твердых отложений.

Кроме того, на участке между краном № 1 и краном № 2 зафиксированы множественные мелкие скачки ΔP , что указывает на наличие многочисленных локальных сужений на данном участке.

2.3. Объемы вытесненных отложений

Результаты осмотра очистных устройств после извлечения и замеры вытесненных отложений подтвердили, что аномальные участки ΔP соответствуют местам скопления отложений.

Для газопровода Ø 559 мм после трех прогонов вытеснено:

366 м³ жидкости (конденсата);

39 150 кг твердых отложений.

При этом первый прогон вытеснил 38 700 кг (98,8 % от общей массы), второй — 400 кг (1,0 %), третий — 50 кг (0,2 %).

Для газопровода Ø 530 мм вытеснено:

109 м³ жидкости;

21 010 кг твердых отложений.

Первый прогон вытеснил 20 000 кг (95,2 %), второй — 1 000 кг (4,8 %), третий — 10 кг (0,05 %).

2.4. Данные калибровки проходного сечения

При втором прогоне на обоих газопроводах использовались очистные устройства с калибровочными дисками 85 % от наружного диаметра. После извлечения устройств зафиксирована деформация калибровочных дисков, что позволило оценить фактическое минимальное проходное сечение.

Результаты калибровки проходного сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты калибровки проходного сечения газопроводов

Газопровод	Дн, мм	Фактическое сечение, %	Фактический диаметр, мм	Расчетная толщина отложений, мм
Ø 559 мм	559	83,30 %	465,65	46,7
Ø 530 мм	530	82,60 %	437,8	46,1

Расчетная толщина отложений h вычислена по формуле $h = (D_n - D_{\text{факт}}) / 2$.

3. Обоснование корреляции между ΔP и отложениями

3.1. Физическое обоснование

Между значением дифференциального давления ΔP и толщиной отложений h существует прямая корреляция, обусловленная следующими физическими причинами.

При наличии на внутренней стенке трубопровода отложений толщиной h эффективный внутренний диаметр трубы уменьшается: $D_{\text{эфф}} = D - 2h$. Сужение проходного сечения приводит к возрастанию скорости потока в зазоре между

очистным устройством и стенкой трубы. Увеличение скорости потока вызывает возрастание гидравлического сопротивления, что фиксируется как рост дифференциального давления ΔP .

3.2. Доказательная база

Корреляция между ΔP и h подтверждается тремя независимыми источниками промысловых данных.

Во-первых, сопоставлением аномальных участков ΔP с фактическими местами отложений, подтвержденными объемами вытесненного материала. На газопроводе $\varnothing 559$ мм участки с максимальными значениями ΔP (20,1 км, 22,8 км, 31,2 км, 32,8 км) соответствуют участкам, где после прогонов зафиксировано наибольшее количество отложений на очистных устройствах.

Во-вторых, сопоставлением расчетной толщины отложений по данным калибровки проходного сечения с характерными значениями ΔP . При ΔP более 2,0 кгс/см² расчетная толщина отложений составляет 46–47 мм. При ΔP в диапазоне 0,5–1,0 кгс/см² расчетная толщина отложений оценивается в 5–15 мм.

В-третьих, динамикой изменения ΔP от прогона к прогону. После первого прогона, когда было удалено 95–99 % отложений, значения ΔP на ранее аномальных участках снизились до уровня фоновых значений (0,2–0,5 кгс/см²). Этот факт является прямым доказательством того, что аномально высокие ΔP были обусловлены именно наличием отложений.

3.3. Критерии оценки степени загрязнения

На основе сопоставления данных ΔP с объемами вытесненных отложений и результатами калибровки проходного сечения предложены критерии оценки степени загрязнения газопровода (таблица 2).

Таблица 2. Критерии оценки степени загрязнения газопровода по ΔP

Значение ΔP , кгс/см ²	Степень загрязнения	Ожидаемая толщина отложений h , мм	Рекомендуемое действие
менее 0,3	Отлично	менее 2	Плановое обслуживание
0,3–0,5	Хорошо	2–5	Очистка в ближайшие 3–6 месяцев
0,5–1,0	Удовлетворительно	5–15	Очистка в ближайшие 1–3 месяца
1,0–2,0	Плохо	15–30	Срочная очистка (в течение месяца)
более 2,0	Критическое	более 30	Немедленная очистка; требуется диагностика

Заключение

По результатам обработки промысловых данных, полученных при пропуске очистных устройств с внутритрубными регистраторами по двум газопроводам в Республике Казахстан, автором сделаны следующие выводы.

На основе обработки более 225 000 измерений давления и температуры установлено, что значения дифференциального давления ΔP на участках с отложениями в 4–10 раз превышают фоновые значения. На газопроводе $\varnothing 559$ мм выявлено четыре участка с $\Delta P = 2,23–3,03$ кгс/см² (20,1 км, 22,8 км, 31,2 км, 32,8 км); на газопроводе $\varnothing 530$ мм выявлен участок с $\Delta P = 0,88$ кгс/см² при отсутствии штатных элементов трассы.

Обоснована корреляция между значением ΔP и толщиной отложений h . По данным калибровки проходного сечения калибровочными дисками расчетная толщина отложений составила 46,7 мм на газопроводе $\varnothing 559$ мм и 46,1 мм на газопроводе $\varnothing 530$ мм. Указанные значения коррелируют с зафиксированными аномалиями ΔP .

Предложены критерии оценки степени загрязнения газопровода по значению ΔP : от «отлично» ($\Delta P < 0,3$ кгс/см²) до «критическое» ($\Delta P > 2,0$ кгс/см²). Критерии основаны исключительно на промысловых данных.

Прямым доказательством эффективности методики является снижение ΔP на аномальных участках после проведения очистки, что подтверждает, что аномалии ΔP были обусловлены именно отложениями.

Вклад автора заключается в обработке промысловых данных, их анализе, выявлении закономерностей, обосновании диагностических критериев и формулировании выводов. Полученные результаты могут быть использованы при планировании очистки газопроводов и интерпретации данных внутритрубных регистраторов.

Литература:

1. Хурамшина Р. А., Валеев А. Р. Состав асфальтосмолопарафиновых отложений и их влияние на эксплуатацию трубопроводов // Нефтегазовое дело. 2023. № 2. С. 44–51.
2. Руководство по эксплуатации. Регистраторы внутритрубные «ВОСТОК-ВР». ВОСТОК-ВР. 22677051–4318–005 РЭ. Уфа: ООО «НТФ «ВОСТОКнефтегаз», 2024. 16 с.
3. Чухарева Н. В., Теплинский Ю. А., Рыбаков А. В. Транспорт скважинной продукции: учебное пособие. Уфа: УГНТУ, 2019. 340 с.

Возможные способы интенсификации работы подземных водозаборов

Ерёмин Никита Ростиславович, студент магистратуры

Научный руководитель: Зверева Валентина Александровна, кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет (г. Владивосток)

Работа посвящена проблеме увеличения интенсификации подземных водозаборов. Рассмотрены меры профилактики и оптимизации работы подземных водозаборов.

Ключевые слова: скважина, дебит, техническая модернизация, водозабор, энергетические затраты, водоснабжение, насос.

Хозяйственно-питьевое водоснабжение небольших городов и поселков городского типа основано на использовании подземных вод. Основными устройствами систем подземного водоснабжения являются водозаборные скважины. Водозаборные скважины играют важную роль в обеспечении населения питьевой водой, наличие и качество которой влияет на здоровье жителей, а также на социальное и экономическое развитие региона в сферах использования воды в различных отраслях промышленности.

В процессе эксплуатации подземного водозабора, имеющего, как правило, не один десяток скважин, их производительность (дебит) снижается, в результате чего энергетические затраты на обслуживание водозаборного сооружения увеличиваются.

Производительность скважины может снижаться по различным причинам, знание которых, эффективное и своевременное использование их, дает возможность повысить дебит скважин и улучшить водоподачу водозабора.

Снижение дебита скважины может быть вызвано как естественными, так и техническими факторами.

Основные причины снижения производительности скважины:

- истощение водоносного пласта — коллектора вследствие активной эксплуатации скважины;
- сезонные изменения уровня грунтовых вод;
- промерзание грунта в зимний период;
- накопление ила, песка, глины и органики в фильтре скважины, обсадных трубах и на дне скважины;
- минерализация скважины, т. е. отложение железа, извести, марганца, солей и других нерастворимых веществ на фильтре, трубах и насосе;
- образование биопленки вследствие наличия бактерий в воде;

— неправильный выбор погружного насоса, опускаемого в скважину для подъема воды из подземного водоносного пласта (недостаточная или слишком повышенная мощность насоса);

— повреждение всасывающего патрубка насоса или автоматики;

— неправильная эксплуатация насоса, длительные перебои в использовании насоса;

— деформация или разрушение обсадной трубы скважины из-за естественного её старения, смещения грунта или гидравлических ударов.

Для решения проблем увеличения дебита скважины и обеспечения оптимальной работы подземного водозабора, разработаны механические, химические и комбинированные методы, а также технологические решения для конкретных условий функционирования системы.

Выбор метода зависит от текущего состояния скважины, от причин снижения дебита скважины, от геологии местности и причин падения уровня подземных вод, от эксплуатации оборудования.

Механические и импульсные методы направлены на разрушение и удаление кольматирующих отложений (ила, песка, биологических загрязнений) с поверхности фильтра скважины и в префильтровой зоне. В процессе механической и гидродинамической очистки делается прокачка и промывка скважины, либо путем многократной откачки воды до появления чистого потока, либо подачей воды под высоким давлением с помощью гидродинамической установки.

Пневмоимпульсная и электрогидравлическая обработка скважины включает создание гидравлических ударов, которые помогают разрушать минеральные отложения на фильтрах и в порах грунта, улучшая прони-

цаемость водоносного слоя. Гидроудар — эффективный, но рискованный метод, который может привести к повреждению скважины. В процессе механической очистки используют пульсацию. Пульсирующие давление создают вибрацию, которая способствует удалению отложений и увеличивает подачу воды из скважины.

Для улучшения доступа воды из водоносного слоя к насосу делается перфорация обсадной трубы скважины, т. е. создание в этой трубе дополнительных отверстий.

Для удаления твердых примесей с внутренней поверхности фильтровой колонны применяют специальные механические щётки (ерши).

Химическая очистка скважины (химическая реанимация) основана на растворении колюматизирующих образований с помощью кислот (соляной или уксусной) и реагентов для растворения карбонатных отложений, оксидов железа и марганца, блокирующих работу скважины».

Для предотвращения коррозии металлических элементов скважины в кислоту добавляют ингибиторы (катапин, уникол).

Реагенты-нейтрализаторы — переводят нерастворимые гидроксиды и карбонаты металлов в растворимые соли. Реагенты-восстановители преобразуют нерастворимое трехвалентное железо в двухвалентное растворимое. Реагенты-комплексобразователи — образуют растворимые соединения железа и кальция (триполифосфат натрия, гексаметафосфат натрия).

После химической очистки скважина должна быть тщательно промыта чистой водой под давлением для удаления всех отложений.

Для поддержания расчетного расхода воды подземного водозабора, не реже одного раза в год, необходим технический анализ работы скважины и регулярные профилактические мероприятия: проведение лабораторных

анализов воды для оценки изменений ее химического состава; контроль качества воды в целях устранения загрязняющих веществ.

Для повышения эффективности работы водозаборного сооружения и снижения энергетических затрат применяют методы технической модернизации: подбор насоса с оптимальными характеристиками в соответствии со статическим и динамическим уровнем воды в скважине. Известно, что при работе погружного насоса большой или недостаточной мощности наблюдаются резкие колебания уровня воды в скважине. Все это снижает дебит скважины, изменяет параметры насоса, приводит к увеличению отложений и в результате к увеличению энергозатрат при откачках воды из скважин.

Регулярное техническое обслуживание скважинных насосов также является важным фактором оптимизации работы водозабора. Загрязнение рабочих частей насоса и другие причины приводят к снижению эффективности работы насоса, увеличению потребления электроэнергии, снижению срока службы насоса.

В процессе работы насоса важно следить за состоянием трубопровода и арматуры. Засорение труб, утечки и другие неисправности приводят к снижению объема подаваемой воды, т. е. к снижению дебита скважины.

В настоящее время ведутся научные и практические исследования по оптимизации режимов работы водозаборов, направленные на увеличение производительности скважин при минимальных энергозатратах.

В связи с этим определенный интерес вызывают работы В. В. Ивашечкина и Ю. А. Медведевой (Белорусский национальный технический университет) по созданию двухколонных скважин с двумя независимыми фильтрами. Между коллекторами скважины выше и ниже фильтров устанавливаются соединительные перемычки (рисунок 1).

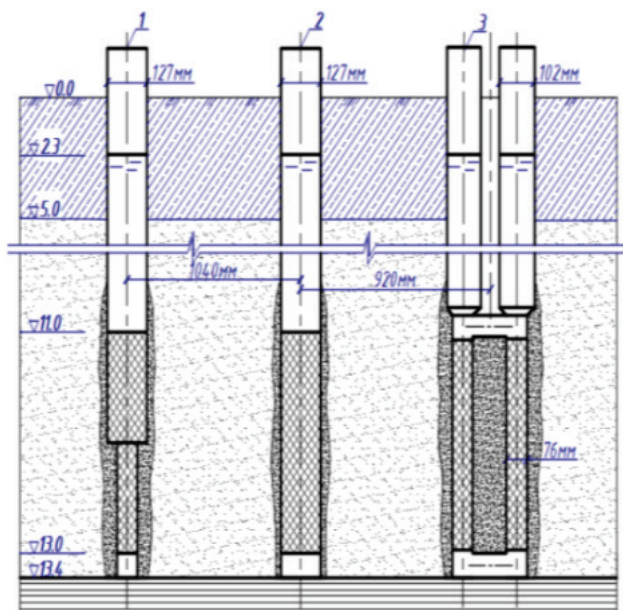


Рис. 1. Геолого-технические разрезы опытных скважин: 1 — одноколонная скважина с двухсекционным фильтром; 2 — одноколонная типовая скважина; 3 — двухколонная двухфильтровая скважина [1, с. 6]

В двухколонных двух фильтровых скважинах вместо одного погружного насоса большей мощности используется два менее мощных. Один из насосов выполняет основную нагрузку- подъем воды из скважины на поверхность, второй насос включается в процесс в момент пиковой нагрузки. Такая схема позволяет организовать работу насосов таким образом, чтобы максимальная производительность скважины, при минимальных колебаниях уровня воды в скважине, осуществляется с минимальными энергозатратами.

В процессе работы таких скважин из-за наличия двух фильтров снижается интенсивность кольматации скважины, повышается надежность конструкции скважины.

Повышение эффективности работы скважины при минимальных энергетических и прочих затратах на подъем воды требует комплексного подхода к данной проблеме, включая регулярное обслуживание, использование современных технологий химической и механической очистки скважин и модернизацию конструкции скважины.

Литература:

1. Медведева, Ю. А. Двухколонные двух фильтровые водозаборные скважины и методы восстановления их дебита: специальность 05.23.04 «водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водные ресурсы»: автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / Медведева Юлия Александровна; Белорусский нац. технический ун-т. — Минск, 2024. — 27 с. — Текст: непосредственный.
2. Ивашечкин, В. В. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. — Текст: непосредственный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. — 2022. — № 5. — С. 451–462.
3. Ивашечкин, В. В. Двухколонная водозаборная скважина и расчет режимов ее работы / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. — Текст: непосредственный // Горный журнал. — 2022. — № 4. — С. 57–61.
4. Медведева, Ю. А. Новая конструкция двухколонной двухфильтровой скважины для забора подземных вод и бесперебойной и надежной доставки воды потребителям / Ю. А. Медведева, В. В. Ивашечкин. — Текст: непосредственный // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. — 2020. — № 5. — С. 50–55.

Электрофизические методы мониторинга асфальтобетонных дорожных покрытий

Крохмаль Сергей Сергеевич, студент;

Бахарев Артем Александрович, студент

Научный руководитель: Кириллов Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент
Институт транспорта и сервиса г. Сочи (Краснодарский край)

Настоящая статья, являясь обзорно-аналитической, имеет целью рассмотрение современного состояния научных исследований в области электрофизических методов исследования дорожных строительных материалов и мониторинга асфальтобетонных дорожных покрытий. В рамках поставленной цели рассмотрены: 1) вопросы связи физико-механических свойств асфальтобетонной смеси (асфальтобетонного дорожного покрытия) с ее электрофизическими свойствами; 2) методы, приборы и техника электрофизического исследования (мониторинга) состояния асфальтобетонных дорожных покрытий.

Ключевые слова: адгезия, когезия, диэлектрическая проницаемость, неразрушающий контроль, асфальтобетон, дорожное покрытие, коаксиальный пробник, механоэлектрический метод, электроемкостной метод, георадиолокация.

Введение

Поскольку площади автомобильных дорог исчисляются тысячами квадратных километров, то достоверный контроль качества автомобильных дорог базируется на результатах многочисленных измерений основных контролируемых показателей с последующей обработкой результатов с помощью математической статистики. Большое число измерений основных контролируемых параметров

приводит к весьма значительным затратам труда и времени, поэтому актуальна задача разработки и применения экспресс- методов или автоматического контроля.

В основе существующих методов дефектоскопии лежит исследование физических свойств материалов при воздействии на них рентгеновских, инфракрасных, ультрафиолетовых и гамма-лучей, радиоволн, ультразвуковых колебаний, магнитного и электростатического полей и др.

Достоинство электрофизических методов в том, что

1) электрофизические свойства материалов и конструкций отличаются быстротой и относительной простотой измерений;

2) тесно связаны с составом, плотностью, прочностными показателями, которые необходимо контролировать в соответствии с требованиями материаловедения.

Как отмечают авторы [1] «электрофизические свойства материалов и конструкций отличаются быстротой измерений, тесно связаны с составом, плотностью, прочностными показателями, которые необходимо контролировать в соответствии с требованиями материаловедения». На практике определяется графическая взаимосвязь или находится уравнение регрессии между результатами быстро-измеряемых электрофизических показателей и показателями регламентированных свойств материалов. В случае сильной корреляции показателей такие графики (или уравнения) используют в качестве калибровочной зависимости интересующего свойства материала от его электрофизического показателя.

Рассмотрим некоторые используемые на практике «электрофизические» методы мониторинга состояния дорожных покрытий: электроемкостный, зондовый (коаксиальный пробник), георадарный. А также обратим внимание на один перспективный, находящийся на стадии теоретических и экспериментальных исследований метод неразрушающего контроля диэлектрических материалов — механоэлектрический.

1. Связь механических и электрофизических свойств дорожных строительных материалов

Связь механических и электрофизических свойств материалов рассмотрим на примере такого явления как адгезия.

В физике адгезия определяется, как сцепление поверхностей разнородных твердых и/или жидких тел, и обусловлена межмолекулярными взаимодействиями в поверхностном слое (на границе раздела фаз).

Адгезия — это межфазное взаимодействие, приводящее к уменьшению поверхностной энергии системы. Количественной мерой процесса сцепления битума с поверхностью минерального материала служит работа адгезии, пропорционально которой изменяется сцепление битума с минеральным материалом.

Адгезия матрицы и наполнителя композитов (композиционных материалов) является также одним из важнейших факторов, влияющих на их прочность. Асфальтобетон — это композиционный материал, состоящий из минеральных частиц (размером от нескольких микрон до десятков миллиметров), соединенных всего несколькими процентами битума. Поэтому адгезионные свойства дорожного битума, безусловно, влияют на качество асфальтобетонной смеси, определяя прочностные характеристики этого композиционного материала. Адгезия битумного вяжущего к минеральным материалам является параметром, определяющим долговечность строительных

конструкций и покрытий дорог. Таким образом, исследования адгезионных свойств асфальтобетона, несомненно, являются актуальными.

Исследования [2–6] показали, что такие свойства, как адгезия A и диэлектрическая проницаемость ϵ битумов коррелируются. Это, по мнению авторов [2], позволяет использовать диэлектрическую проницаемость как показатель для оценки качества битумного вяжущего и значительно интенсифицировать процесс определения адгезионных свойств битумов.

Данную корреляцию на качественном уровне достаточно легко объяснить с помощью электрической теории адгезии. С точки зрения электрической теории «адгезионные силы» имеют электрическую природу и вызваны образованием электрического поля на границе раздела пленки битума и твердого минерального материала. Эта ситуация тождественна притяжению разноименно заряженных обкладок конденсатора. Энергия электрических и, соответственно, «адгезионных» сил равна:

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 V E^2}{2}, \quad (1)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, V — объем области пространства, в которой сосредоточено электрическое поле напряженностью E .

Таким образом, на основании вышесказанного и соотношения (1) можно заключить, что адгезия $A \sim \epsilon$.

С уменьшением толщины d пленки вяжущего на минеральном материале адгезия увеличивается по гиперболическому закону [7], что также объясняется с помощью выражения (1), записанного в виде:

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d}. \quad (2)$$

В выражении (2) площади пленки S сопоставлена площадь пластин конденсатора, толщине пленки d — расстояние между обкладками конденсатора, $U=E/d$ — электрическое напряжение на обкладках конденсатора.

Кроме адгезионных свойств битума на долговечность битумных материалов влияют также его когезионные свойства [8]. В отличие от сил адгезии, действующих между частицами разных фаз, силы когезии действуют между частицами внутри фазы. Для оценки когезионных свойств битума использовался показатель диэлектрической проницаемости. Когезионные свойства битума, как и адгезионные, зависят от полярности его компонентов. Известно, что когезионные связи возникают благодаря межмолекулярным взаимодействиям надмолекулярных структур вследствие полярности частиц и наличию парамагнитных центров. Диэлектрическая проницаемость косвенно характеризует степень полярности частиц материала, а также количество полярных и парамагнитных частиц в единице объема вещества. Поэтому диэлектрическая проницаемость, как параметр, характеризующий структурные свойства в объеме материала, может использоваться для косвенной оценки когезионных свойств битума.

Механоэлектрический метод неразрушающего контроля диэлектрических материалов

Группой ученых Национального исследовательского Томского политехнического университета и Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Фурса Татьяна Викторовна, Люкшин Борис Александрович и др.) ведутся разработки неразрушающих методов контроля на основе явления механоэлектрических преобразований [9–14].

Электрический сигнал из гетерогенных диэлектрических материалов представляет собой ток смещения, возникающий при деформации и смещении источником механоэлектрических преобразований — акустической волной, формирующейся в образцах конечных размеров при импульсном механическом возбуждении.

Акустические волны формируются в образце конечных размеров при его ударном возбуждении. Электрическое поле возникает за счет появления зарядов на гранях пьезокварца, содержащегося в минеральной части бетонных смесей (мелком и крупном заполнителе, например, в речном песке и гравии), при его деформации и за счет смещения этих зарядов и зарядов двойных электрических слоев, расположенных на границах компонентов в гетерогенном материале, относительно электрического приемника.

Установлены связи параметров электромагнитных процессов, возникающих в образце при импульсном воздействии, с характером возникающего нестационарного напряженно-деформированного состояния (НДС) в окрестности дефекта или границы областей неоднородного образца. Например, в работе [14] предложена физико-математическая модель электрического отклика на упругое ударное возбуждение пьезосодержащих гетерогенных материалов. С использованием аппарата механики сплошных сред теоретически рассчитаны параметры электрического сигнала при импульсном воздействии на диэлектрический образец, содержащий пьезоэлектрическое включение, и получена сходимость с экспериментальными результатами. По результатам численного моделирования были получены характеристики упругих волн (смещение, скорость смещений, деформация), формирующихся в образцах гетерогенных материалов (в том числе и содержащих структурные неоднородности и дефекты) при импульсном механическом возбуждении. На основе этих результатов с использованием предложенной модели производился расчет электрического сигнала. Сопоставление результатов расчета по предложенной модели с экспериментально измеренным электрическим откликом на ударное возбуждение материала дает возможность определять средний размер фракций пьезоэлектрических включений, концентрацию пор и размер дефектов (трещин) в пьезосодержащих гетерогенных материалах.

В работе [9] на основе проведенных экспериментальных исследований разработан алгоритм неразрушающего контроля прочности бетона по параметрам электрического отклика на упругое ударное возбуждение. Погрешность

определения прочности с использованием предложенного алгоритма составляет для тяжелого бетона 9 %.

В [12] проведены исследования связи концентрации дефектов в виде искусственных воздушных полостей в бетоне с параметрами электрического отклика на ударное воздействие. Показано, что в качестве диагностического критерия определений концентрации воздушных полостей в бетоне может быть использовано смещение по частоте, при котором наблюдается максимальный коэффициент взаимной корреляции спектров электрических откликов из дефектного и бездефектного образцов.

Данная методика наиболее эффективна для материалов, содержащих включения природного кварца (типичными представителями таких материалов являются бетоны и горные породы), т. к. как было показано в [13], составляющая, связанная с пьезоэлектрическим эффектом, значительно превалирует над составляющей, связанной с возбуждением двойных электрических слоев.

Емкостный метод контроля асфальтобетонных дорожных покрытий

В работе [1] показана целесообразность выполнения быстрой диагностики плотности и шероховатости асфальтобетонных покрытий на основе использования косвенных емкостных измерений.

Емкостный принцип определения влажности строительных материалов положен в основу экспресс-метода для ускоренных анализов с помощью прибора ВИС-2.21, выпускаемого Челябинским предприятием «Интерприбор». В основе данного типа влагомера и любого другого диэлектрического измерителя влажности лежит зависимость диэлектрической проницаемости материала от его влажности. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость воды значительно больше, чем у бетона, песка, глины и т. д. Таким образом, чем больше измеренная диэлектрическая проницаемость, тем больше в этом материале влаги. Этот прибор, отличающийся быстротой действия неразрушающего косвенного контроля влажности, градуирован в показателях влажности отдельно для различных материалов с достаточной точностью, в связи с тем, что диэлектрическая проницаемость воды значительно больше показателей диэлектрической проницаемости используемых в строительстве материалов. Горячие асфальтобетонные смеси не содержат влаги, и компоненты смесей характеризуются различными величинами диэлектрической проницаемости, поэтому существует возможность использования емкостного метода оценки плотности и шероховатости асфальтобетонных покрытий прибором ВИС-2.21 (рис. 1).

Коаксиальный пробник

Фирма Agilent Technologies [15] предлагает следующий метод для измерения параметров — коаксиальный пробник (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид электроемкостного прибора ВИМС-2.21

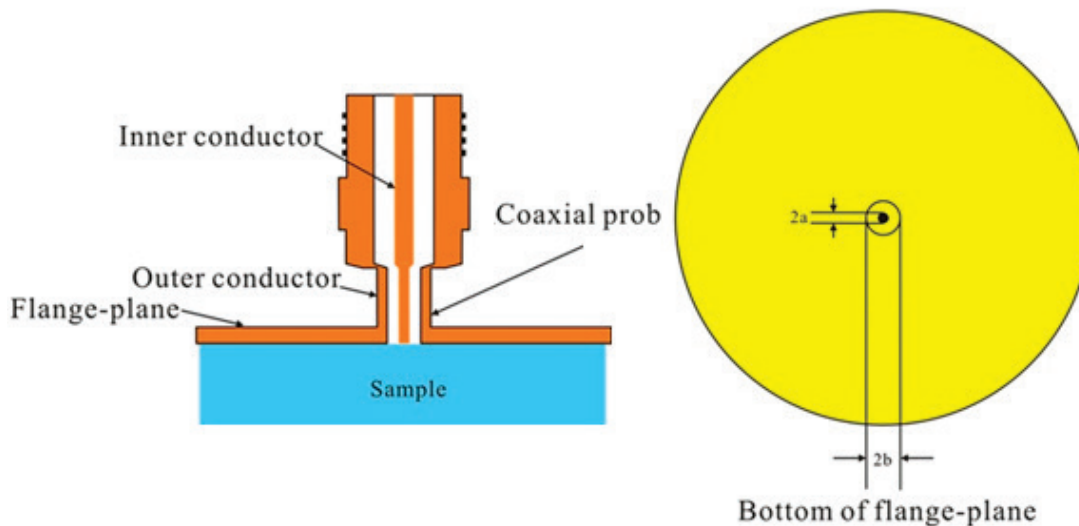


Рис. 2. Коаксиальный пробник

Свойства материала измеряются касанием пробником плоской поверхности твердого (или порошкового) материала (рис. 3а). Структура полей на конце пробника искажается, как только они входят в контакт с испытуемым материалом (рис. 3б). Отраженный сигнал (S) может быть измерен и связан с диэлектрической проницаемостью (ϵ_r) (рис. 3в). Типичная измерительная система, использующая метод коаксиального пробника, состоит из анализатора цепей или импеданса, коаксиального пробника и программного обеспечения.

Установка с использованием коаксиальных пробников от компании Agilent Technologies представлена на рис. 4.

Модель эффективной среды и метод электрических эквивалентных схем

Главное достоинство композиционных материалов — это возможность проектирования материала с заданными свойствами, необходимыми для конкретной области применения. И, конечно же, модель временной эволюции

сложной динамической системы формирующегося материала не должна упускать из виду синергетику различных эффектов (термодинамических, механических, электромагнитных и др.). Поэтому при моделировании таких систем удобен междисциплинарный подход, объединяющий фундаментальные модели нелинейной динамики, эффективной среды и теорию электрических цепей в приложениях материаловедения [16].

Важную роль в физике композиционных материалов играет модель эффективной среды [17], заключающаяся в том, что композитная среда, как совокупность кластеров, представляется однородной средой, обладающая теми же усредненными (эффективными) свойствами (рис. 5). Иначе говоря, тем же уровнем поляризации. И, таким образом, достоинство данной модели в том, что, зная параметры каждого из компонентов композита, их геометрическую форму и концентрацию, можно определить характеристики полученной композиционной среды как целого. В этом случае отпадает необходимость решать соответствующие физические уравнения (уравнения теории

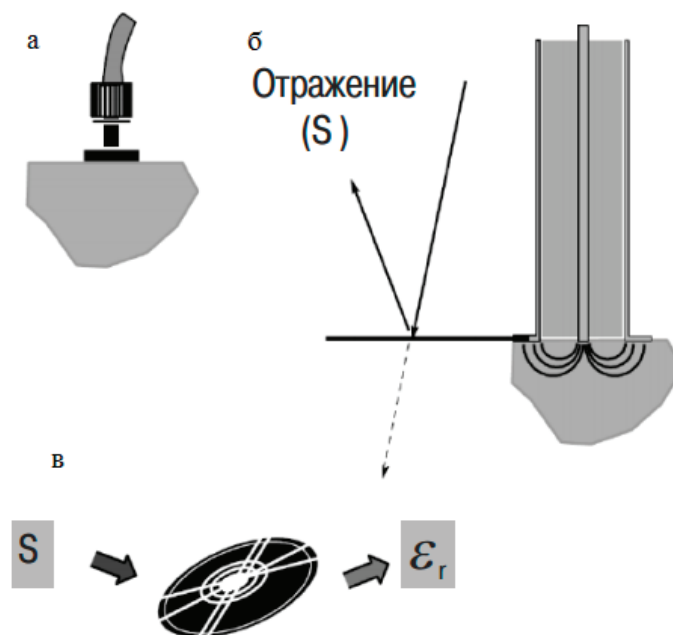


Рис. 3. Метод с использованием коаксиального пробника



Рис. 4. Установка с использованием коаксиальных пробников

упругости, уравнения Максвелла и др.) в каждой точке пространства.

Однако, очевидно, что это подход не позволяет решать задачи на микроуровне, это могут быть, например, процессы зарождения и распространения микротрещин в асфальтобетонном дорожном покрытии.

Авторами [16] разработан программный комплекс [18], позволяющий рассчитывать частотные зависимости диэлектрической проницаемости композитной среды согласно моделям, учитывающим диэлектрическую проницаемость матрицы и диэлектрическую проницаемость включений (с учетом их объемной доли). Данный комплекс может быть

полезен для интерпретации результатов, получаемых в результате георадарных исследований автомобильных дорог.

Метод электрических эквивалентных схем

При анализе композиционных сред на также во многих случаях оказывается метод электрических эквивалентных схем, при котором электрические, механические и магнитные свойства представляются в виде электрических эквивалентов [19].

Конечно, асфальтобетонная смесь не является пьезоэлектрическим композитом (пьезоэффект проявля-

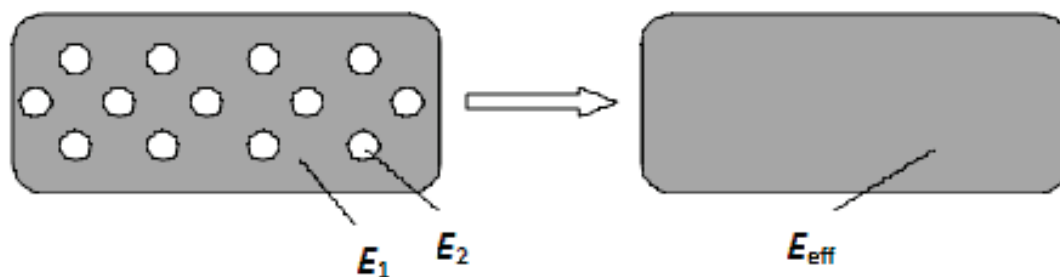


Рис. 5. Схематическое изображение эффективной среды
(в качестве примера параметра среды — модуль упругости E ;
 E_1 — модуль упругости матрицы, E_2 — модуль упругости включений,
 E_{eff} — эффективный модуль упругости композита)

ется далеко даже не во всех кристаллах, а только в 20 из 32 классов симметрии кристаллов). Однако данный подход может быть развит с привлечением других электроупругих эффектов. Это может быть, например, флексоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении электрического поля при деформации изгиба [20].

При применении данного метода композит представляется матрицей (рис. 6), каждая ячейка которой Z — это слоистая структура из проводящего материала и диэлектрика. В зависимости от физических свойств ячейка представляется какой-либо эквивалентной электрической схемой (рис. 6) [21, 22].

В работе [22] асфальтобетонная дорожная смесь моделировалась с помощью конденсатора слоистой структуры. Было показано, что такое моделирование дает результаты, описывающие эволюцию его диэлектрической проницаемости асфальтобетонного дорожного покрытия, хорошо согласующиеся с реальным поведением этого параметра в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Что в очередной раз подтверждает тот факт, что диэлектрическая проницаемость, коррелируя с адгезион-

ными и когезионными свойствами материала, может служить критериальным параметром для мониторинга состояния дорожных покрытий и оценки остаточного срока их службы.

Георадиолокация в практике автомобильных дорог

В последние годы в практике производственных работ значительное место занял относительно новый метод — метод подповерхностной георадиолокации. Георадар, представляет собой микропроцессорный геофизический прибор для проведения быстрого профилирования грунта. Основные достоинства метода (кроме относительной простоты проведения полевых работ) с точки зрения автодорожной отрасли:

- 1) возможность работы на ограниченных площадках, что очень важно при работах в пределах плотной городской застройки;
- 2) высокая разрешающая способность по вертикали и в плане (до нескольких сантиметров и первых десятков сантиметров, соответственно);

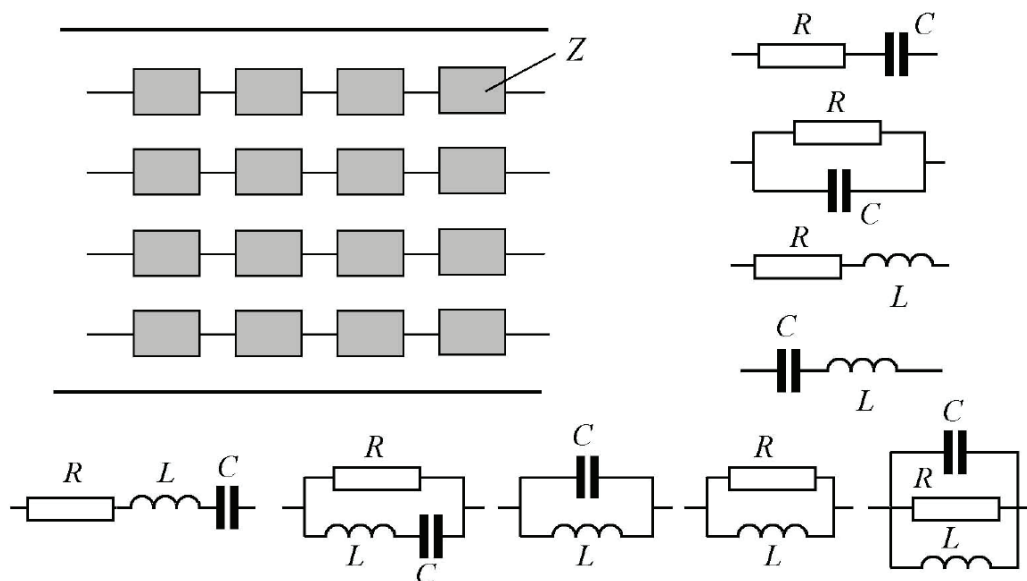


Рис. 6. Эквивалентные схемы включений в матрице [16]

3) возможность изучения самой верхней части разреза (до глубин порядка 15 метров), которая труднодоступна исследованию другими методами;

4) часто весьма наглядная форма получаемых данных (профили иногда напоминают «готовые» разрезы); 5-имеется возможность работать на пресноводных акваториях даже при незначительных глубинах воды, включая работы со льда. Вместе с тем, при инженерно-геологических исследованиях в городах имеется много задач, для решения которых эти особенности метода георадиолокации являются определяющими. С помощью метода георадиолокации эффективно решаются следующие основные задачи:

1. На начальной стадии строительства различных объектов (а также в качестве самостоятельной задачи) проводятся работы по обнаружению разнообразных коммуникаций и трубопроводов (теплотрасс, водопроводов, электрических кабелей, коллекторов).

2. Археологические исследования (поиск остатков фундаментов и привязка их на местности, обнаружение подвалов, захоронений и т. д.).

3. Обнаружение уровня грунтовых вод и участков локального повышенного увлажнения.

4. Изучение геологических особенностей верхней части разреза с высокой разрешающей способностью.

5. Изучение глубины залегания и морфологии кровли коренных пород при строительстве разнообразных сооружений на пресноводных акваториях.

6. Поиск ослабленных зон в верхней части разреза, с которыми часто связаны просадки грунта и деформации различных инженерных сооружений (зданий, автомобильных дорог, железнодорожных насыпей и т. д.).

7. Изучение толщин конструктивных слоев различных покрытий автомобильных дорог с целью их соответствия проектной документации и, в дальнейшем, проведение мониторинга.

8. Обследование строительных конструкций (толщин стен и перекрытий, наличие трещин, арматуры) и, при наличии деформаций выяснение причин их образования.

В настоящее время при проведении георадиолокационных исследований наиболее часто используется аппаратура следующих марок: георадары серии «ОКО» (группа компаний «Логис-Геотех», г. Жуковский); георадары серии «ЗОНД», «ПРОФИЛЬ», «ЛУЧ» (НПФ «Радарные системы», г. Рига, Латвия); георадары серии «SIR» (фирма «Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI)», США). Технические характеристики указанных георадаров сопоставимы, различия заключаются лишь в дополнительных опциях, программах сбора и обработки данных. В зависимости от выполняемой задачи рабочая частота электромагнитных волн меняется от нескольких десятков мегагерц до 1500–2000 мегагерц, что выполняется подбором соответствующей антенны. Увеличение рабочей частоты приводит к увеличению разрешающей способности, но к падению глубинности исследований. Снятие радарограмм может происходить как в режиме пешеходной съемки,

так и в автомобильном режиме, используемом для изучения протяженных объектов (автомобильные дороги, железнодорожные насыпи и взлетно-посадочные полосы аэродромов и др.). В последнем случае используются специальные антенны с отрывом от поверхности земли (рупорные), расположенные на автомобилях.

Заключение

Из приведенного в статье обзора можно сделать следующие выводы

1. Контроль качества автомобильных дорог требует проведения многочисленных измерений основных контролируемых показателей с последующей обработкой данных с помощью математической статистики. Это связано с большими площадями дорог и значительными трудозатратами и временем на традиционные методы.

2. Электрофизические методы контроля обладают рядом преимуществ: они отличаются быстротой и относительной простотой измерений, а их результаты тесно связаны с составом, плотностью и прочностными показателями материалов. На практике часто определяют графическую взаимосвязь или уравнение регрессии между быстро измеряемыми электрофизическими показателями и регламентированными свойствами материалов. Такие зависимости используют в качестве калибровочной модели для определения интересующих свойств.

3. Среди электрофизических методов мониторинга состояния дорожных покрытий упоминаются:

1) Электроёмкостный метод. Позволяет быстро диагностировать плотность и шероховатость асфальтобетонных покрытий. Основан на измерении диэлектрической проницаемости среды, контактирующей с датчиком. Метод применим для горячих смесей при температурах выше 100 °С.

2) Зондовый (коаксиальный пробник) метод. Также относится к электрофизическим методам контроля.

3) Георадарный метод. Используется для проверки толщины конструктивных слоёв дорожной одежды и грунта земляного полотна, оценки однородности дорожно-строительных материалов, качества уплотнения и влажности грунтов.

4) Механоэлектрический метод. Находится на стадии теоретических и экспериментальных исследований. Он основан на преобразовании энергии механического возбуждения в энергию электромагнитного поля на структурных неоднородностях и дефектах в композиционных материалах. Метод позволяет бесконтактно регистрировать сигналы, что снижает проблему надёжности контакта.

4. Связь механических и электрофизических свойств материалов рассматривается на примере адгезии битумного вяжущего к минеральным материалам. Исследования показали корреляцию между адгезией и диэлектрической проницаемостью битумов, что позволяет использовать диэлектрическую проницаемость как по-

казатель для оценки качества битумного вяжущего и интенсификации процесса определения его адгезионных свойств.

Таким образом, современные методы контроля качества дорог сочетают технологические инновации

(электрофизические, георадарные технологии) с анализом взаимосвязи электрофизических и механических свойств материалов, что позволяет повысить эффективность мониторинга и диагностики состояния дорожных покрытий.

Литература:

1. Романов С. И., Стадник А. Ю. Универсальный электроемкостный метод и компактный прибор для автоматического контроля плотности и шероховатости асфальтобетонных дорожных покрытий // Интернет-вестник ВолгГАСУ. — 2013. — № 2(27). — С. 29. — EDN RXHKQB.
2. Кортянович К. В., Евдокимова Н. Г., Жирнов Б. С. Диэлектрическая проницаемость как показатель характеризующий адгезионные свойства битумов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. № 2.
3. Горелов, С.В., Гольцов Ю. И., Строев Д. А. Исследование взаимосвязи диэлектрической проницаемости битумного вяжущего с его физико-механическими свойствами // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2006. — № 34–35. — С. 127–129. — EDN NEEIMX.
4. Субботин И. В. Применение ультразвуковой активации битума на асфальтобетонных заводах // Интернет-журнал Науковедение. — 2012. — № 4(13). — С. 104. — EDN PVXFUZ.
5. Кортянович К. В. Улучшение свойств дорожных битумов модифицирующими добавками. Кандидатская диссертация. Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2007.
6. Евдокимова Н. Г. Разработка научно-технологических основ производства современных битумных материалов как нефтяных дисперсных систем: специальность 05.17.07 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Евдокимова Наталья Георгиевна. — Москва, 2015. — 417 с. — EDN VQIPHH.
7. Башкарев А. Я., Беспалова Н. Н. Изменение прочностных и адгезионных свойств битума под воздействием температурно-временного фактора // Современное машиностроение. Наука и образование. — 2014. — № 4. — С. 650–659. — EDN SMNKVF.
8. Емельянычева Е. А. Модификация дорожных битумов полимерными и органоминеральными добавками: специальность 02.00.13 «Нефтехимия», 02.00.11 «Коллоидная химия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Емельянычева Елена Анатольевна. — Казань, 2011. — 145 с. — EDN QFSISJ.
9. Фурса Т. В., Осипов К. Ю., Данн Д. Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // Дефектоскопия. — 2011. — № 5. — С. 39–47. — EDN NVALVN.
10. Беспалько А. А., Люкшин Б. А., Уцын Г. Е., Яворович Л. В. Электромагнитный отклик слоистых диэлектрических структур на импульсное акустическое воздействие // Известия вузов. Физика. — 2015. — Т. 58, № 4. — С. 120–126. — EDN TVWJHL.
11. Уцын Г. Е., Фурса Т. В. Математическое моделирование механоэлектрических процессов в диэлектрических материалах // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 томах, Томск, 26–29 апреля 2016 года. Том 1. — Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. — С. 289–291. — EDN WHCCVZ.
12. Фурса Т. В., Данн Д. Д. Разработка метода контроля концентрации воздушных полостей в бетоне по параметрам электрического отклика на ударное воздействие // Дефектоскопия. — 2015. — № 10. — С. 3–7. — EDN VLFERV.
13. Фурса Т. В., Данн Д. Д. Механоэлектрические преобразования в гетерогенных материалах, содержащих пьезоэлектрические включения // Журнал технической физики. — 2011. — Т. 81, № 8. — С. 53–58. — EDN RCUDWF.
14. Фурса Т. В., Люкшин Б. А., Уцын Г. Е. Связь электрического отклика с характеристиками упругих волн при ударном возбуждении гетерогенных диэлектрических материалов, содержащих пьезоэлектрические включения // Журнал технической физики. — 2013. — Т. 83, № 2. — С. 115–118. — EDN RCUNRF.
15. Agilent Technologies. Основы измерения диэлектрических свойств материалов. Заметки по применению. Agilent Technologies. 2010. — 32 с.
16. Корчагин С. А., Терин Д. В., Романчук С. П. Синергетика математических моделей для анализа композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2015. — Т. 23, № 3. — С. 55–64. — DOI 10.18500/0869–6632–2015–23–3–55–64. — EDN VKXWXP.
17. Виноградов А. П. Электродинамика композитных материалов. М.: Эдиториал УРСС, 2001, 208 с. Vinogradov A. P. Electrodynamics of composite materials. M.: Editorial URSS, 2001. P.208 (In Russian)
18. Романчук С. П., Терин Д. В. Свидетельство № 2014615533 РФ. Программный комплекс «Математическое моделирование и многокритериальный анализ нелинейных свойств композиционных материалов на основе эффек-

- тивной среды»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: заявитель и патентообладатель Романчук С. П., Терин Д. В. -№ 2014612918/69; заявл. 02.04.2014; зарегистр. 28.05.2014 [1] с.
19. Пукинский Ю. Ж., Филиппов А. В. Эквивалентная электрическая схема двухфазного магнитострикционно-пьезоэлектрического композита в области электромеханического резонанса // Вестник Новгородского государственного университета. — 2010. — № 55. — С. 44–46. — EDN MSTEGZ.
 20. С. М. Шандаров, Н. И. Буримов, С. С. Шмаков, П. В. Зуев, А. Е. Урбан, В. С. Горбачев, Ю. Ф. Каргин, В. В. Шепелевич. Вклад обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в титанате висмута // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2012. — Т. 76, № 12. — С. 1452. — EDN PNRTKZ.
 21. Поклонский Н. А., Горбочук Н. И. Основы импедансной спектроскопии композитов: Курс лекций. Минск: БГУ. 2005. С. 102
 22. Kirillov A. M. Dielectric Constant of Asphalt Concrete Pavement // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2020. — No. 4(89). — P. 8905. — DOI 10.18720/CUBS.89.5. — EDN WURQHS.

Оценка образования микропластика при механическом воздействии на пластиковые бутылки и контейнеры: модель индекса микропластика и экспериментальное исследование

Лукин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент
Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск)

В статье рассматривается процесс образования микропластика при механическом воздействии на пластиковые бутылки и контейнеры, в частности при многократном открытии и закрытии крышек. Для прогнозирования объёма и размера образующихся частиц предложена модель индекса микропластика (MPI), позволяющая оценить минимальный размер частиц и их суммарный объём в зависимости от затраченной энергии. Проведено численное моделирование контактного взаимодействия крышки и бутылки, а также экспериментальное исследование с использованием красителя Nile Red для идентификации микропластика. Показано, что основной вклад в образование частиц вносит трение между крышкой и горлышком, а не сам корпус бутылки. В работе предложены усовершенствования методики отбора проб, повышающие достоверность обнаружения микропластика. Полученные результаты сопоставлены с данными других исследований, подчёркнута необходимость стандартизации протоколов тестирования.

Ключевые слова: микропластик, пластиковая бутылка, крышка, механическое воздействие, моделирование, контактное взаимодействие, PET, PP, стандартизация.

Для прогнозирования объёма образующегося микропластика и размера его частиц используется модель индекса микропластика (MPI), предсказывающая минимальный размер частиц и их суммарный объём, которые могут образоваться в результате удара или износа на Дж затраченной энергии. В свою очередь является параметром пластиков, указывающий на тенденцию образования микропластика: высокую (высокий MPI) или низкую (низкий MPI).

Уравнения для износа выглядят следующим образом:

$$MPI_W = \log \left(\frac{Vol_{\mu P} / J}{Vol_{частица}} \right) = \log \left(\frac{\text{Количества частиц}}{J} \right) = \log \left(\frac{V_W}{\frac{1}{6} \pi \delta_W^3} \right) \quad (1)$$

где:

V_W — объём микропластика образующегося при износе (мкм³)

δ_W — минимальные размеры частиц при износе (мкм);

$$\delta_W = \frac{12EW}{(1 - \nu^2)\sigma_s^2} \quad (2)$$

E — модуль Юнга (МПа);

W — работа когезии, которая представляет собой энергию, необходимую для разделения материала на две части, и может быть получена из поверхностной энергии $W = 2\gamma_{\text{Surf}}$ (Дж/м²);

ν — коэффициент Пуассона;

σ_s — напряжение сдвига (МПа).

Для качественного определения образования микропластика в программе ANSYS 2024 R2, в модуле Transient Structural нами были смоделированы и изучены процессы контактного взаимодействия пластиковой бутылки с крышкой, а также пластикового контейнера с крышкой в процессе «закрытие» [1, 2].

Материалы исследуемых изделий:

- Бутылка, контейнер, крышка контейнера — РЕТ (Полиэтилентерефталат);
- Крышка бутылки — РР (Полиэтилен низкого давления).

Характеристики материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Материал	Плотность кг/м ³	Модуль Юнга Е (ГПа)	Коэффициент Пуассона	Предел прочности $\sigma_{\text{и}}$ (Мпа)	Предел текучести $\sigma_{\text{у}}$ (Мпа)
РЕТ	1380	2,41	0,43	170	55
РР	950	1,43	0,43	33	25

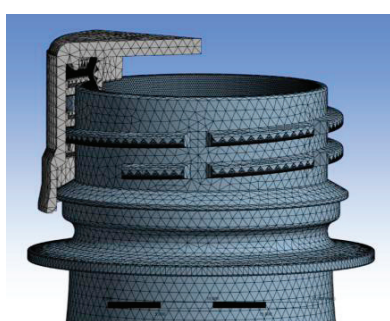
Коэффициент трения μ для контакта РЕТ/РР принимаем 0,15, для контакта РР/РР принимаем 0,25.

Все характеристики материалов были взяты для комнатной температуры $t=22^{\circ}\text{C}$.

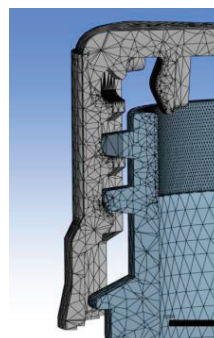
На рис. 1 и 2 представлены 3D-модели пластиковой бутылки и пластикового контейнера в начале и в конце движения процесса «закрытие».

Для взаимодействия пластиковой бутылки с крышкой главным движением являлось проворачивание крышки вокруг бутылки с последующим линейным движением по резьбе вниз.

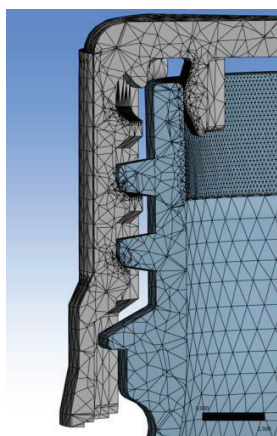
Для взаимодействия пластикового контейнера с крышкой главным и единственным движением являлось опускание крышки вниз до упора.



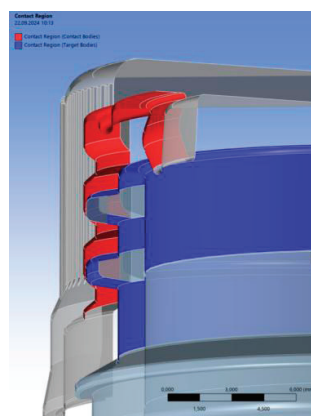
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. 3D-модель пластиковой бутылки в процессе «закрытие»

а) общая геометрия б) резьбовое зацепление в начале движения в) резьбовое зацепление в конце движения г) контактная пара

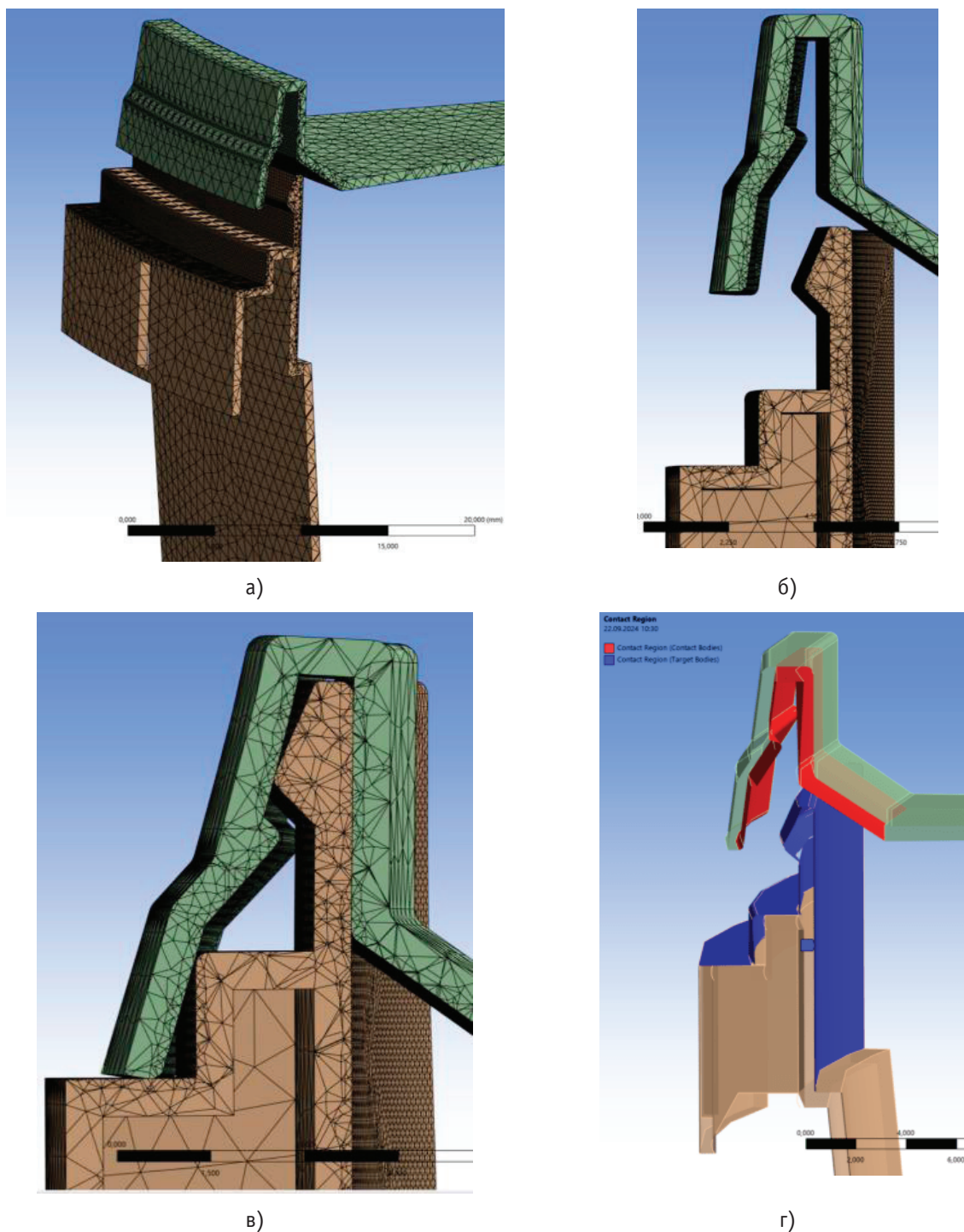


Рис. 2. 3D-модель пластикового контейнера в процессе «закрывание»

а) общая геометрия б) геометрия начале движения в) геометрия в конце движения г) контактная пара

Результаты расчетов контактного взаимодействия для обеих моделей представлены на рисунках 3 и 4 в виде графиков напряжения трением (напряжение сдвига) и расстояния скольжения контактных пар.

По мере проворачивания крышки вокруг бутылки с ее последующим линейным движением по резьбе вниз напряжения сдвига увеличивается в моменте соприкосновения воротника крышки с горловиной бутылки, достигая максимальных значений до 9 Мпа.

Последующее некоторое уменьшение напряжения сдвига контакта после достижения им максимального значения связано с отгибанием воротника крышки и последующим уменьшением усилия давления на горловину бутылки.

Расстояние скольжения увеличивается пропорционально по мере закрывания бутылки и достигает своего максимального значения к концу движения.

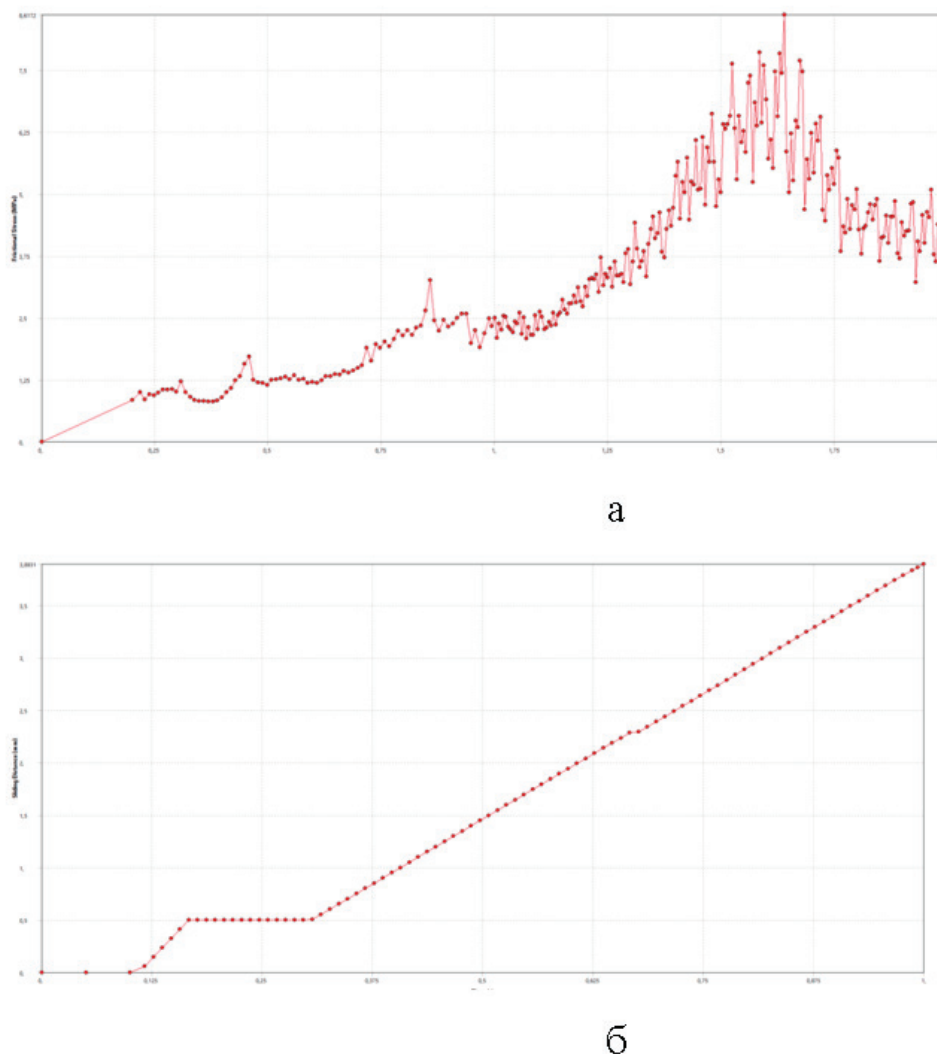


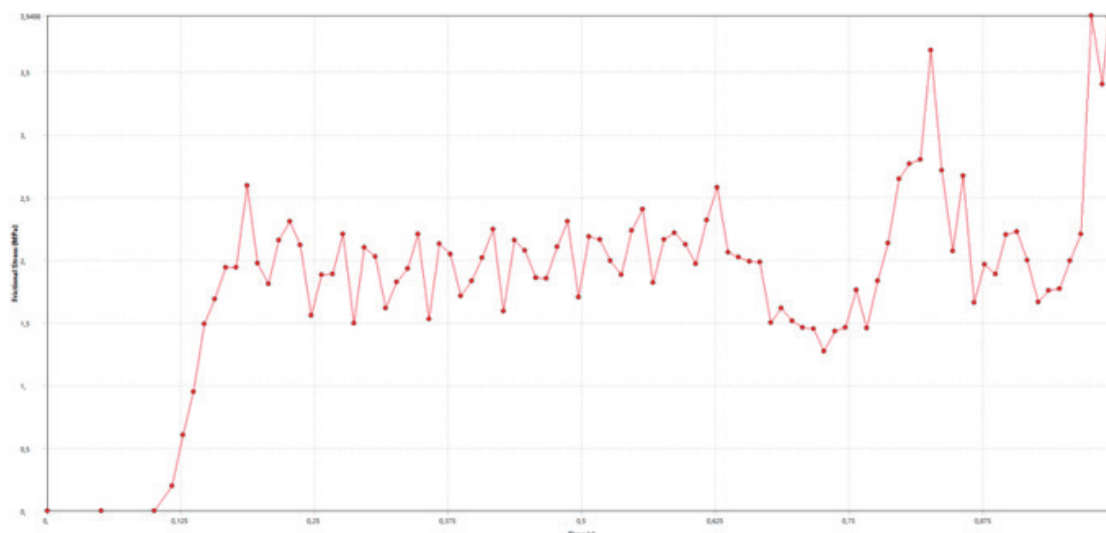
Рис. 3. Графики напряжения трением (а) и расстояние скольжения (б) в процессе закрывания пластиковой бутылки

Для данного исследования были одновременно закуплены две упаковки одноразовых пластиковых емкостей для воды, произведенных крупным поставщиком бутылированной продукции. Каждый ящик содержал 24 индивидуальные бутылки, изготовленные из полиэтилентерефталата (ПЭТ). В рамках эксперимента емкости из обеих упаковок распределялись случайным образом, чтобы исключить влияние возможных различий между отдельными партиями на конечные результаты.

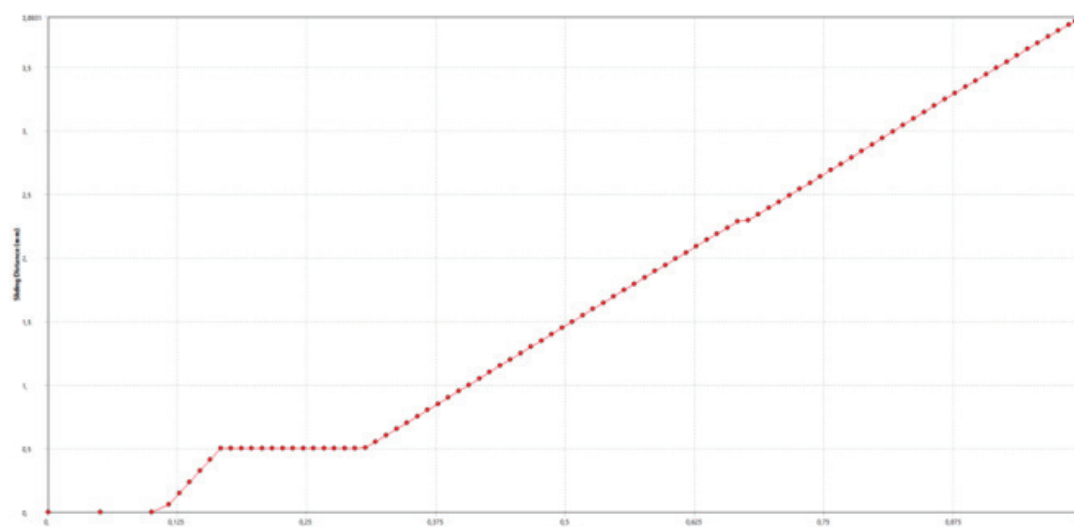
Крышки бутылок подвергались открыванию и закрыванию по 1, 5, 10 и 15 раз, после чего проводился анализ количества образующихся частиц за один цикл манипуляции. В случаях, когда операция осуществлялась более одного раза, колпачок полностью ослаблялся, но не снимался с горлышка, после чего вновь затягивался. Данная процедура применялась для предотвращения попадания окружающего воздуха внутрь емкости в процессе повторных циклов. В дальнейшем под циклом открытия-закрытия понимается совокупность полного ослабления и последующего затягивания крышки, вне зависимости от того, отделялась ли она от бутылки между этими действиями.

Каждый такой цикл выполнялся приблизительно за пять секунд, а все операции проводились последовательно, так что выполнение 15 циклов занимало менее двух минут.

После завершения заданного количества циклов в каждую бутылку добавляли 5 миллилитров исходного раствора красителя NR с концентрацией 1 мг/мл, чтобы достичь рабочей концентрации 10 мкг/мл. Исходный раствор готовили на ацетоне (класс чистоты Pharmco HPLC-UV) и хранили в стеклянной таре при температуре + 4 °C между. Затем бутылки с водой снова закрывали крышками и помещали в горизонтальное положение на 30-минутный инкубационный период с красителем, чтобы обеспечить маркировку любых частиц микропластика, которые могли попасть в область контакта крышки с горлышком. После этого воду фильтровали с использованием вакуума через стеклянный микроволоконный фильтр Whatman (модель 934-АН, производства GE Healthcare Life Sciences, с порами размером 1,5 микрона). Во время фильтрации бутылку поворачивали вокруг своей оси четыре раза, чтобы гарантировать смыл всех частиц с внутренней поверхности горлышка.



а)



б)

Рис. 4. Графики напряжения трением (а) и расстояние скольжения (б) в процессе закрывания пластикового контейнера

Вся стеклянная лабораторная посуда, применяемая в экспериментах, тщательно мылась после каждого использования. Непосредственно перед началом опытов стеклянные изделия дважды промывались деионизированной водой. Обработанные фильтры хранились в закрытых стеклянных чашках Петри для минимизации загрязнения. Кроме того, во время проведения экспериментов исследователь носил исключительно хлопчатобумажную одежду. Порядок выполнения различных повторных экспериментов был рандомизирован, чтобы свести к минимуму влияние любых систематических факторов, таких как накопление загрязнений на стеклянной посуде.

Линейная экстраполяция среднего количества частиц, позволяет получить значение перехвата, равное

351 частиц на литр (МП/л). Данная величина представляет собой оценку общего числа частиц, присутствующих в воде из всех возможных источников, за исключением частиц, образующихся в процессе открытия и закрытия крышки. Следовательно, частицы, появляющиеся при розливе воды в бутылки, высвобождающиеся с внутренних поверхностей бутылки в ходе розлива, транспортировки и обработки, а также любые загрязнения, возникшие в рамках данных экспериментов (включая загрязнение окружающего воздуха, частицы в используемых реагентах и частицы из стеклянной посуды), в совокупности дают указанное значение перехвата.

Сравнение среднего значения перехвата в 351 МП/л, со средней плотностью частиц лабораторного образца, составляющей 406 МП/л, позволяет сделать вывод, что

в среднем экспериментальное загрязнение, отраженное в лабораторных бланках, может полностью объяснить величину перехвата. Разница между значением перехвата и показателями лабораторных бланков составляет минус 55 МП/л. Таким образом, частицы, наблюдаемые в ходе всех проведенных тестов, скорректированные с учетом лабораторных бланков, вероятнее всего, образуются в процессе циклов открытия и закрытия крышки бутылки. Плотность частиц микропластика, принятая в данном исследовании, составляет 513 ± 102 (стандартная ошибка) МП/л при однократном открытии крышки, что определяется на основе наклона средней плотности частиц.

Как отмечалось ранее, значительные различия в уровнях частиц, о которых сообщается в разных исследованиях, продолжают оставаться проблемой для изучения микропластика (МП). Уровни МП, указанные в данной работе (406 МП/л) для частиц размером более 4,2 мкм, превышают значения, опубликованные в предыдущих исследованиях. Например, Mason S. A. и соавторы сообщили в среднем о 325 МП/л для частиц размером более 6,5 мкм, проанализировав 11 марок бутилированной воды [3]. Однако 19 % партий в их исследовании демонстрировали уровни МП выше, чем в данной работе. Winkler A. и соавторы указали значение 148 ± 253 МП/л для частиц размером более 6,5 мкм. Присущая вариабельность уровней МП в бутилированной воде, а также различия в процедурах и методах обнаружения между исследователями подчеркивают необходимость стандартизации протоколов тестирования [4].

Schymanski D. с соавторами обнаружили, что 99 %, 70 % и 69 % частиц соответственно, найденных в воде из одноразовых пластиковых бутылок, имели тот же состав, что и сама бутылка (полиэтилентерефталат, ПЭТ) и материалы пластиковой крышки (полипропилен, ПП, и полиэтилен, ПЭ) [5]. Вероятно, что вклад фоновое загрязнения, отраженного в лабораторных бланках, может

объяснить различия между количеством материалов бутылок и крышек, обнаруженных в этих исследованиях. Хотя состав частиц, образующихся в ходе циклов открытия и закрытия крышки, в данной работе не измерялся, основной вывод о том, что частицы образуются в результате истирания между бутылкой и крышкой, согласуется с результатами вышеупомянутых исследований. Этот вывод о доминирующей роли циклов открытия-закрытия крышки в образовании частиц также хорошо согласуется с данными Winkler A. и соавторов, которые обнаружили более 60 000 частиц на поверхности одноразовых крышек ПЭТ-бутылок после 100 циклов открытия-закрытия и не зафиксировали значительного увеличения количества частиц в воде при механическом воздействии на корпус ПЭТ-бутылки в течение 10 минут [4].

Процедура, использованная в данном исследовании для обнаружения МП с помощью Нильского Красного (NR), основана на методе, описанном Mason, S.A. и соавторами [3]. Два процедурных усовершенствования, вероятно, объясняют более высокий уровень МП, обнаруженный в данной работе по сравнению с предыдущими. Первое улучшение касается ориентации бутылки во время периода инкубации с NR. Рисунок 5 демонстрирует наиболее часто используемую конструкцию крышек для одноразовых ПЭТ-бутылок для воды. Воротник крышки плотно прилегает к внутреннему диаметру горлышка. Как показывают результаты данного исследования, все обнаруженные частицы МП, вероятно, генерируются вследствие циклов открытия-закрытия крышки. Поэтому разумно предположить, что многие частицы МП захватываются на границе раздела между воротником и горлышком. Размещение бутылок на боку в период инкубации с красителем обеспечивает возможность NR пометить частицы, все еще находящиеся на этой границе, тогда как сохранение бутылки в вертикальном положении исключает такую возможность.

Литература:

1. Лукин, А. А. Математическая модель склонности полимерных материалов к образованию микропластика при механическом воздействии / А. А. Лукин. — Текст: непосредственный // Экологический Вестник Северного Кавказа. — 2024. — № 1. — С. 5–9.
2. Лукин, А. А. Идентификация микропластика в бутилированной питьевой воде / А. А. Лукин, М. А. Тихоненко. — Текст: непосредственный // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. — 2023. — № 4. — С. 70–76.
3. Mason, S. A. Synthetic polymer contamination in bottled water / S. A. Mason, V. G. Welch, J. Neratko. — Текст: непосредственный // Frontiers in Chemistry. — 2018. — № 6.
4. Does mechanical stress cause microplastic release from plastic water bottles? / A. Winkler, N. Santo, M. A. Ortenzi [и др.]. — Текст: непосредственный // Water Research. — 2019.
5. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: release of plastic particles from different packaging into mineral water / D. Schymanski, C. Goldbeck, H. Humpf, P. Fürst. — Текст: непосредственный // Water Research. — 2018. — № 129. — С. 154–162.

Микропластик в плодоовощной продукции: источники, уровни и пути загрязнения

Лукин Александр Анатольевич, кандидат технических наук, доцент
Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск)

В статье представлены результаты исследования содержания микропластика в плодах и овощах (яблоки, помидоры, огурцы), приобретённых на рынках и в магазинах. Проанализированы 36 образцов, в которых обнаружено 110 частиц микропластика (в среднем $2,9 \pm 1,6$ частиц/г). Преобладающими формами были фрагменты (61,3 %), волокна (33,8 %) и плёнки (5,9 %), наиболее часто встречался микропластик чёрного цвета (45,5 %). Методом FTIR установлено, что основная доля полимеров — полиэтилен (60 %), а также полипропилен и полиэтилентерефталат (по 20 %). Обсуждаются возможные пути попадания микропластика в продукцию: из упаковочных материалов, через загрязнение почвы и в процессе хранения. Отмечены ограничения исследования, связанные с визуальной идентификацией частиц. Подчёркивается необходимость дальнейших исследований для оценки рисков для здоровья и разработки мер по снижению загрязнения.

Ключевые слова: микропластик, плодоовощная продукция, упаковка, загрязнение, полимеры, FTIR-анализ, источники загрязнения, продукты питания.

В настоящее время нет достаточной информации по проблеме накопления микропластиков в плодоовощной продукции.

Образцы фруктов (яблоки) и овощей (помидоры и огурцы) были приобретены в разных местах (2 рынка и 2 магазина). Места приобретения образцов получили наименование P_1 = Рынок 1, P_2 = Рынок 2, M_1 = Магазин 1 и M_2 = Магазин 2. Фрукты и овощи в продуктовом магазине были упакованы в потребительскую тару, а на рынке — на развес. Было закуплено по 3 образца каждого продукта.

В качестве потребительской тары использовались различные типы полимерной упаковки (рис. 1).



А) PET



Б) PS



В) PAP



Г) PET

Рис. 1. Образцы упаковочной тары

Всего было обнаружено 110 микропластиков (в среднем $2,9 \pm 1,6$ частиц/г) во всех образцах ($n=36$). Среднее содержание микропластика в различных продуктах по местам закупок представлено в таблице 1.

Таблица 1. Среднее количество микропластика во фруктах и овощах для каждого места покупки (среднее \pm частицы стандартного отклонения)

Место покупки	Помидоры	Огурцы	Яблоки
P_1	$3,8 \pm 0,6$	$3,6 \pm 3,3$	$3,4 \pm 0,7$
P_2	$3,2 \pm 0,7$	$4,0 \pm 0,8$	$2,1 \pm 0,7$
M_1	$3,9 \pm 0,5$	$2,2 \pm 1,1$	$3,4 \pm 2,2$
M_2	$2,3 \pm 2,4$	$4,6 \pm 0,9$	$3,1 \pm 0,9$

Учитывая разные места покупки, максимальное количество микропластика было обнаружено в M_1 (24 частицы), за которым следуют P_1 (23 частицы), P_2 (22 частицы) и M_2 (21 частица) соответственно. Статистической разницы между рынками и продуктовыми магазинами обнаружено не было ($p > 0,05$).

В общей сложности 61,3 % всех микропластиков представляли собой фрагменты, за которыми следовали волокна (33,8 %) и пленки (5,9 %) соответственно (рис. 2).



Рис. 2. Изображения частиц микропластиков, обнаруженных в плодах и овощах

Преобладающей группой был микропластик черного цвета (45,5 % образцов), за ним следовали серый (17,9 %), белый (15,5 %), синий (7,7 %), красный (6,8 %), зеленый (4,5 %) и желтый (1,9 %). Установлены статистически значимые различия между микропластиком черного цвета и всеми другими цветными группами ($p < 0,05$).

Увеличенные изображения микропластика, обнаруженного в проанализированных образцах, представлены на рисунке 3.

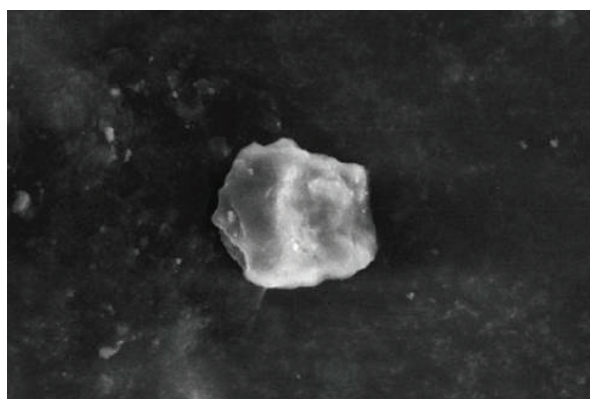


Рис. 3. Увеличенные изображения микропластика, обнаруженного в проанализированных образцах

Характеристика полимеров методом FTIR выявила наиболее высокую степень совпадения среди полимеров: PE — в 60 % образцов; PP — в 20 % образцов и PET — в 20 % образцов (рис. 4).

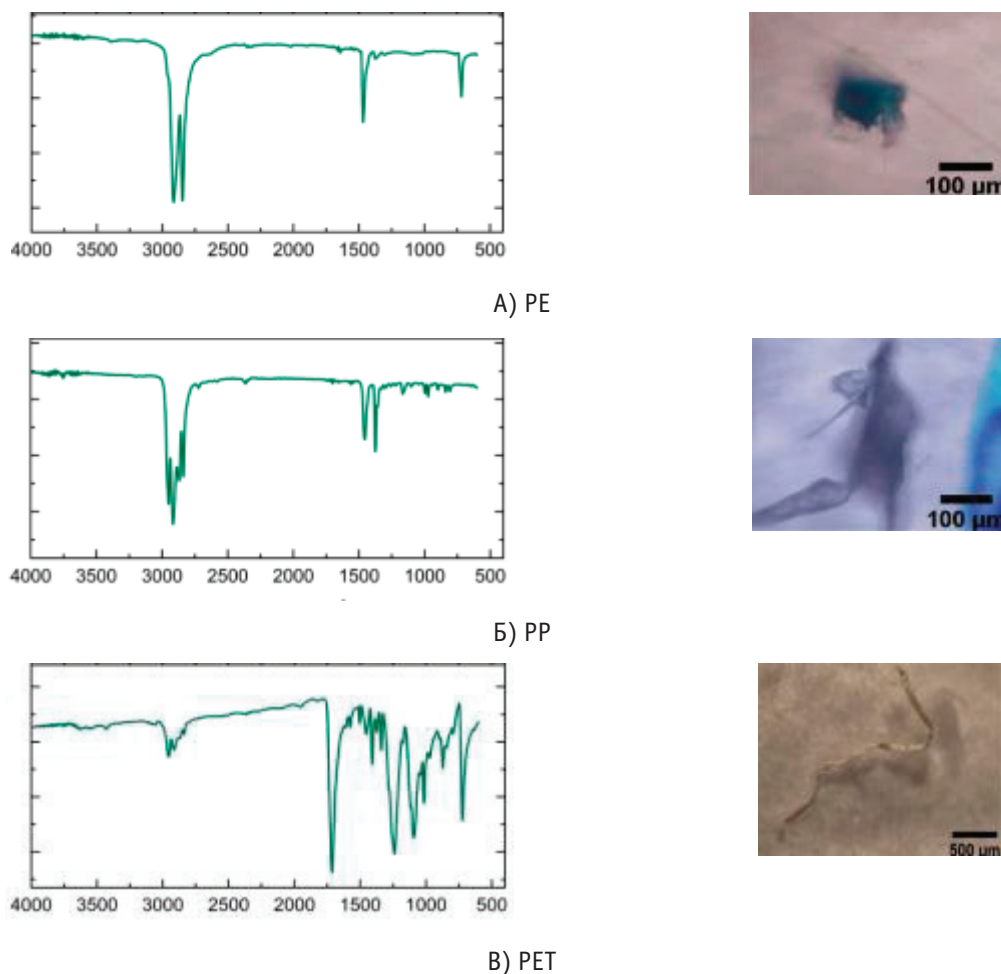


Рис. 4. Результаты характеристик полимеров методом FTIR

Что касается характеристик полимеров, наиболее доминирующей группой, определенной в результате FTIR-анализа в текущем исследовании, был PE (60 %), за которым следовали PP и PET (20 % и 20 % соответственно). Материалы на основе пластика обычно используются при упаковке, транспортировке, хранении и экспонировании, особенно на рынках и в магазинах, которые входят в число поставщиков пищевых продуктов, доходящих до конечного потребителя, а наиболее часто используемые для этого типы пластиков — полиэтилен и полипропилен [1]. Пластиковая упаковка является важным способом сохранения свежести фруктов и овощей и доставки их потребителям в свежем виде, как только они были собраны с поля. Например, наиболее эффективными условиями хранения фруктов и овощей, использованных в данном исследовании, являются полиэтиленовые пакеты, полистирол, картонные лотки, полиэтиленовая или полипропиленовая флоу-упаковка для яблок.

Таким образом, весьма вероятно, что частицы пластика, выветренные из упаковочных материалов, загрязняют хранящиеся фрукты и овощи: мягкая поверхность исследуемого овоща (например, помидоров или огурцов) может быть легко повреждена при физическом воздействии на упаковку во время транспортировки. Учитывая размер частиц, обнаруженных в съедобных частях фруктов и овощей в настоящем исследовании, весьма вероятно, что микропластик попал в ткани образца в результате загрязнения в процессе хранения, а не перемещения из транспортной системы растения.

Пластмассовые отходы, образующиеся после использования, могут оказаться в различных городских и сельских районах, что, в свою очередь, может привести к загрязнению почвы, на которой ведется сельское хозяйство. Микропластик может проникать в сельскохозяйственные районы через очистные сооружения, орошение и атмосферные осадки, как напрямую, так и косвенно, в результате разложения пластиковых материалов, применяемых в аграрной деятельности [2–4]. Это загрязнение почвы естественным образом влияет на фрукты и овощи, выращиваемые в этой среде. Многие исследования показали, что микропластик может перемещаться вертикально глубже поверхности почвы различными способами, например, в результате сельскохозяйственной деятельности, сбора корневищ (например, картофеля, моркови) и трещин на поверхности почвы, вызванных засушливым климатом [5]. Микропластик, обнаруженный во фруктах и овощах, может попасть в растения под воздействием различных факторов во время выращивания сельскохозяйственных культур. Микропластик, проникающий глубоко от поверхности почвы, может переноситься в раз-

личные части растений, такие как листья, стебли и плоды, после накопления в корнях [6]. Тем не менее, это возможно только для частиц небольшого размера, способных пройти через ксилему.

Хотя наши знания о влиянии микропластика из почвы на различные ткани растений все еще ограничены, транспирационная тяга играет значительную роль в поглощении растениями и биоаккумуляции пластиковых частиц [7]. В текущем исследовании частицы микропластика подсчитывали под микроскопом и классифицировали по размеру и цвету. Хотя 86,1 % обнаруженных микропластиков находились в диапазоне 0,1–1000 μm , эти измерения проводились только на видимых частицах. Это одно из ограничений настоящего исследования. Предыдущие исследования показали, что при таких измерениях, сделанных невооруженным глазом с помощью микроскопа, частицы ниже определенных размеров нельзя было отличить друг от друга и даже нельзя было увидеть.

Например, L. Lv [8] заявил, что размеры ниже 500 μm невозможно различить и классифицировать при подсчетах, произведенных невооруженным глазом под микроскопом. Кроме того, Y. K. Song [9] подчеркнул, что человеческому глазу проблематично идентифицировать микропластик размером 200 μm под микроскопом. В этом смысле, хотя обнаруженные в данном исследовании пластики определялись как 0,1–1000 μm по определению это были частицы размером ближе к 1 мм и невозможно, чтобы частицы такого размера могли попасть в ткани растений из почвы путем прямого поглощения. Предыдущие исследования показали, что микро- и нанопластики могут прилипать к листьям растений. В исследовании раствор, содержащий 100 и 500 нм (средний размер частиц микронанопластика (МНП) $105,53 \pm 3$ нм и $532,06 \pm 26$ нм соответственно) полистирольный микропластик распыляли на листья салата на стадии роста. Затем листья подвергались многократному промыванию, и после обработки микропластиком большое количество этих частиц, скопившихся на листьях салата, все еще обнаруживалось на тканях [10].

Литература:

1. Heller, M. C. Plastics in the US: Toward a material flow characterization of production, markets and end of life / M. C. Heller, M. H. Mazar, G. A. Keoleian. — Текст: непосредственный // *Environ. Res. Lett.* — 2020. — № 15. — С. 094034.
2. Лукин, А. А. О вопросе контаминации чая микропластиком в процессе заваривания / А. А. Лукин, М. А. Тихоненко. — Текст: непосредственный // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов.* — 2023. — № 3(80). — С. 79–84.
3. Лукин, А. А. Методы идентификации микропластиков в пищевых системах / А. А. Лукин. — Текст: непосредственный // *Аграрная наука.* — 2026. — № 2. — С. 110–126.
4. Микро- и нанопластик: происхождение, источники поступления и влияние на здоровье человека (обзор литературы) / И. Р. Газеев, А. А. Лукин, Н. В. Гизатова, Г. Ф. Латыпова. — Текст: непосредственный // *Гигиена и санитария.* — 2025. — № 10. — С. 1290–1295.
5. Microplastics in soils: A review of methods, occurrence, fate, transport, ecological and environmental risks / Y. Zhou, J. Wang, M. Zou [и др.]. — Текст: непосредственный // *Sci. Total Environ.* — 2020. — № 748. — С. 141368.
6. Azeem, I. Uptake and accumulation of nano/microplastics in plants: A critical review / I. Azeem, M. Adeel, M. A. Ahmad. — Текст: непосредственный // *Nanomaterials.* — 2021. — № 11. — С. 2935.
7. Accumulation of microplastics in an plant / L. Li, Q. Zhou, N. Yin [и др.]. — Текст: непосредственный // *Sci. Bull.* — 2021. — № 61. — С. 95–104.
8. Challenge for the detection of microplastics in the environment / L. Lv, X. Yan, L. Feng [и др.]. — Текст: непосредственный // *Water Environ. Res.* — 2021. — № 93. — С. 5–15.
9. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples / Y. K. Song, S. H. Hong, M. Jang [и др.]. — Текст: непосредственный // *Marine Pollution Bulletin.* — 2015. — № 93. — С. 202–209.
10. Optimize lettuce washing methods to reduce the risk of microplastics ingestion: The evidence from microplastics residues on the surface of lettuce leaves and in the lettuce washing wastewater / D. He, T. Guo, J. Li, F. Wang. — Текст: непосредственный // *Sci. Total Environ.* — 2023. — № 869. — С. 142–155.

Моделирование ключевого технологического оборудования для повышения селективности процесса выделения пропилена

Мухьянова Инзиля Дилюсовна, студент

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Рассмотрено построение в программе Aspen Hysys V14 цифровой модели процесса выделения пропилена. Созданная цифровая модель позволяет оценивать эффективность режима работы технологического оборудования. Также она позволяет прогнозировать выход и качество продукции, что помогает оптимизировать условия процесса для получения требуемых результатов.

Ключевые слова: цифровое моделирование, Aspen Hysys, модернизация, ректификация и пропилен.

Пропилен является одним из ключевых продуктов нефтехимической промышленности, служащим сырьем для производства полипропилена, акриловой кислоты, пропиленгликоля и других ценных химических соединений. Мировой спрос на пропилен неуклонно растет, что стимулирует развитие технологий его получения и совершенствование существующих методов разделения пропан-пропиленовой фракции (ППФ). Пропилен и пропан — почти неразделимы. [1] Разница их температур кипения составляет всего несколько градусов, поэтому ректификация пропан-пропиленовой смеси требует колоссальных энергозатрат и колонн высотой до 100 метров. Aspen HYSYS позволяет смоделировать этот сложный процесс, подобрать оптимальные параметры ректификации и найти баланс между чистотой продукта и экономической эффективностью. [2]

В качестве объекта моделирования на установке выделения пропилена выбран узел разделения ППФ. Схема модели представлена на рисунке 1.

Разделение происходит в ректификационных колоннах. Ректификация — это процесс разделения двойных или многокомпонентных смесей за счёт противоточного массообмена между паром и жидкостью. Четкое разделение требует ректификационных зон с большим числом тарелок и флегмовых чисел. Из-за этого используются не-

сколько колонн C-116 и C-117, которые соединяются противоточными потоками жидкости и пара таким образом, чтобы они совместно выполняли функцию одной ректификационной колонны.

Сырье — пропан-пропиленовая фракция подается в колонну C-116, в результате чего сверху отводится пропилен, который далее поступает в куб колонны C-117 под первую тарелку. В колонне C-117 происходит окончательное отделение пропилена от пропана. А кубовым продуктом колонны C-116 является пропан (пропановая фракция), с следующим составом: пропан — 73 % об., пропилен — 22 % об.. Пропилен, находящийся в составе пропана, приводит к потере целевого продукта. При увеличении производительности с 2 до 4 т/год это будет заметно сильнее. Поэтому нужно ввести дополнительную колонну разделения C-108, чтобы снизить потери пропилена в пропане и получить больше пропилена как товарный продукт. Схема модели представлена на рисунке 2.

Когда пропан после C-116 колонны поступает в C-108 колонну, где происходит разделение, потерь пропилена становится меньше. Верхним продуктом является пропилен, который идет на орошение колонны C-116. Нижний продукт — пропан, где потери пропилена составляет только 3 % об., идет в качестве сырья печей пиролиза.

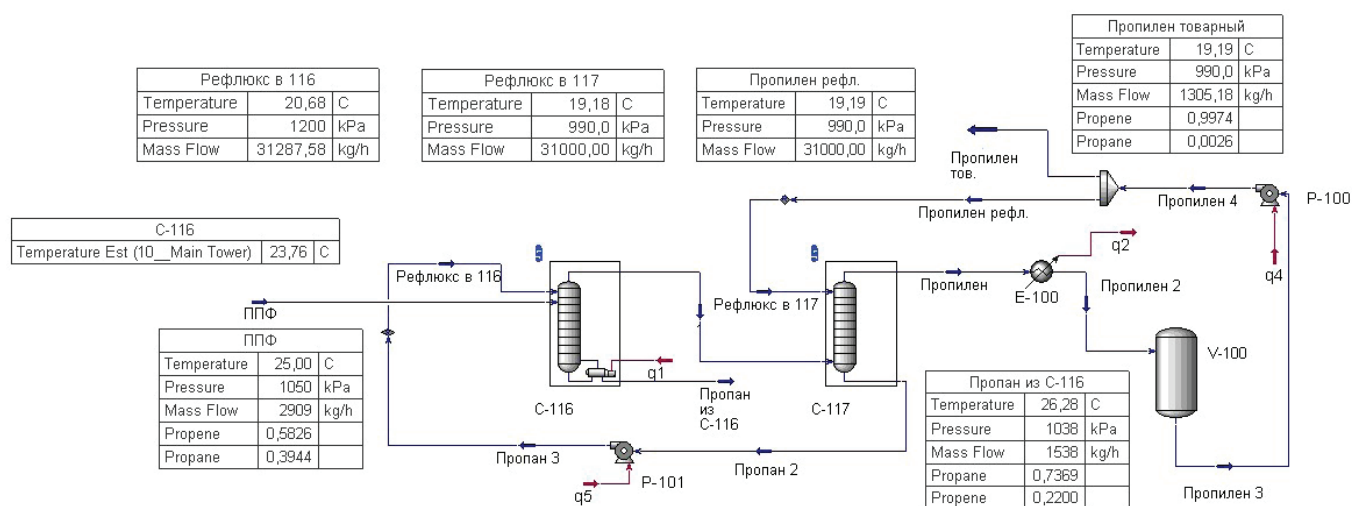


Рис. 1. Технологическая схема модели получения пропилена

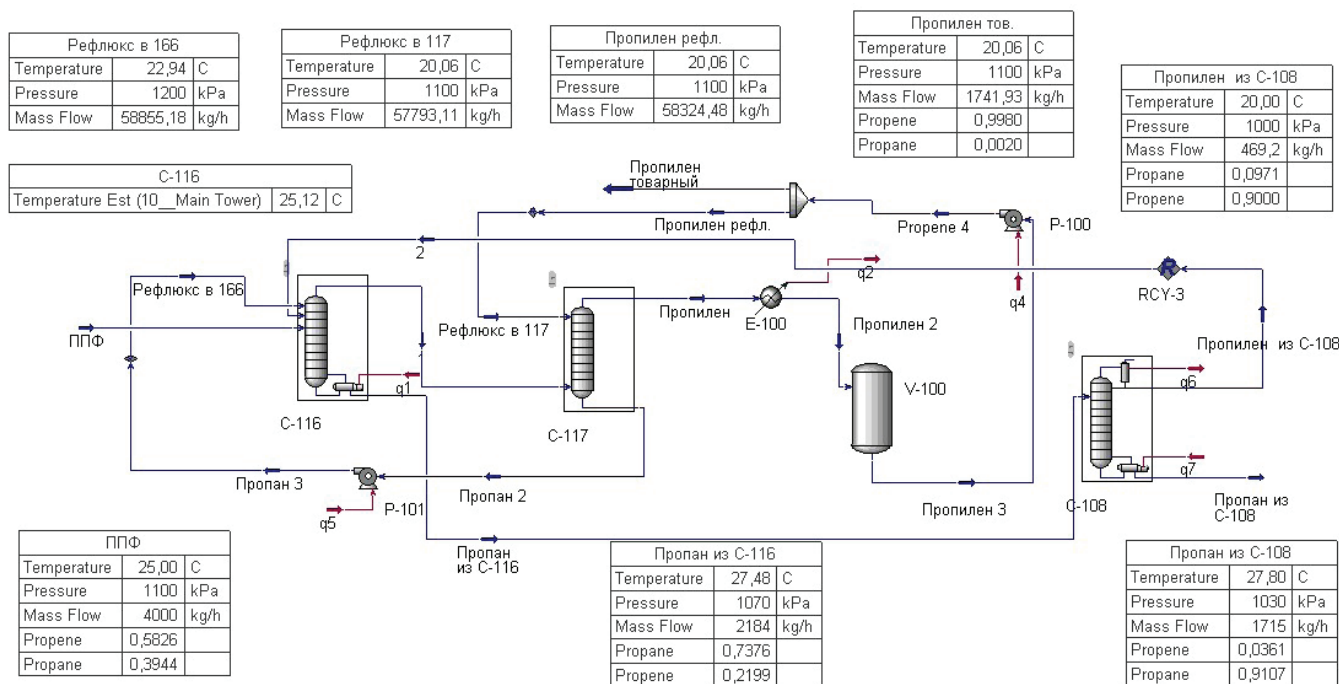


Рис. 2. Технологическая схема модели получения пропилена с ведением новой колонны

Пары, отводимые с верха колонны C-117, конденсируются в конденсаторе пропиленом-хладагентом и стекают в емкость V-100. Из V-138 часть товарного пропилена подается насосом P-100 на орошение колонны C-117, другая часть в качестве готового продукта поступает на склад. [3]

Эффективность процесса оценивается по целевому продукту — товарного пропилена. В итоге получается

пропилен с концентрацией 99,8 % об., где потери пропилена с пропан-рециклом составляют 2–3 % об. Созданная в программе Aspen Hysys модель процесса установки получения пропилена является высокоэффективным инструментом для дальнейшего анализа работы установки, поиска «узких мест» процесса и путей его оптимизации и интенсификации.

Литература:

1. Нефтегаз.РУ: официальный сайт. «Пропилен — углеводород ряда этилена». URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/neftekhimiya/698938-propilen/?ysclid=mpcnzgpf0243822450> (дата обращения 12.05.2025)
2. AspenHysys: официальный сайт. — Бэдфорд. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys> (дата обращения 12.05.2025)
3. Постоянный технологический регламент производства этилена второй очереди (цех пиролиза, компримирования и разделения пирогаза 2021–2045) № 13–73–20, Том 1

Измерение параметров шероховатости и факторы, влияющие на погрешность

Орехова Маргарита Алексеевна, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В статье автор исследует какие факторы влияют на погрешность при измерении параметров шероховатости и способы их минимизации.

Ключевые слова: шероховатость, параметры шероховатости, погрешность.

Не существует абсолютно гладких поверхностей, даже сама тщательно обработанная деталь будет иметь микрорельеф, состоящий из выступов и углублений. Значение гладкости и ровности поверхности детали в любом

случае будет отличаться от заданного чертежом значения, т. е. от номинального значения. При этом, отклонение может быть либо макрогеометрическим, либо микрогеометрическим. Макрогеометрические отклонения

могут быть охарактеризованы волнистостью детали и несоответствием форме. Микрогеометрические отклонения, в свою очередь, определяются не чем иным, кроме шероховатости поверхности.

В машиностроительной, приборостроительной, оборонной, космической и других отраслях промышленности необходимо точно определять шероховатость поверхности деталей и измерять профиль, для предотвращения преждевременного изнашивания и выхода их из строя. С этой целью применяют прибор профилометр.

Шероховатость — это совокупность микронеровностей, появляющихся на поверхностях готовых изделий или деталей с относительно малыми шагами на базовой длине [1,2].

Метрологическое обеспечение параметров шероховатости обладает достаточно развитой нормативно-технической базой документации и разнообразными высокоточными средствами измерений данного параметра. Но даже наличие современного и точного оборудования не может гарантировать полной достоверности результатов. Можно заметить, что даже на тех приборах, которые регулярно проходят процедуру поверки, при проведении замеров на одной и той же поверхности можно получить кардинально различные значения параметров шероховатости. Данная причина заключается в наличии множества факторов, которые непосредственно сопровождают процесс измерения и вносят свой вклад в погрешность замеров.

В соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 и рекомендациями ИСО 4288, погрешность измерения параметров микрогеометрии представляет собой совокупность систематических и случайных составляющих [1,3]. Для системного анализа целесообразно классифицировать факторы, влияющие на точность измерений, по их происхождению.

1. Температурные воздействия

Одним из самых значимых факторов, который влияет на точность измерения параметров шероховатости. Согласно МИ 1850–88 установлено, что измерения должны проводиться при температуре 20 ± 5 °C [4].

При несоблюдении данного требования возникают следующие последствия:

- Тепловое расширение материала, из которого изготовлена деталь. Изменение линейных размеров микронеровностей пропорционально коэффициенту теплового расширения материала.
- Температурная деформация прибора. Изменение геометрии направляющих и кинематических звеньев профилометра приводит к дополнительным погрешностям трассировки.
- Градиенты температуры. Особенно опасны неравномерные температурные поля, вызывающие коробление как детали, так и элементов прибора.

Существуют способы, для минимизации данных воздействий:

- термостатирование помещений;

- выдержка деталей и приборов в зонах измерений, для выравнивания температуры (не менее 4–6 часов для крупногабаритных деталей);
- при проведении особо точных измерений учет температурных поправок.

2. Вибрационные воздействия

При измерении параметров шероховатости особенно критически важным фактором является вибрация. Источниками вибраций могут выступать работающее оборудование, проезжающий транспорт, персонал.

Негативное влияние вибрации проявляется в:

- наложении низкочастотных колебаний на полезный сигнал профиля;
- искажении траектории движения щупа;
- потере контакта измеряющей иглы с контролируемой поверхностью.

Способы минимизации:

- Установление приборов на виброизолирующие платформы или фундаменты;
- Проведение замеров во время отсутствия технологических вибраций.

3. Чистота поверхности

Наличие на измеряемой поверхности загрязнений, масляных пленок, продуктов коррозии приводит к:

- искажению реального профиля;
- ускорению износа контактного щупа;
- рассеиванию на загрязнениях при измерениях оптическими методами.

К способам минимизации относят:

- Тщательная очистка поверхности (протирание спиртом, обдув чистым воздухом) перед измерением;
- Контроль чистоты в зонах, где происходит измерения;
- Использование защитных устройств для приборов.

4. Методические факторы погрешности

Методическая составляющая погрешности обусловлена несовершенством выбранного алгоритма измерений и обработки данных.

4.1. Влияние выбора базовой длины и фильтров

Ключевым фактором, определяющим корректность оценки шероховатости, является выбор параметров фильтрации. В профилометрии используются фильтры λ_s (подавление коротковолновых составляющих — шума) и λ_c (определение границы между шероховатостью и волнистостью) [1,2].

Как показывают экспериментальные данные, варьирование длины отсечки шага λ_s и базовой длины λ_c приводит к статистически значимому изменению параметра R_a .

Увеличение λ_s (усиление фильтрации высоких частот) сглаживает профиль, что ведет к занижению значения R_a .

Увеличение λ_c (базовой длины) расширяет диапазон учитываемых неровностей, что может приводить к завышению R_a за счет включения составляющих волнистости.

Погрешность возникает, когда выбранные параметры фильтрации не соответствуют шагу неровностей контролируемой поверхности, что регламентировано требованиями ГОСТ 2789–73 (ИСО 4287–84) [1,2].

4.2. Влияние числа измерений

Шероховатость, как случайный процесс, требует статистической обработки. Единичное измерение не может достоверно характеризовать всю поверхность детали. Погрешность, обусловленная конечным объемом выборки, уменьшается с увеличением количества трасс и зависит от интервала корреляции между точками профиля. Недостаточное количество измерений приводит к низкой воспроизводимости результатов [3,5].

5. Инструментальные (аппаратурные) факторы

Данная группа факторов связана с конструктивными особенностями и техническим состоянием средств измерений (СИ).

5.1. Погрешности датчика и первичного преобразователя

В контактных профилометрах-профилографах основным источником погрешности является измерительная игла.

– Геометрия наконечника: Радиус закругления иглы (стандартные значения 2, 5 или 10 мкм) должен быть меньше радиуса измеряемых неровностей. В противном случае происходит сглаживание профиля, и результаты измерения R_a и R_z оказываются заниженными [1,2].

– Износ иглы: В процессе эксплуатации происходит истирание алмазного острия, что эквивалентно увеличению радиуса контакта и, как следствие, появлению прогрессирующей систематической погрешности.

5.2. Погрешности кинематики привода

Нестабильность скорости перемещения датчика или наличие люфтов в направляющих приводит к искажению горизонтальных координат профиля, что вносит вклад в погрешность измерения шаговых параметров (RS_m).

5.3. Погрешность калибровки

Отсутствие или нерегулярность калибровки по эталонным образцам шероховатости (образцовым мерам) ведет к невыявленным систематическим погрешностям во всем диапазоне измерений [4].

5.4 Факторы, связанные с объектом контроля

Анизотропия поверхности

Для большинства технологических процессов обработки (точение, фрезерование, шлифование) характерна направленная текстура поверхности. Измерение, выполненное вдоль следов обработки, дает значения шероховатости (например, R_a), в разы меньшие, чем измерение поперек следов. Проведение измерений без учета направления неровностей является грубой методической ошибкой, что подчеркивается в требованиях ГОСТ [1,2].

Наличие макродефектов

Локальные дефекты (царапины, раковины, заусенцы) не являются характеристикой технологической шероховатости, но при попадании в трассу измерения искажают профиль, создавая ложные выбросы. Стандарт ИСО 8785 предписывает исключать такие участки из зоны контроля [6].

Физико-механические свойства материала

При использовании контактных методов для измерения мягких (например, алюминиевых) или эластичных (полимерных) материалов возможно пластическое деформирование поверхности измерительной иглой, что вносит дополнительную погрешность, неотделимую от результата измерения.

6. Классификация и пути минимизации погрешностей

Проведенный анализ позволяет классифицировать факторы погрешности по возможности их устранения:

1. Систематические погрешности (неправильный выбор фильтра, износ иглы, нарушение калибровки) — могут быть выявлены и исключены путем коррекции методики или введением поправок.

2. Случайные погрешности (вариации профиля на разных участках, вибрации) — уменьшаются за счет увеличения числа наблюдений и статистической обработки.

3. Грубые погрешности (промахи) — вызваны наличием дефектов или загрязнений и устраняются отбраковкой аномальных результатов.

Для минимизации суммарной погрешности измерения параметров шероховатости необходимо:

– Выбирать параметры фильтрации λ_c и λ_s согласно нормативной документации на контролируемую деталь.

– Обеспечить корректную ориентацию трассы перемещения датчика перпендикулярно следам обработки.

– Проводить измерения на участках, свободных от дефектов и загрязнений.

– Обеспечить виброзащиту и термостабилизацию зоны контроля.

– Выполнять регулярную калибровку средств измерений по образцовым мерам.

Литература:

1. ГОСТ 2789–73 (ИСО 4287–84). Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1973.
2. ИСО 4287–84 (ISO 4287:1984). Шероховатость поверхности. Термины, определения и параметры поверхности. — Международная организация по стандартизации, 1984.
3. ИСО 4288:1996 (ISO 4288:1996). Шероховатость поверхности. Правила и процедуры измерения параметров профиля. — Международная организация по стандартизации, 1996.
4. МИ 1850–88. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения параметров шероховатости поверхности профильными методами. Общие требования к проведению измерений. — М.: ВНИИМС, 1988.
5. ГОСТ Р 8.736–2011 (или ИСО 4288:1996). Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения параметров шероховатости поверхности методом профилирования. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2011.
6. ИСО 8785 (ISO 8785). Отклонения поверхности и дефекты поверхности. Термины, определения и параметры. — Международная организация по стандартизации.

Разработка интеллектуальной системы учета электроэнергии

Петров Никита Евгеньевич, студент магистратуры
Севастопольский государственный университет

В статье рассмотрены вопросы автоматизации учета электрической энергии в условиях цифровой трансформации электроэнергетики. Представлен лабораторный макет интеллектуального счетчика, построенный на микроконтроллере STM32F103C8T6 и датчике тока ACS71230A на основе эффекта Холла. Описаны структурная схема, методы измерения действующих значений напряжения и тока (True RMS), активной мощности и энергии. Приведены результаты имитационного моделирования в среде Proteus 8 Professional. Показано, что погрешность измерения активной мощности не превышает 1,6 %, что удовлетворяет требованиям технического задания и превосходит показатели устаревших индукционных счетчиков.

Ключевые слова: интеллектуальный учет электроэнергии, АСКУЭ, датчик Холла ACS712, STM32F103C8T6, True RMS, имитационное моделирование, Proteus.

Электроэнергетика является базовой отраслью экономики, однако существующие системы учета, основанные на индукционных счетчиках и ручном снятии показаний, не позволяют получать данные в реальном времени, эффективно бороться с потерями и внедрять многотарифные режимы [1, с. 15]. Федеральный закон № 522ФЗ законодательно закрепил переход к интеллектуальному учету, что создает высокий спрос на современные системы автоматизированного контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [2].

В то же время внедрение промышленных АСКУЭ сопряжено со значительными экономическими затратами [3, с. 167]. В связи с этим актуальной является разработка бюджетных лабораторных макетов, позволяющих изучать принципы интеллектуального учета, отрабатывать алгоритмы обработки сигналов и подготавливать специалистов для цифровой энергетики. Цель данной работы — создание и исследование лабораторного макета счетчика электроэнергии, обеспечивающего измерение действующих значений напряжения, тока, активной мощности и накопление энергии с погрешностью не более 5 %.

На основании анализа существующих методов измерения электрических величин были определены требования к макету: измеряемое напряжение — 0...250 В переменного тока, ток — 0...30 А, погрешность — не более ± 5 %, наличие интерфейса для передачи данных (UART) и жидкокристаллического дисплея.

Для измерения тока рассмотрены несколько вариантов в таблице 1. Наиболее подходящим оказался датчик ACS71230A на эффекте Холла благодаря гальванической развязке, широкому диапазону частот (DC...80 кГц) и простоте включения [4]. Датчик имеет чувствительность 66 мВ/А и выходное напряжение 2,5 В при нулевом токе.

Для обработки сигналов выбран микроконтроллер STM32F103C8T6 (ядро ARM CortexM3, 72 МГц, 64 кБ Flash, 20 кБ RAM, два 12битных АЦП) [5]. Наличие двух независимых АЦП позволяет одновременно оцифровывать напряжение и ток, что критически важно для точного вычисления активной мощности.

Таблица 1. Сравнительный анализ датчиков тока

Метод	Гальваническая развязка	Измерение пост. тока	Погрешность, %	Сложность
Шунт	Нет	Да	0,1–0,5	Средняя
Трансформатор тока	Да	Нет	0,2–1	Средняя
Датчик Холла (ACS712)	Да	Да	1,5–2,5	Низкая

Структурная схема макета включает делитель напряжения ($R_1=200$ кОм, $R_2=2,2$ кОм), повторитель на операционном усилителе LM358, датчик тока ACS712, фильтры нижних частот (частота среза ≈ 16 кГц), схему защиты входов АЦП и микроконтроллер с дисплеем.

Для измерения действующих значений напряжения и тока используется метод True RMS (истинное среднеквадратическое значение). Он основан на дискретизации сигнала с частотой 10 кГц и вычислении по формулам (1) и (2):

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n^2}, \quad I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2}, \quad (1)$$

где u_n , i_n — мгновенные значения напряжения и тока, полученные с АЦП в момент времени n ; N — количество отсчетов за период (в данном случае 2000 отсчетов, что соответствует 0,2 секунды при частоте дискретизации 10 кГц).

Активная мощность вычисляется как среднее за период от произведения мгновенных значений напряжения и тока по формуле 2:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n \cdot i_n. \quad (2)$$

Данный метод не требует определения фазового сдвига и корректно работает при любой форме сигнала (синусоидальной, искажённой, импульсной).

Энергия накапливается интегрированием мощности по времени по формуле 3:

$$W = P \cdot \Delta t, \quad (3)$$

где P — активная мощность, вычисленная для каждого интервала; $\Delta t=0,2$ с — интервал между расчётами.

Программная реализация выполнена на языке C в среде Keil μ Vision. Обработчик прерывания АЦП накапливает суммы квадратов и произведения; после набора 2000 отсчетов вычисляются RMS, мощность и обновляется энергия.

Имитационное моделирование проводилось в среде Proteus 8 Professional. Были исследованы три типа нагрузки: активная (резистор), индуктивная ($\cos \varphi = 0,7$) и несинусоидальная (однополупериодный выпрямитель с емкостным фильтром). Эталонные значения получали с помощью виртуального ваттметра Proteus. В таблице 2 приведены результаты для активной нагрузки.

Таблица 2. Результаты измерений при активной нагрузке ($U = 220$ В, $f = 50$ Гц)

R_нагр, Ом	I_эт, А	I_изм, А	δ_I , %	P_эт, Вт	P_изм, Вт	δ_P , %
440	0,500	0,496	-0,80	110,0	108,7	-1,18
220	1,000	1,008	+0,80	220,0	222,1	+0,95
110	2,000	2,015	+0,75	440,0	445,3	+1,20
44	5,000	4,975	-0,50	1100,0	1090,2	-0,89

Для индуктивной нагрузки ($R=220$ Ом, $L=1,12$ Гн, $\cos \varphi \approx 0,7$) погрешность измерения активной мощности составила -0,78 %. При несинусоидальной нагрузке, имитирующей импульсный блок питания, погрешность мощности не превысила -1,55 %.

Максимальная погрешность по всем испытаниям: напряжение — $\pm 0,55$ %, ток — $\pm 0,80$ %, активная мощность — $\pm 1,55$ %. Это значительно лучше требования технического задания (± 5 %) и подтверждает корректность выбранных решений.

Себестоимость лабораторного макета (материальные затраты) составляет около 1800–2000 руб., а с учетом разработки — 3600–4100 руб. Для сравнения, промышленный многофункциональный счетчик «Меркурий230» стоит от 6500 руб. [6]. Таким образом, использование разработанного макета в учебном процессе позволяет снизить затраты на оснащение лаборатории в 1,5–2 раза. При внедрении 10 макетов экономия бюджета за 5 лет превышает 80 000 руб. по сравнению с закупкой коммерческих аналогов.

В ходе работы разработан и исследован лабораторный макет интеллектуального счетчика электроэнергии. Обоснован выбор датчика тока ACS712 и микроконтроллера STM32F103C8T6. Реализованы алгоритмы True RMS, измерения активной мощности и накопления энергии. В среде Proteus 8 Professional проведены имитационные испытания, подтвердившие погрешность измерения активной мощности не более 1,6 %. Показана экономическая целесообразность использования макета в учебном процессе. Дальнейшие направления совершенствования включают переход на 16битный АЦП, добавление многотарифного учета и интеграцию с беспроводными интерфейсами (LoRa, NBIoT).

Литература:

1. Осика, Л. К. Расчетные методы интеллектуальных измерений (Smart Metering) в задачах учета и сбережения электроэнергии: практическое пособие / Л. К. Осика. — Москва: МЭИ, 2017. — 368 с. — ISBN 978–5–383–01214–7.
2. Российская Федерация. Законы. Федеральный закон от 27.12.2018 № 522ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации» // КонсультантПлюс: справочно-правовая система.
3. Жмудь, В. А. Измерение переменного напряжения и тока с помощью ADE7758 и STM32F103 / В. А. Жмудь, А. И. Незванов, В. Г. Трубин // Автоматика и программная инженерия. — 2019. — № 2 (28). — С. 166–173.
4. ACS712: Fully Integrated, HallEffectBased Linear Current Sensor IC [Электронный ресурс] / Allegro MicroSystems. — Режим доступа: <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx> (дата обращения: 15.05.2026).
5. STM32F103C8T6 Datasheet [Электронный ресурс] / STMicroelectronics. — Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf> (дата обращения: 15.05.2026).
6. Счетчик электроэнергии Меркурий 230 ART-02 CLN [Электронный ресурс] / Инкотекс. — Режим доступа: <https://www.incotex.ru/products/mercury230/> (дата обращения: 15.05.2026).

Внутренний метрологический надзор в нефтепереработке: особенности контроля измерительных комплексов с сужающими устройствами, счетчиков-расходомеров массовых и стальных резервуаров

Преловская Анна Алтыновна, инженер по метрологии (Иркутская область)

В статье рассматриваются ключевые аспекты метрологического надзора в нефтеперерабатывающей отрасли с акцентом на контроль измерительных комплексов с сужающими устройствами (ИК с СУ), счетчики расходомеры массовые и резервуарных систем. Представлены систематизированные чеклисты для проверки, выявлены типичные проблемы и предложены пути их решения. Показана важность точности измерений для экономической эффективности и безопасности производства.

Ключевые слова: метрологический надзор, нефтепереработка, измерительные комплексы с сужающими устройствами, кориолисовые расходомеры, резервуары, точность измерений.

Введение

Нефтеперерабатывающая промышленность предъявляет повышенные требования к точности измерений расхода, массы и объема нефтепродуктов. Ошибки в измерениях приводят к:

- экономическим потерям из-за некорректного учёта сырья и продукции;
- нарушению технологических режимов;
- снижению безопасности производства;
- проблемам при коммерческом учёте и отчётности.

Цель статьи — систематизировать подходы к метрологическому надзору за ключевыми измерительными системами в нефтепереработке: (ИК с СУ), счетчиков-расходомеров массовых и резервуарными парками.

1. Измерительные комплексы с сужающими устройствами (ИК с СУ)

ИК с СУ широко применяются для измерения расхода жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Их работа регламентируется ГОСТ 8.586.(1–5)-2005.

Основные элементы ИК с СУ:

- сужающие устройства (диафрагмы, сопла, трубы Вентури);
- измерительные трубопроводы;
- вспомогательное оборудование;
- СИ, входящие в состав ИК с СУ (датчики давления, перепада давления, температуры, плотности);
- средства обработки результатов (вычислители).

Типичные проблемы при эксплуатации:

- износ или деформация сужающих устройств (коррозия и эрозия, загрязнение СУ), неправильный монтаж СУ;
- засорение импульсных линий;
- дефекты трубопровода (нецилиндричность поперечного сечения, шероховатость внутренней поверхности, наличие клепаных фланцев, загрязнение или «зарастания» трубопровода);
- близость местных сопротивлений;
- несоответствие условий эксплуатации паспортным данным;
- некорректный расчет СУ (расчетные данные не соответствуют фактическим).
- работоспособность и применение низкоточных средств измерений (СИ), входящих в состав ИК с СУ.

Чеклист для проверки ИК с СУ:

Наименование мероприятия	Отметка о выполнении	Примечание
Документация:		
Наличие паспортов на измерительный комплекс		
наличие паспортов на измерительный комплекс		
наличие паспортов на сужающее устройство с действующей поверкой		
актуальность методик выполнения измерений		
акты установки сужающего устройства		
акты измерений внутреннего диаметра трубопровода		
актуальный расчет расхода в аттестованном программном комплексе		
Техническое состояние		
осмотр сужающих устройств на предмет коррозии и повреждений		
проверка герметичности соединений		
контроль состояния участков трубопровода		
Метрологические параметры		
сверка фактических параметров сужающего устройства с паспортными данными		
контроль правильности монтажа датчиков перепада давления, температуры		
контроль наличия действующей поверки средств измерения на измерительном комплексе		
Эксплуатация:		
соответствие условий эксплуатации (температура, давление, расход, плотность) паспортным данным		
оценка влияния пульсаций потока на точность измерений		

2. Счетчики-расходомеры массовые

Расходомеры массовые обеспечивают прямое измерение массового расхода, плотности и температуры среды. Их преимущества:

- высокая точность (погрешность до 0,1 %);
- независимость от профиля потока;
- возможность измерения вязких и неоднородных сред.

Проблемы при эксплуатации счетчиков-расходомеров массовых:

- влияние газовых включений на точность;
- вибрации трубопровода;
- температурные деформации;
- загрязнение измерительных трубок.

Чеклист для проверки счетчиков-расходомеров массовых:

Наименование мероприятия	Отметка о выполнении	Примечание
Документация:		
паспорта и свидетельства о поверке		
инструкции по эксплуатации		
графики поверки и технического обслуживания		
графики проведения контрольно-метрологических характеристик		
Техническое состояние:		
визуальный осмотр корпуса и соединений		
проверка заземления и защиты от электромагнитных помех		
Метрологические параметры:		
контроль точности показаний при различных расходах		
проверка стабильности нулевых показаний		
сверка с эталонными средствами измерений		
Эксплуатация:		
соответствие условий эксплуатации паспортным данным		
контроль соответствия монтажа в зависимости от измеряемой среды		
контроль наличия газовых включений или твёрдых частиц в потоке		
контроль соответствия калибровочного коэффициента паспортным данным		

3. Резервуары и системы учёта в резервуарах

Резервуары используются для хранения и учёта нефтепродуктов. Точность измерений зависит от:

- градуировки резервуара;
- состояния измерительного оборудования;
- корректности алгоритмов пересчёта объёма в массу.

Проблемы резервуарного учёта:

- деформация стенок резервуара;
- ошибки градуировки;
- неравномерность температуры по высоте резервуара;
- некорректный учёт «мёртвого» остатка.

Чеклист для проверки резервуаров:

Наименование мероприятия	Отметка о выполнении	Примечание
Документация:		
градуировочные таблицы		
акты базовых высот		
акты поверки резервуаров		
журналы учёта наполнения/опорожнения		
Техническое состояние:		
осмотр стенок, днища и кровли на предмет коррозии		
проверка герметичности швов		
Измерительное оборудование		
проверка уровнемеров (поплавковых, радарных, ультразвуковых)		
контроль работы датчиков температуры		
Метрологические процедуры:		
сверка показаний уровнемеров с результатами ручного замера		
проверка корректности расчёта объёма и массы продукта		
контроль учёта «мёртвого» остатка		
Эксплуатация и безопасность		
соблюдение графика плановых осмотров		
контроль статического электричества и заземления		
проверка систем пожаротушения и сигнализации		

4. Пути повышения эффективности метрологического надзора

Для минимизации погрешностей и повышения надёжности измерений рекомендуется:

1. Автоматизация учёта:

- внедрение электронных систем учёта и мониторинга;
- интеграция с ERP-системами предприятия.

2. Модернизация оборудования:

- замена устаревших СИ на современные модели;
- использование беспроводных датчиков для труднодоступных точек.

3. Обучение персонала:

- регулярное повышение квалификации метрологов;
- тренинги по работе с новым оборудованием.

4. Рискоориентированный подход:

- концентрация внимания на критических точках учёта;
- оптимизация графиков проверок на основе анализа рисков.

5. Гармонизация с международными стандартами:

- внедрение методик ISO и ASTM для контроля качества;
- сличений результатов измерений с международными эталонами.

Заключение

Метрологический надзор в нефтепереработке требует комплексного подхода к контролю ИК с СУ, массовых расходомеров и резервуарных систем. Систематическое применение чеклистов, автоматизация учёта и модернизация оборудования позволяют:

- снизить погрешности измерений;
- повысить экономическую эффективность производства;
- обеспечить безопасность технологических процессов;
- соответствовать требованиям нормативных документов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку интеллектуальных систем диагностики СИ и внедрение методов машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования.

Литература:

1. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ.
2. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ.
3. ISO 9001:2008 Системы менеджмента качества — Требования (Quality management systems — Requirements).
4. РМГ 29–2013 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения».
5. ГОСТ Р 8.884–2015 «ГСИ. Метрологический надзор, осуществляемый метрологическими службами юридических лиц. Общие положения».
6. МИ 2304–08 Рекомендация «ГСИ. Метрологический надзор, осуществляемые метрологическими службами юридических лиц. Общие положения».

Использование приближенных чисел при определении метрологических характеристик спутниковой навигационной аппаратуры потребителей

Сидякин Илья Витальевич, младший научный сотрудник
ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Минобороны России (г. Мытищи, Московская область)

В статье приведены результаты исследования влияния приближенных чисел при переводе координат из угловых секунд в метры на результаты оценки метрологических характеристик спутниковой навигационной аппаратуры потребителей.

Ключевые слова: ГНСС, имитатор сигналов, навигационная аппаратура потребителей, погрешность.

Введение

В современном мире при анализе числовых данных, как правило, используются вычислительные машины с различными архитектурами ядра процессора и различное программное обеспечение. Ввиду особенностей представления вещественных чисел (с плавающей точкой) в процессорах вычислительных машин, различного представления типов данных в коде программного обеспечения, а также особенностей работы компиляторов (интерпретаторов) языков программирования и операционных систем, возникает вопрос о достоверности полученных вычислений.

Так, например, процессоры с различными архитектурами ядра имеют различную длину битов для хранения чисел. Компиляторы и интерпретаторы языков программирования могут использовать оптимизацию программного кода, в ходе которой происходит отбрасывание дробной части числа как с округлением, так и без округления.

Совокупность вышеизложенных особенностей говорит о том, что данные факторы однозначно влияют на результаты вычислений. Вопрос критичности и оценки влияния данных факторов носит индивидуальный характер.

В данной статье приведена оценка влияния использования приближенных чисел на результаты вычислений математического ожидания и стандартного отклонения по выборке (СКО) измеренных координат спутникового навигационного оборудования.

Анализ влияния приближенных чисел

Для оценки влияния чисел с плавающей точкой на результаты измерений напомним программный код следующего вида:

Программа состоит из основного цикла в теле которого происходит суммирование двух переменных n -е количество итераций, с последующим n -м количеством вычитаний. В результате данного алгоритма предполагается получить результат близкий к нулю. Далее, подбирая порядок округления чисел и количество итераций циклов, провести анализ полученных результатов.

Алгоритм программы:

- создать две переменные вещественного типа;
- создать основной цикл, в котором будут происходить итерации вычислений;
- в основном цикле создать циклы промежуточных вычислений;
- создать одну переменную вещественного типа для сохранения результатов вычислений;
- создать массив для сохранения промежуточных вычислений;
- отобразить значения массива в виде графика.

На начальном этапе анализа зададим 100 итераций основного цикла и 10 итераций вспомогательных циклов. На рис. 2 представлен график результата вычислений. Тело программы представлено на рис. 1.

```

a = 0.123;           % Переменная вещественного типа
b = 0.123;           % Переменная вещественного типа
c = 0.0;             % Переменная вещественного типа для сохранения результата вычисления

v(1,1) = c;          % Массив для сохранения промежуточных вычислений

for ii= 2:100        % Основной цикл итерации вычислений
    for x = 0:10      % Внутренний цикл промежуточных вычислений
        %a = round((a+b), 15);
        a = a+b;
    end
    for x = 0:10      % Внутренний цикл промежуточных вычислений
        %a = round((a-b), 15);
        a = a-b;
    end
    c = c+abs((b-a)); % Результат вычисления в виде разницы абсолютного значения
    v(1,ii) = c;      % Запись результата вычисления в массив
    disp(c);
end
    
```

Рис. 1. Основное тело тестовой программы

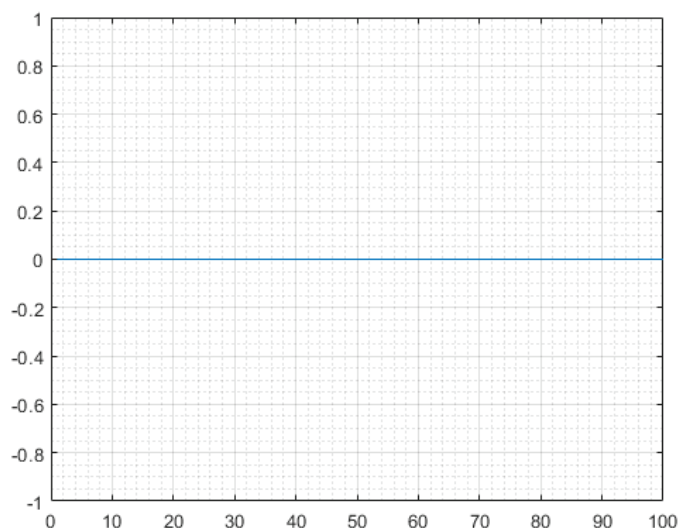


Рис. 2. Результаты вычислений с параметрами: Основной цикл-100, вспомогательные циклы-10

Видим, что при заданных параметрах результат вычислений нулевой. Увеличим количество итераций внутренних циклов до 100. Результат вычислений представлен на рис. 3.

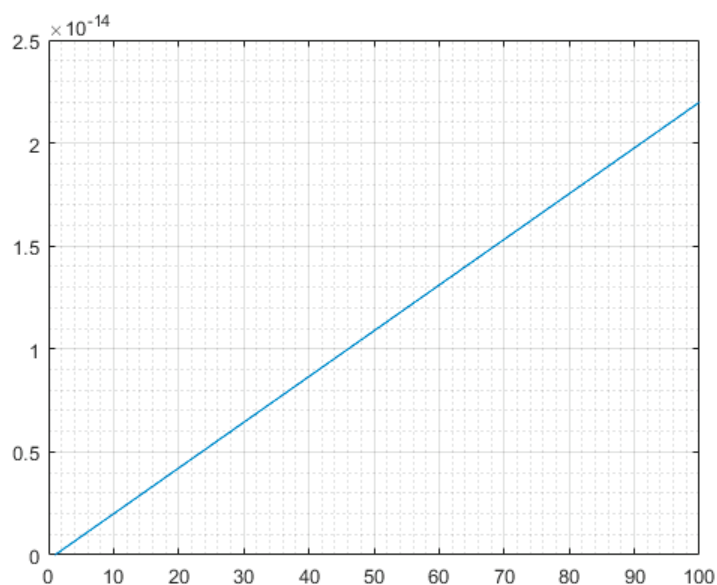


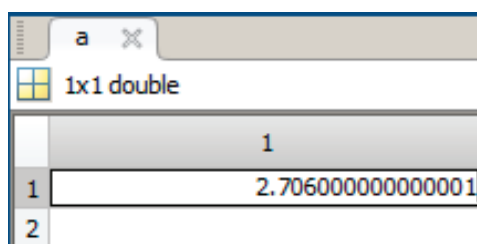
Рис. 3. Результаты вычислений с параметрами: Основной цикл-100, вспомогательные циклы-100

При увеличении количества итераций вычислений до ста на графике рис. 3 видим линейно возрастающую ошибку. Для более глубокого анализа, проведем итерации вычислений пошагово, контролируя при этом значение переменной 'a'. Результат итерации вычислений десятого шага представлен на рис. 4.

a	
1x1 double	
	1
1	1.3530000000000000
2	

Рис. 4. Результат вычислений в переменной 'a' на десятом шаге вычислений

Увеличим количество итераций до двадцати. Результат итерации вычислений двадцатого шага представлен на рис. 5.

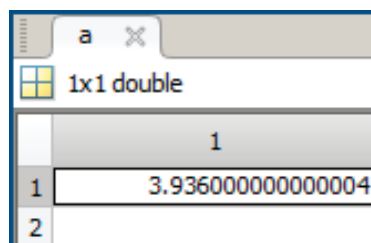


The screenshot shows a MATLAB variable editor window for a variable named 'a'. The variable is of type '1x1 double'. The value is displayed as 1 in the top row and 2.7060000000000001 in the bottom row, indicating a floating-point error in the 15th decimal place.

	1
1	2.7060000000000001
2	

Рис. 5. Результат вычислений в переменной 'а' на двадцатом шаге вычислений

На двадцатом шаге итерации цикла вычислений обнаруживается ошибка в пятнадцатом разряде дробной части числа в виде единицы. Увеличим количество итераций до тридцати. Результат итерации вычислений тридцатого шага представлен на рис. 6.



The screenshot shows a MATLAB variable editor window for a variable named 'a'. The variable is of type '1x1 double'. The value is displayed as 1 in the top row and 3.9360000000000004 in the bottom row, indicating a floating-point error in the 15th decimal place.

	1
1	3.9360000000000004
2	

Рис. 6. Результат вычислений в переменной 'а' на тридцатом шаге вычислений

Очевидно, что при увеличении итераций ошибка носит возрастающий характер.

Увеличим основной цикл программы до тысячи итераций и воспользуемся встроенной в язык программирования функцией округления числа до пятнадцати разрядов в дробной части числа. На рис. 7 представлен результат вычислений при использовании функции округления до пятнадцатого разряда дробной части числа.

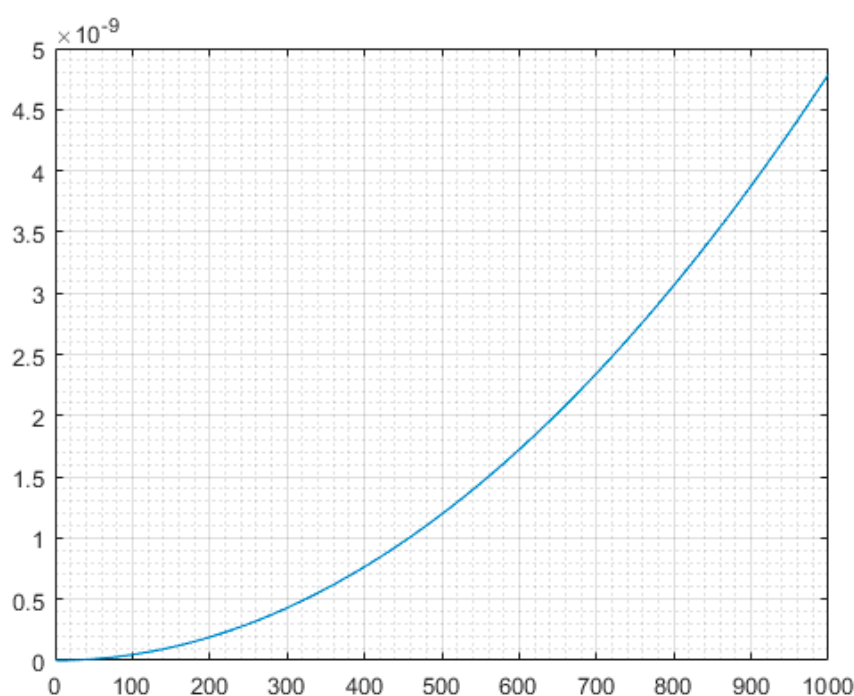


Рис. 7. Результат вычислений с использованием функции округления до 15 разряда дробной части

Применим функцию округления, при этом изменив округление до тринадцатого разряда дробной части. На рис. 8 представлен результат вычислений при использовании функции округления до тринадцатого разряда дробной части числа.

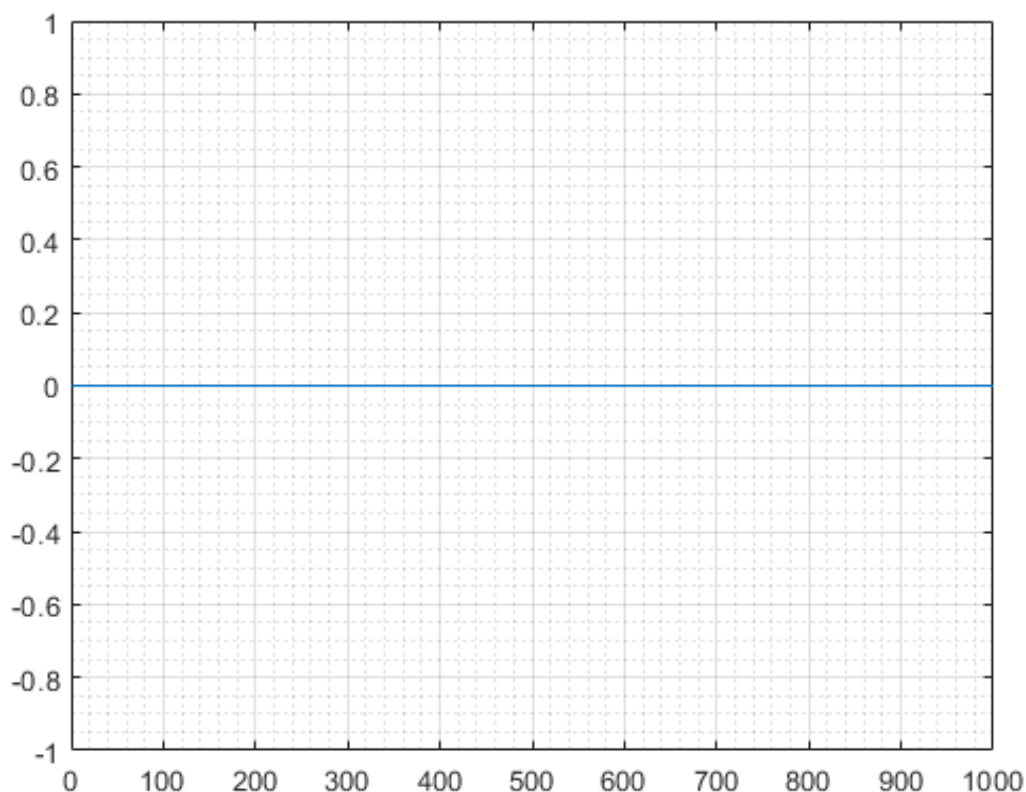


Рис. 8. Результат вычислений с использованием функции округления до 13 разряда дробной части

При округлении числа до тринадцатого разряда в дробной части ошибки не возникает. Итак, можно сделать вывод, что величина ошибки будет зависеть от количества итераций и от точности числовых значений.

Методика проведения оценки

В исходных данных от спутникового навигационного приемника принимается решение. При определении погрешности координат навигационной аппаратуры потребителей производим запись измеренных данных для последующего определения стандартного отклонения по выборке (СКО) [1, с. 5] случайной составляющей погрешности (1),

$$\sigma x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\Delta X(j) - dX)^2}{N - 1}}, \quad (1)$$

определяем разницу истинного и измеренного значения (2) с последующим переводом широты (3) и долготы (4) из угловых секунд в метры.

$$\Delta X(j) = B(j) - \text{Вист.}, \quad (2)$$

$$\Delta B(\text{м}) = K \times \Delta B, \quad (3)$$

$$\Delta L(\text{м}) = K \times \cos B \times \Delta L. \quad (4)$$

Замечание. В качестве истинного значения принимаются координаты, выдаваемые имитатором сигналов ГНСС.

Далее определяется погрешность по уровню вероятности 99,7 % (6).

$$Px = \pm(|dX| + 3\sigma x), \quad (6)$$

Коэффициент для формул (3) и (4) находим по формуле (7).

$$K = s'' \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 B)^3}}, \quad (7)$$

Для понимания влияния точности вычислений на результат, вычисление математического ожидания и стандартного отклонения по выборке (СКО) производим по двум коэффициентам повышенной и пониженной точности с последующим взятием для последующего анализа модуля разности полученных вычислений (8).

Набор данных, используемых для вычислений, представляет собой непрерывный ряд из 100, 1000 и 10000 измерений соответственно.

$$\varepsilon = |X_2 - X_1|. \quad (8)$$

где σ_x — стандартное отклонение координат по выборке, ΔX — значение координаты, dX — математическое ожидание, a — большая полуось эллипсоида, $s'' = 4,848136811 \times 10^{-6}$ (рад.) [2, с. 6], e — первый эксцентриситет эллипсоида [3, с. 34], X_1 — результат вычислений при повышенной точности, X_2 — результат вычислений при пониженной точности.

В соответствии с формулой (7) вычислим коэффициент повышенной точности:

$$K = 30.92778716; \quad (9)$$

На основе вычисленного коэффициента (9), возьмем коэффициент приближенного числа с точностью 0,01 с избытком (10),

при абсолютной погрешности приближения (11):

$$K' = 30,93, \quad (10)$$

$$\sigma = |K - 30,93| \quad (11)$$

где s — абсолютная погрешность приближения, K' — коэффициент пониженной точности.

Для определения влияния на результаты вычислений при различных коэффициентах, из комплексного решения, полученного от спутникового навигационного приемника (BLH), возьмем одну составляющую по широте (B).

Исходя из анализа, проведенного ранее, определим влияющий на результаты разряд дробной части коэффициента (9), как разность итоговых вычислений (8). На рис. 9 представлен результат определения влияющего разряда с округлением до восьмого разряда.

Замечание. В целях улучшения обзора динамики на графиках рис. 10–14 построен полином второй степени

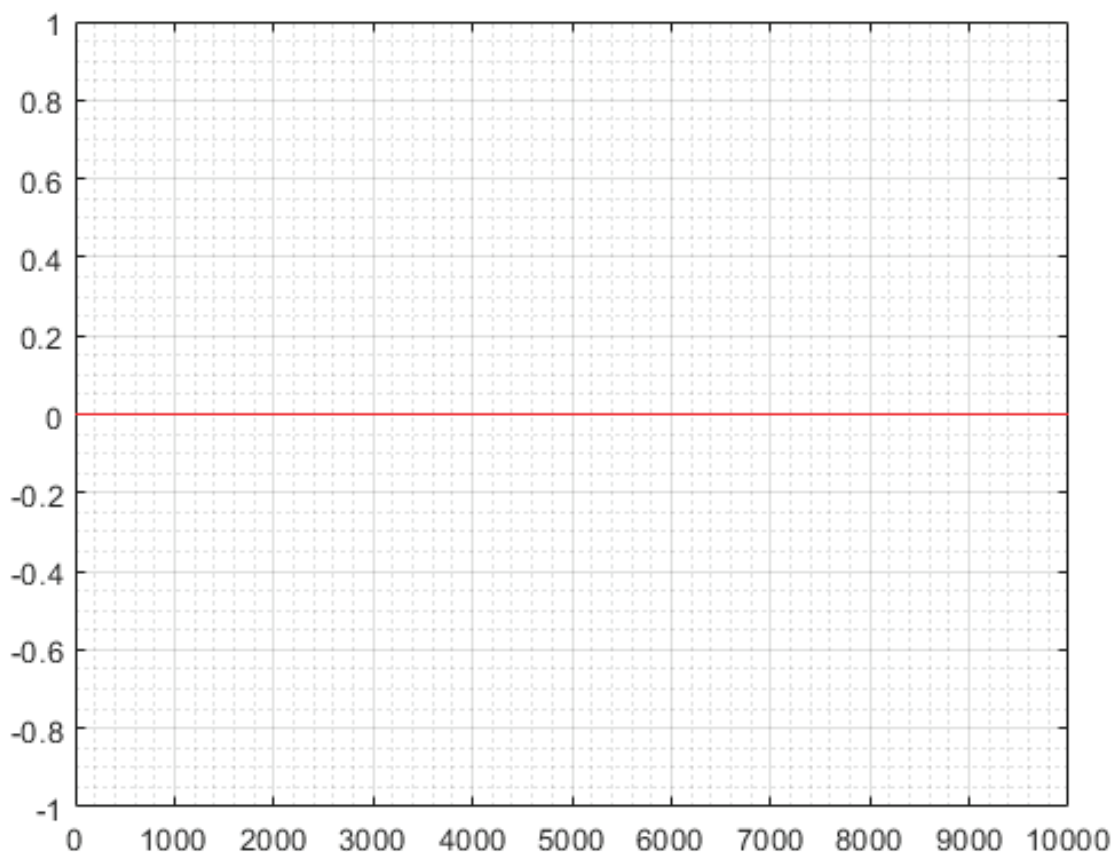


Рис. 9. Определение влияющего разряда с округлением 8

При уменьшении разрядов округления в дробной части до семи разрядов, наблюдаем на графике рис.10 появление шумов. Данные шумы говорят о том, что наблюдается расхождение результатов вычислений. Причем, при дальнейшем уменьшении разрядов в дробной части числа, амплитуда разницы результирующих значений значительно возрастает. На рис.11 представлен график с округлением до двух разрядов в дробной части числа.

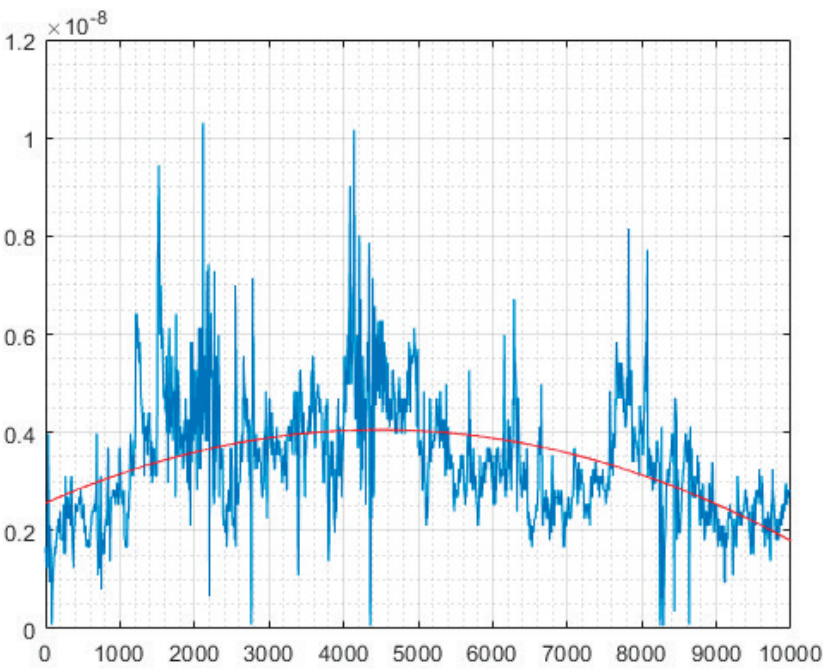


Рис. 10. Определение влияющего разряда с округлением 7

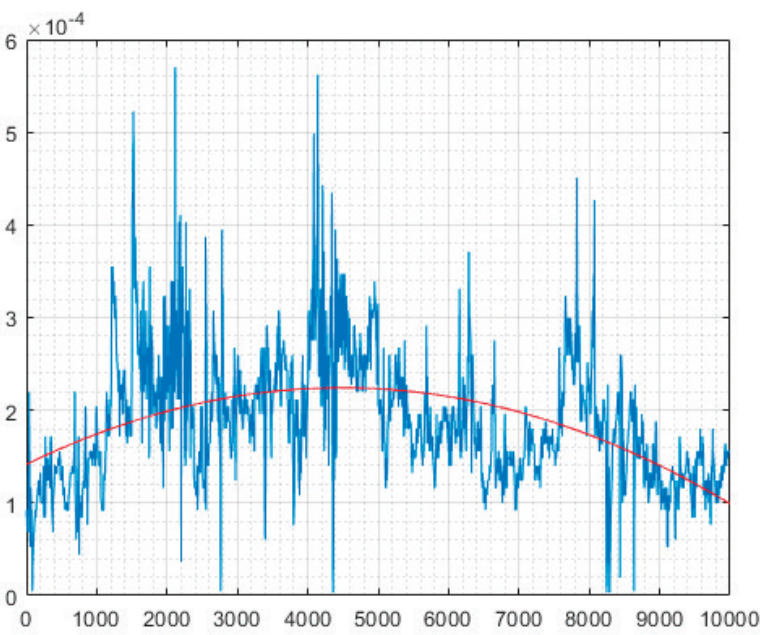


Рис. 11. Определение влияющего разряда с округлением 2

Подставим коэффициенты из формул (9) и (10) в уравнение (3) для получения координаты широты в метрах. Полученные результаты вычислений сведем в таблицу:

Таблица 1. Результаты измерений с различным коэффициентом

Изм.	Матожидание (Кповыш.)	Матожидание (Кпониж.)	СКО (Кповыш.)	СКО (Кпониж.)	3s (Кповыш.)	3s (Кпониж.)
100	1,2559	1,2560	0,6058	0,6059	3,0734	3,0736
1000	1,6715	1,6717	0,4448	0,4448	3,0059	3,0062
10000	2,6236	2,6238	0,9926	0,9926	5,6013	5,6017

Результат уравнения (8) при 100 точках измерений представлен в виде графика на рис. 12.

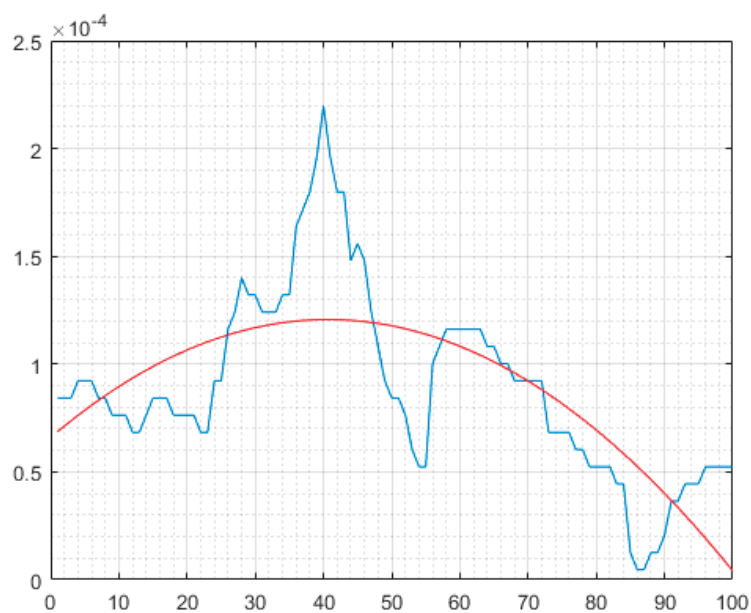


Рис. 12. Результат уравнения (8). 100 точек измерения

На рис. 12 на аппроксимированном тренде можем наблюдать, что на начальном этапе вычислений происходит не-большой рост до середины интервала с последующим снижением.

Результат уравнения (8) при 1000 точках измерения представлен в виде графика на рис.13.

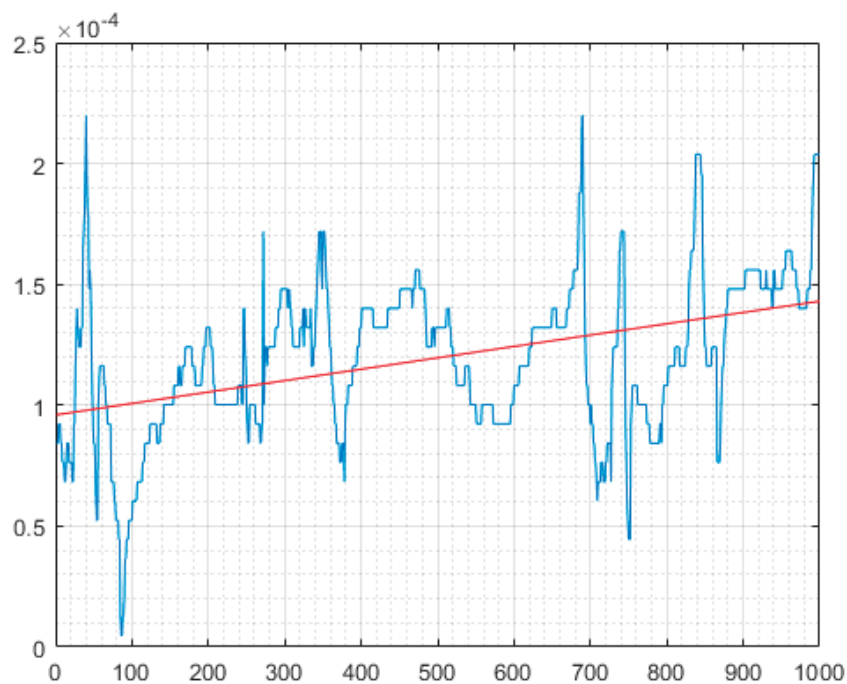


Рис. 13. Результат уравнения (8). 1000 точек измерения

На рис. 13 аппроксимированный тренд носит линейный характер на всём диапазоне.

Результат уравнения (8) при 10000 точках измерения представлен в виде графика на рис.14.

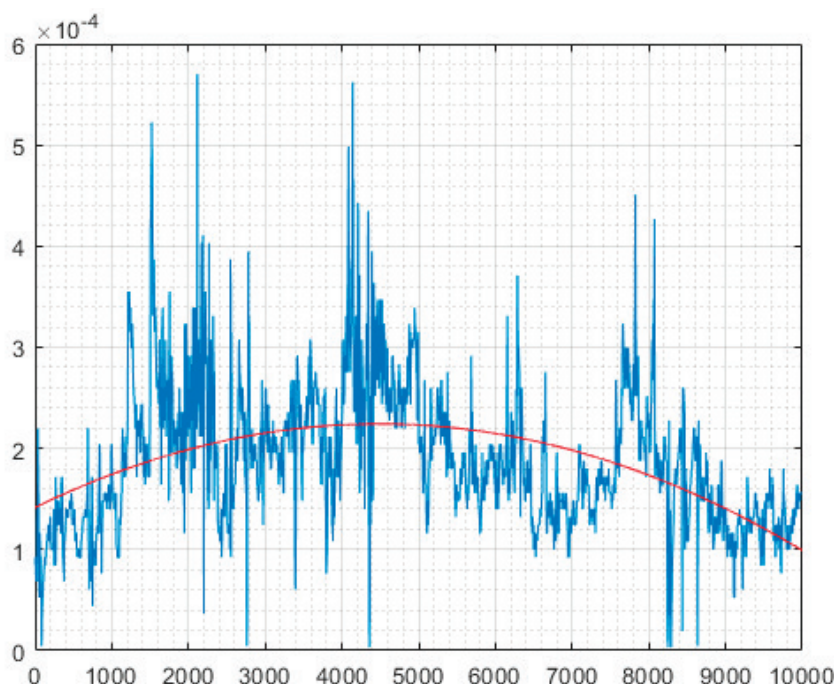


Рис. 14. Результат уравнения (8). 10000 точек измерения

На рис.14 видим, что из всей выборки (10000), аппроксимированный тренд незначительно возрастает до середины интервала. Далее наблюдаем откат к исходным значениям.

Как видно из таблицы 1, при использовании пониженного коэффициента (10), математическое ожидание незначительно смещается вправо вдоль оси абсцисс. Стандартное отклонение по выборке (СКО) остается неизменным, при этом, в следствии увеличения математического ожидания, значение $3s$ возрастает с увеличением количества измерений.

Выводы

В данной статье продемонстрированы особенности работы вычислительной машины с вещественными числами. Наглядно продемонстрировано влияние данных особенностей на результаты вычислений.

Показана работа по анализу измеренных данных с учетом влияния использования приближенных чисел на результат измерений.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что для обеспечения единства измерений при обработке данных с использованием вычислительных машин необходимо обращать внимание на используемые типы данных и формат числовых значений. Учитывать то обстоятельство, что такие факторы, как количество измерений и объем вычислений могут повлиять на конечный результат.

Литература:

1. Пустовалов Г. Е. Погрешности измерений. — Методическая разработка по общему физическому практикуму — МГУ имени М. В. Ломоносова, 2012.
2. ФГУП «ВНИИФТРИ» п. Менделеево — Методика поверки 651–13–58МП, 2013.
3. МАИ каф. 604. — Спутниковые навигационные системы, 2004.
4. ГОСТ Р 52928–2010 Система спутниковая навигационная глобальная. –Термины и определения, 2010.

Обзор применения искусственного интеллекта для автоматизации сборки и юстировки оптико-электронных приборов

Слободчиков Алексей Александрович, студент
Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

В статье рассматривается применение методов искусственного интеллекта для автоматизации процессов сборки и юстировки оптико-электронных приборов.

До активного внедрения технологий машинного зрения и искусственного интеллекта (ИИ) доминирующими подходами в юстировке были ручная настройка с использованием контрольных приборов (автоколлиматоров, интерферометров) и классические алгоритмы автоматической подстройки по заранее рассчитанным математическим моделям. Однако эти методы требуют детального предварительного моделирования искажений и не всегда эффективны в условиях непредсказуемых производственных отклонений. Прорыв в области глубокого обучения и компьютерного зрения в последние годы позволил перевести процессы сборки и юстировки на качественно новый уровень автоматизации, обеспечив возможность работы с микро- и наноразмерными объектами без постоянного участия человека [1, 2].

Ключевым преимуществом нейросетевых подходов является их способность работать в условиях априорной неопределённости, когда точная математическая модель системы неизвестна или слишком сложна для практического использования. Искусственный интеллект не просто выполняет поиск экстремума сигнала по заранее заданному алгоритму — он обучается на реальных данных, выявляет скрытые закономерности и может предсказывать оптимальные настройки, недоступные для классических градиентных методов [1].

Первое и наиболее развитое направление — автоматическая активная юстировка оптических компонентов. В этой области особенно показателен пример разработки компании Physik Instrumente (Германия) — системы F-141 PINovAlign, которая на базе встроенных алгоритмов машинного обучения выполняет многокоординатную юстировку волоконных массивов и фотонных интегральных схем в 4–6 степенях свободы [3].

Второе направление — нейросетевая калибровка измерительных оптических систем. Как отмечают исследователи Томского университета систем управления и радиоэлектроники, нейросетевой подход позволяет выполнять калибровку оптических измерительных систем даже при немонокотных и нелинейных характеристиках преобразователей, где классические методы калибровки оказываются малоэффективными [4].

Третье направление — автоматический оптический контроль в процессе сборки. В рамках европейского проекта AI-PRISM разработана полуавтоматическая сборочная станция с ИИ-модулями для автоматического позиционирования чипов и обнаружения дефектов при

сборке полупроводниковых фотонных компонентов. Результаты тестирования показали снижение когнитивной нагрузки и повышение удобства работы с системой [5].

Четвёртое направление, набирающее силу в последние годы — автоматическая юстировка с использованием методов обучения с подкреплением (Reinforcement Learning). Согласно результатам, представленным в работе сотрудников Ганноверского университета, RL-алгоритмы могут обучаться исключительно в пространстве пикселей выходного сигнала, полностью исключая необходимость разработки экспертных правил юстировки и сложных математических моделей [6].

Несмотря на очевидные успехи, внедрение ИИ в серийное производство оптико-электронных приборов сталкивается с рядом проблем. Прежде всего, это требовательность к обучающим данным: нейросети нуждаются в больших размеченных наборах «плохая юстировка — хорошая юстировка», получение которых на реальном производстве может быть трудозатратно. Частично проблему решают методы генерации синтетических данных, активно разрабатываемые, в частности, в Ганноверском университете [6].

Вторая проблема — «чёрный ящик»: многие нейросетевые решения не объясняют ход своих рассуждений. Для оборонной и аэрокосмической промышленности, где критична сертификация оборудования, это серьёзный барьер.

Третья проблема лежит на стыке технологий и экономики: мелкосерийное и штучное производство часто делает неоправданно дорогой полную роботизацию процессов юстировки. Выходом может стать частичная автоматизация — гибридные системы, где оператору ассистирует ИИ, подсказывая направление регулировок и контролируя качество [2, 5].

Таким образом, методы искусственного интеллекта и машинного обучения становятся критически важным инструментом в процессах сборки и юстировки современных оптико-электронных приборов. Нейросетевые алгоритмы позволяют автоматизировать многокоординатную юстировку с микро- и нанометровой точностью [3], калибровать измерительные каналы при немонокотных характеристиках [4], а также ассистировать оператору при сборке фотонных интегральных схем [5]. Дальнейшее развитие нейросетевых технологий будет способствовать повышению точности, снижению себестоимости и масштабируемости производства оптической продукции — от мелкосерийных научных приборов до массовой потребительской электроники [1, 2].

Литература:

1. Uddin S. Z., Vaidya S., et al. AI-Driven Robotics for Optics // arXiv:2505.17985. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.17985> (дата обращения: 18.05.2026).
2. Risbridger D., Robb D. A., et al. Framework for the Adoption of Automation in the Manufacture of Optical Systems // Optica Design and Fabrication Congress 2025. 2025.
3. Physik Instrumente (PI). F-141 PINovAlign Photonics Alignment System // PI USA. 2025. URL: <https://www.pi-usa.us/en/products/photonics-alignment-solutions/> (дата обращения: 18.05.2026).
4. Замятин Н. В., Смирнов Г. В., Маковкин В. И. Нейросетевая калибровка датчиков для технологий микро- и наноэлектроники // Успехи кибернетики. 2022. Т. 3. № 3. С. 74–82.
5. Kołcon T., Goławski K. AI and Human-Robot Collaboration for Sustainable Microrobotic Assembly in Semiconductor Manufacturing // AI-PRISM Project. 2025. URL: <https://aiprism.eu/ai-and-human-robot-collaboration-for-sustainable-microrobotic-assembly-in-semiconductor-manufacturing/> (дата обращения: 18.05.2026).
6. Fritze A. L., Overmeyer L. Investigations into the Use of Synthetic Image Data for the Automated Active Alignment of Micro-Optics // PhoenixD. 2025. URL: <https://www.phoenixd.uni-hannover.de/> (дата обращения: 18.05.2026).

АРХИТЕКТУРА, ДИЗАЙН И СТРОИТЕЛЬСТВО

Фронтير исторического и современного города как объект ландшафтно-градостроительного проектирования (на примере Самарканда)

Дробченко Наталья Валерьевна, кандидат архитектуры, и. о. профессора;

Кулдашев Шахбоз Дильшодович, студент магистратуры

Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени М. Улугбека (Узбекистан)

Вахидова Лола Ринатовна, докторант

Международный университет туризма и культурного наследия «Шелковый путь» (г. Самарканд, Узбекистан)

В статье рассматриваются проблемы взаимодействия исторической и современной городской среды на примере Самарканда. Особое внимание уделяется фронтальным территориям, расположенным на границе исторической застройки и современных городских пространств. Анализируются основные пространственные и функциональные конфликты, возникающие в процессе урбанизации исторического города. Рассматриваются международные подходы к интеграции культурного наследия, общественных пространств и зеленой инфраструктуры в структуру современного города. Предлагается концептуальная модель формирования переходных пространств между исторической и современной городской средой с использованием зеленых коридоров, туристических маршрутов и общественных пространств. Результаты исследования могут быть использованы при разработке стратегий устойчивого развития исторических городов и проектировании культурно-туристических территорий.

Ключевые слова: фронталь города, историческая среда, культурный ландшафт, Самарканд, ландшафтное проектирование, зеленая инфраструктура, общественные пространства, устойчивый туризм.

Введение

Современные исторические города находятся в условиях интенсивной урбанизации и трансформации городской среды, что приводит к возникновению пространственных и функциональных конфликтов между исторической застройкой и современным развитием города [1]. Особенно актуальна данная проблема для городов, обладающих значительным культурным наследием и высоким туристическим потенциалом. Одним из таких городов является Самарканд — один из древнейших городов Центральной Азии, включённый в Список Всемирного наследия UNESCO. Историческая структура города формировалась на протяжении многих столетий и представляет собой сложную систему архитектурных ансамблей, общественных пространств и культурных ландшафтов.

В современных условиях развитие туристической инфраструктуры и транспортной системы приводит к активной трансформации территорий, расположенных между историческим ядром и современной городской застройкой. Подобные зоны можно рассматривать как своеобразный «фронталь» — переходное пространство между

историческим и современным городом. Данные территории обладают высокой градостроительной и ландшафтной значимостью, поскольку формируют визуальное восприятие города, обеспечивают пространственную связность городской структуры и выступают зонами интеграции культурных, общественных и туристических функций [2]. Целью исследования является выявление принципов ландшафтно-градостроительного проектирования фронтальных территорий между исторической и современной городской средой на примере Самарканда.

Фронтальные территории исторического города как объект ландшафтно-градостроительного исследования

В современной урбанистике понятие фронта используется для обозначения переходных территорий, возникающих на стыке различных пространственных и функциональных систем [3]. В исторических городах подобные зоны формируются между объектами культурного наследия и современной городской застройкой, выполняя роль пространственного и визуального пере-

хода между различными типами городской среды. Подобные территории отличаются высокой интенсивностью использования и многообразием функций. Здесь сосредоточены туристические маршруты, транспортные узлы, общественные пространства и элементы культурного наследия. Для исторических городов фронтальные территории играют важную роль в формировании городской идентичности и визуального образа города. Именно данные пространства обеспечивают переход от исторической застройки к современным городским структурам.

К основным особенностям фронтальных территорий относятся:

- высокая функциональная насыщенность;
- конфликт исторической и современной застройки;
- интенсивное туристическое использование;
- транспортная нагрузка;
- дефицит общественных пространств.

Особое значение в развитии подобных территорий приобретает ландшафтный подход, позволяющий рассматривать городскую среду как единую систему природных, архитектурных и социальных компонентов [4].

Проблемы взаимодействия исторической и современной городской среды в Самарканде

В последние годы Самарканд переживает активный этап градостроительной трансформации, связанный с развитием туристической инфраструктуры и общественных пространств. Данные процессы способствуют модернизации городской среды, однако одновременно усиливают нагрузку на исторические территории [5].

Одной из ключевых проблем является нарушение масштабного и визуального соответствия между исторической застройкой и современными архитектурными объектами. Современное строительство нередко приводит к изменению традиционного силуэта города и нарушению визуальных связей.

Существенной проблемой является также высокая транспортная нагрузка на исторические районы. Рост ту-

ристического потока приводит к ухудшению экологической ситуации и снижению качества городской среды [6].

Дополнительной проблемой остается недостаточная связанность общественных пространств и туристических маршрутов. Многие территории исторического центра остаются фрагментированными и недостаточно интегрированными в единую систему городской среды.

Для фронтальных территорий Самарканда можно выделить следующие основные проблемы (табл. 1).

В международной практике решение подобных проблем осуществляется посредством комплексного ландшафтно-градостроительного подхода, основанного на интеграции культурного наследия, общественных пространств и природных компонентов городской среды [7].

Международный опыт интеграции исторической и современной городской среды

В мировой практике интеграция исторического наследия и современной городской среды рассматривается как одно из ключевых направлений устойчивого градостроительного развития. Одним из наиболее распространенных подходов является концепция Historic Urban Landscape (HUL), разработанная UNESCO. Данный подход предполагает сохранение не только отдельных памятников архитектуры, но и всей исторической структуры города [8].

В европейских городах большое внимание уделяется формированию пешеходных и зеленых связей между историческими и современными территориями. Например, в Барселоне исторические районы интегрируются с современной городской средой посредством общественных пространств и озелененных маршрутов. Интересный опыт наблюдается также в Стамбуле, где исторические районы соединяются с современными общественными пространствами через систему набережных и культурных маршрутов [9]. Для Самарканда применение подобных подходов может способствовать формированию более устойчивой и гармоничной городской среды, основанной на интеграции культурного наследия, туристических маршрутов и общественных пространств [10].

Таблица 1. Основные проблемы фронтальных территорий Самарканда

Проблема	Проявление	Последствия
Пространственный конфликт старой и новой застройки	Контраст архитектурных решений	Утрата исторической идентичности
Высокая транспортная нагрузка	Интенсивное движение транспорта	Шум и загрязнение
Недостаток общественных пространств	Ограниченное количество пешеходных зон	Снижение качества городской среды
Фрагментация туристических маршрутов	Слабая связанность объектов наследия	Снижение туристической привлекательности
Сокращение озеленения	Недостаток зеленых коридоров	Ухудшение микроклимата

(разработано авторами на основе [1; 5–8])

Концептуальные подходы к формированию фронтальных территорий Самарканда

Современное развитие фронтальных территорий требует комплексного подхода, объединяющего принципы ландшафтной архитектуры, градостроительства и охраны культурного наследия. Одним из ключевых направлений является создание непрерывной системы общественных и пешеходных пространств. В историческом городе пешеходные маршруты выполняют не только транспортную функцию, но и формируют культурное восприятие городской среды [11]. Важную роль играет формирование зеленых коридоров, способствующих улучшению микроклимата и созданию комфортной городской среды. Особое внимание должно уделяться созданию буферных пространств между исторической и современной городской средой. Подобные территории могут включать:

- общественные площади;
- озеленённые пространства;
- пешеходные зоны;
- культурно-рекреационные территории.

На основе проведенного анализа предлагается концептуальная модель развития фронтальных территорий Самарканда (рис. 1).

Предлагаемая модель ориентирована на формирование непрерывной системы общественных пространств, объединяющих различные части города в единую культурно-ландшафтную структуру.

Заключение

В условиях современной урбанизации исторические города сталкиваются с необходимостью поиска баланса между сохранением культурного наследия и развитием современной городской инфраструктуры.

Проведённое исследование показало, что фронтальные территории обладают высокой градостроительной и ландшафтной значимостью. Именно данные пространства обеспечивают пространственную связность города и выступают основой интеграции туристических, общественных и экологических функций.

На примере Самарканда выявлены основные проблемы фронтальных территорий:

- конфликт исторической и современной застройки;
- транспортная перегруженность;
- недостаток общественных пространств;
- фрагментация туристических маршрутов.

В работе предложена концептуальная модель формирования фронтальных территорий Самарканда, основанная на интеграции исторического наследия, зеленой инфраструктуры и туристических маршрутов в единую пространственную систему. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенных подходов при разработке стратегий устойчивого развития исторических городов и проектировании культурно-туристических территорий.

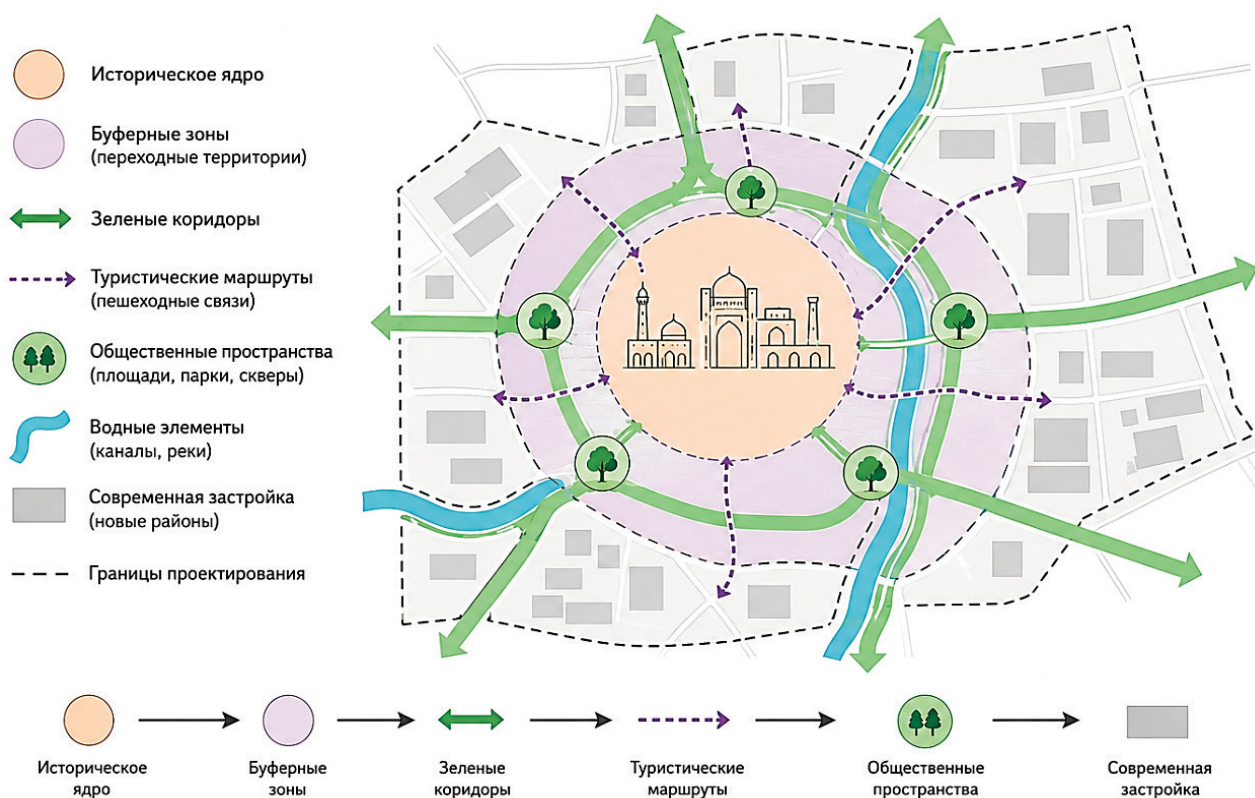


Рис. 1. Концептуальная модель интеграции исторической и современной городской среды Самарканда (разработано авторами)

Литература:

1. Lynch K. The Image of the City. — Cambridge: MIT Press, 1960. — 194 p.
2. Norberg-Schulz C. Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture. — New York: Rizzoli, 1980. — 213 p.
3. Corner J. The Landscape Urbanism Reader. — New York: Princeton Architectural Press, 2006. — 240 p.
4. Waldheim C. The Landscape Urbanism Reader. — New York: Princeton Architectural Press, 2016. — 296 p.
5. Дробченко Н. В. Экономическая эффективность внедрения зелёной инфраструктуры в историческую среду Самарканда // Economy and Ecology of Territorial Educations. — 2025. — Vol. 9. — No. 3. — P. 53–60.
6. Gehl J. Cities for People. — Washington: Island Press, 2010. — 269 p.
7. Beatley T. Green Urbanism: Learning from European Cities. — Washington: Island Press, 2012. — 511 p.
8. UNESCO. Recommendation on the Historic Urban Landscape. — Paris: UNESCO, 2011. — 36 p.
9. Ashworth G. J., Tunbridge J. E. The Tourist-Historic City. — London: Routledge, 2000. — 304 p.
10. Дробченко Н. В. Пространственная безопасность общественных ландшафтов: мультисенсорный подход к снижению стрессовых факторов городской среды // XXI Century. Technosphere Safety. — 2025. — Vol. 10. — No. 3 (39). — P. 293–300.
11. Дробченко Н. В., Кулдашев Ш. Д., Вахидова Л. Р. Интеграция культурного наследия Шёлкового пути в современные ландшафтные и туристические маршруты (на примере Самарканда) // Culture and Ecology of the Silk Road: Studying the Interrelationship Between Nature and Traditions: материалы Международной научной конференции, 14–15 мая 2026 г. — Самарканд, 2026. — DOI: 10.5281/zenodo.20274301.

Сравнительный анализ рулонных и монолитных кровельных систем для плоских неэксплуатируемых крыш

Красиков Владислав Романович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

На сегодняшний день основными решениями для плоских неэксплуатируемых кровель, которые широко применяются в строительстве благодаря экономичности, выступают рулонные покрытия, такие как битумные, битумно-полимерные и полимерные мембраны, а также монолитные, бесшовные, покрытия на основе жидких полимеров, резины и мастики. В данной статье будет произведён сравнительный анализ рулонных и бесшовных кровельных систем с точки зрения экономии, технологичности и эксплуатации для выявления правильности подбора кровельной системы с учётом специфики кровли и климатических условий, преобладающих в регионе.

Ключевые слова: плоская кровля, рулонная мембрана, адгезия, неэксплуатируемая крыша.

Comparative analysis of rolled and monolithic roofing systems for flat unused roofs

Krasikov Vladislav Romanovich, master's student
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (St. Petersburg)

Today, the main solutions for flat non-employed roofs, which are widely used in construction due to their cost-effectiveness, are rolled coatings such as bitumen, bitumen-polymer and polymer membranes, as well as monolithic, seamless coatings based on liquid polymers, rubber and mastic. This article will provide a comparative analysis of rolled and seamless roofing systems in terms of economy, technological effectiveness and operational matters to identify the correct selection of the roofing system, taking into account the specifics of the roof and the climatic conditions prevailing in the region.

Key words: flat roof, rolled membrane, adhesion, unused roof.

Рассмотрим покрытие плоских неэксплуатируемых кровель: таких как рулонные и монолитные. Среди популярных решений для рулонных кровельных материалов, используемых в современном строительстве, стоит отметить рубероид, рубемаст и стеклоизол или стеклорубероид. Последний тип рулонного материала представляет

собой многослойный рубероид, имеющего основание из стеклоткани, благодаря чему значительно повышаются его гидроизолирующие свойства.

Укладку рулонных материалов, как правило, производят полосами в один или два слоя внахлёт. Швы склеиваются или свариваются, поэтому рекомендуется укла-

дывать рулоны таким образом, чтобы перекрывать швы минимум на 80 мм, максимум на 120 мм. К примеру, битумно-полимерные рулоны наплавляются при помощи газовых горелок либо приклеиваются, а полимерные мембраны сваривают горячим воздухом. Толщина покрытия составляет обычно от 1.5 до 4 мм.

Монолитные покрытия отличает способ их нанесения на кровлю. Их формируют непосредственно на месте, нанося жидкий полимер на крышу заливкой или напылением. Преимущество такого способа — это отсутствие швов, которые, как правило, являются основной причиной протечек кровли. Однако, тут стоит учесть, что качество покрытия напрямую зависит от квалификации оператора, так как, если основание подготовлено недостаточно хорошо, а напыление будет производиться с неравномерной толщиной, то могут возникать тонкие места в слое, где также возможна протечка. Толщина слоя зависит от используемого состава. При использовании полиуретановых мастик, обладающих хорошей эластичностью, рекомендуемая толщина слоя составляет не менее 1.5 мм и не более 3 мм. Полимочевину, в качестве покрытия, отличает высокая скорость затвердевания, порядка 5–30 сек, и высокая, сравнительно с другими видами покрытий, прочность. Акриловые эмульсии используют исключительно в условиях мягкого и умеренного климата по причине её низкой морозостойчивости.

В отношении простоты и удобства монтажа стоит отметить, что рулонные материалы монтируются на порядок быстрее, однако требуется специализированное оборудование для сварки швов. Качество соединения рулонов напрямую зависит от квалификации персонала, выполняющего работу. Отмечается, также сложность при герметизации сложных элементов, таких как трубы или антенны. Монолитные покрытия, в свою очередь, весьма чувствительны к погоде. Так, например, полимочевину нельзя наносить при температуре ниже 5 градусов Цельсия и влажности более 80 %. Из-за низкой температурной и климатической устойчивости долговечность монолитных систем уступает рулонным. Также, стоит отметить, что монолитное покрытие практически невозможно нанести равномерно на вертикальную поверхность. Однако, они остаются незаменимым решением для сложных геометрических форм.

Если говорить о ремонтопригодности, то рулонные материалы выигрывают у монолитных покрытий. Ремонт монолитных покрытий производить сложнее, и он требует больших затрат. Требуется тщательная подготовка поверхности, после чего наносится новый слой таким образом, чтобы перекрыть старый. В случае с рулонными покрытиями достаточно установить на повреждённом месте заплату из аналогичного материала.

При выборе кровельной системы необходимо руководствоваться общими рекомендациями и учитывать плюсы и минусы каждого покрытия. Рулонные системы, такие как полимерные или битумные, стоит рассмотреть при ограниченном бюджете. Если крыша не имеет боль-

шого количества проходок и геометрия её проста, тогда рулонные материалы станут идеальным вариантом. Но нужно учитывать, что возможно придётся произвести замену покрытия примерно через 15 лет после укладки, если не раньше, так как рулонные материалы склонны к образованию трещин. В то же время для монолитных систем срок эксплуатации может составлять более 25 лет. При наличии на крыше потенциальных участков стоячей воды монолитное покрытие станет идеальным вариантом благодаря своей высокой гидроизоляции, также выбор в пользу монолитной системы покрытия очевиден при наличии сложной конфигурации кровли.

В качестве перспектив развития кровельных систем отмечается устойчивая тенденция на экологичность используемых материалов, технологические инновации и повышение эффективности покрытий.

Сейчас активно идёт разработка материалов с улучшенными эксплуатационными и физико-механическими свойствами. На рынке в настоящее время востребованными остаются системы, обладающие высокой прочностью, устойчивостью к воздействию агрессивных сред и долговечностью. При этом важным показателем остаётся цена-качество. Для этой цели создаются композитные материалы, обладающие всеми вышеперечисленными качествами. Востребованными остаются энергоэффективные решения с отражающими поверхностями и повышенной герметичностью, совместимые с современными утеплителями. Повсеместно происходит интеграция дополнительных функций, к примеру, ионизаторов воздуха, систем антиобледенения и фотоэлектрических элементов, внедряются различные системы мониторинга раннего выявления дефектов кровли, расширяется цветовая гамма доступных решений.

Среди основных трендов, преобладающих в отрасли в настоящее время стоит отметить следующие:

- самовосстанавливающиеся мембраны, структура которых позволяет «затягивать» повреждённые участки под действием давления и температуры, что значительно снижает затраты на ремонт кровли и увеличивает срок её службы;
- белые отражающие покрытия (Cool Roof) обладают высокой отражающей способностью, тем самым снижая нагрев кровли на солнце и уменьшая необходимость использования кондиционеров воздуха внутри помещения;
- использование мембран на основе вторсырья без использования токсичных и вредных для людей и животных материалов;
- использование эксплуатируемых крыш для размещения бассейнов, террас или лаундж-зон, а также технических крыш, на которых размещают системы вентиляции или кондиционирования и даже солнечные батареи;
- энергоэффективность путём снижения теплопотерь в зимний период и минимизация перегрева летом;
- переход к более лёгким материалам, не требующим трудоёмкого монтажа и использования дополнительного профессионального оборудования;

– разработка материалов и покрытий на основе каучуков, термоэластопластов и полиизобутилена. Такие материалы обладают высокой устойчивостью к окислению, УФ-излучению и сохраняют эластичность при температурах от минус 60 до плюс 100 градусов Цельсия.

При выборе между монолитными и рулонными системами покрытия для неэксплуатируемых плоских крыш следует опираться на предварительный анализ климатических условий, преобладающих в регионе, геометрии кровли, тре-

бований к долговечности и бюджета. Рулонные системы покрытия обладают высокой степенью ремонтопригодности и обеспечивают быстрый монтаж, в то время, как монолитные дают гарантию высокой герметичности и прекрасно подходят при сложной геометрии крыши или наличия сложных узлов. Так или иначе, отдавая предпочтение той или иной кровельной системе необходимо отдавать предпочтение максимально квалифицированному персоналу и обеспечить строгое соблюдение технологии покрытия.

Литература:

1. СП 17.13330.2017 Кровли. Актуализированная редакция СНиП II-26-76 (с Изменениями N 1, 2, 3)
2. ГОСТ 30547-97 Материалы рулонные кровельные и гидроизоляционные. Общие технические условия
3. ГОСТ 32806-2014 Черепица битумная. Общие технические условия
4. ГОСТ 30693-2000 Мастики кровельные и гидроизоляционные. Общие технические условия (с Поправкой)
5. СП 71.13330.2017 Изоляционные и отделочные покрытия. Актуализированная редакция СНиП 3.04.01-87

Инновационные тенденции развития крепёжных систем вентилируемых фасадов

Красиков Александр Романович, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

В последние годы в строительстве для облицовки жилых зданий всё чаще используют вентилируемые фасады. Из-за ухода с российского рынка иностранных брендов, производители вынуждены были заменить конструктивные элементы импортного производства отечественными деталями. Благодаря программе по импортозамещению производителям не только удалось на 90 % закрыть потребность в крепёжных элементах вентилируемых фасадов, но и придумать совершенно новые инновационные системы крепежа. В данной статье будет произведён краткий обзор имеющихся на российском рынке крепёжных решений, равно как и анализ возможных тенденций их развития.

Ключевые слова: крепёжные системы, скрытое крепление, кастомные кронштейны, вентфасад.

Innovative development tendencies of ventilated facades fastening systems

Krasikov Aleksandr Romanovich, master's student
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

In recent years, ventilated facades have been increasingly used in construction for cladding residential buildings. Due to the withdrawal of foreign brands from the Russian market, manufacturers were forced to replace imported structural elements with domestic parts. Thanks to the import substitution program, manufacturers have not only managed to eliminate the need for fasteners for ventilated facades by 90 %, but also come up with completely new innovative fastening systems. There will be done a brief overview of existing fastening solutions as well as development tendencies in this article.

Keywords: fastening systems, hidden fastening, custom brackets, ventilated facade.

Навесной вентилируемый фасад (НВФ) представляет собой многослойную систему наружной облицовки зданий. НВФ успешно сочетает в себе декоративную, защитную и теплоизоляционную функции. Главной особенностью данной системы является наличие воздушного зазора между стеной здания и облицовкой, благодаря которому обеспечивается достаточная циркуляция воздуха и предотвращается излишнее скопление влаги.

Неоспоримым является тот факт, что в настоящее время вентилируемые фасады считаются наиболее прак-

тичным и, как следствие, востребованным решением для отделки жилых зданий. Их отличают такие качества, как энергоэффективность, долговечность и архитектурная выразительность.

Одним из основных элементов НВФ, определяющая надёжность всей системы в целом, а также определяющая её срок службы и эксплуатационные характеристики, является крепёжная подсистема. В условиях непрерывного роста требований к качеству жилья, увеличения спроса на отечественные материалы, российские производители вы-

нуждены активно внедрять инновационные крепёжные решения. Действующий на сегодняшний день нормативные документы СП 293.1325800.2017 и ГОСТ Р56707–2015 регулируют правовую базу в отношении проектирования и монтажа.

Бюджетные варианты решений монтажа для типового строительства и строительства социальных объектов можно отнести к массовому сегменту. Инженерные премиум решения применяют при возведении высотных или сложных в архитектурном плане зданий. Премиум сегмент включает в себя материалы и системы, выполненные на основе алюминия и других нержавеющих сплавов. Нишевый сегмент включает в себя различные специализированные системы, которые в основном используются в частном домостроении, либо для реконструкции объектов с особыми требованиями к внешнему виду, акустике и т. п.

Среди всего многообразия инновационных материалов, используемых при изготовлении современных крепёжных систем можно выделить следующие: нержавеющую или оцинкованную сталь, которая обеспечивает хорошую коррозионную устойчивость и прочность, алюминиевые сплавы, используемые для облегчения конструкции и композитные материалы, применяемые при создании гибридных систем, в которых присутствуют повышенные требования к эксплуатационным характеристикам.

Конструктивные решения играют важную роль в процессе монтажа вентилируемых фасадов и призваны упростить и облегчить процесс. Модульность и унификация отдельных элементов позволяет значительно ускорить монтаж и максимально сократить количество отходов, а также упростить дальнейшее обслуживание.

Проанализировав ряд современных проектов и технических решений, можно выделить несколько основных трендов в эволюции крепёжных систем.

Классический способ фиксации облицовки подразумевает использование видимых кляммеров или заклёпок, что неизбежно нарушает видимую «чистоту» фасада. Инновационным решением, которое особенно набирает популярность в сферах социальной и премиальной архитектуры, является скрытое крепление с применением структурного силиконового герметика. Принцип этого крепления заключается в следующем: металлические прижимы, как таковые, отсутствуют, а облицовочная панель приклеивается к несущим профилям подконструкции высокопрочным клеем, способным выдерживать температурные и ветровые нагрузки.

Такой метод крепления облицовочных панелей можно встретить, например, на фасаде городской клинической

больнице имени Боткина в Москве. Именно для этого здания использовалась подсистема с клеевой фиксацией керамических плит LAMINAM и стемалита (эмалированное стекло). В результате удалось создать «чистую» архитектурную плоскость с высокой несущей способностью.

Увеличение сложности архитектурных форм ведёт к отказу от использования стандартных линейных кронштейнов в пользу кастомных, то есть индивидуально изготовленных. Тенденция ярко прослеживается в проектах, где здания имеют непрямоугольную геометрию. Так, например, при строительстве ЖК Fantastic House в Москве из-за наличия узких армированных простенков и внутренних водосточных стояков инженерам пришлось разработать особые сварные Н-образные кронштейны, которые позволили «обойти» препятствия и закрепить стеклофибробетонные панели весом до нескольких сотен килограммов.

При монтаже вентфасадов металлические кронштейны, которые проходят через слой утеплителя, создают, так называемые, мостики холода, снижая сопротивление теплопередаче стены до 40 %. В данном случае усовершенствования направлены на увеличение длины пути теплового потока посредством использования полиамидных термовкладышей в кронштейнах и применения химических анкеров.

В настоящее время основными направлениями развития отрасли является соблюдение норм экологической безопасности, внедрение цифровых технологий, унификацию и стандартизацию. Использование BIM-моделей или ТИМ на каждом из этапов производства значительно повышает точность инженерных расчётов и, как следствие, снижает риски, связанные с влиянием человеческого фактора и позволяет оптимизировать затраты.

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что следование путём инновационного развития в сфере крепёжных систем — логичный и естественный процесс, диктуемый современными условиями. Отечественный рынок крепёжных систем НВФ демонстрирует устойчивый рост и стремление к полной независимости от импорта, а также готовность к внедрению передовых технологий и использованию смелых решений. Дальнейшее развитие отрасли направлено на развитие экологической безопасности и цифровизацию, а также на универсализацию и стандартизацию крепёжных систем, что соответственно скажется положительным образом на качестве и скорости массового панельного домостроения и обеспечит соответствие современным требованиям к жилым и промышленным зданиям.

Литература:

1. Как «Фасадные Решения» реализовали скрытое крепление на Боткина // РБК Компании. 30.03.2026. URL: <https://companies.rbc.ru> (дата обращения: 03.04.2026).
2. ГОСТ Р 58154–2018. Материалы подконструкций навесных вентилируемых фасадных систем. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2018.

3. Колесова Е. Н. Навесной вентилируемый фасад: классификация элементов, входящих в его состав, и проблемы, связанные с проектированием воздушного зазора // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2016. Т. 7, № 2. С. 22–28.
4. Кастомные решения для многогранных вентфасадов // Newton Systems. 08.11.2024.
5. Кастомные решения для многогранных вентфасадов // Newton Systems. 08.11.2024.
6. ГОСТ Р 70573–2022. Элементы облицовки, узлы и детали крепления фасадных навесных вентилируемых конструкций. Параметры долговечности. — М.: Стандартинформ, 2022.
7. Счет за отопление станет меньше: новый крепеж повысит теплоизоляцию домов // SCI-NEWS. 18.09.2025.
8. Копейка Д. В. Теплотехническая однородность навесных вентилируемых фасадов и экономическая эффективность // Вестник ДонНУ. 2019. № 1(135). С. 107–112.
9. Инновационные материалы и технологии для ускорения монтажных процессов // Инвест-Форсайт. 07.10.2025.

Инженерные сооружения Кавказа: дороги, мосты, крепости — от древности до СССР

Лутай Максим Алексеевич, студент

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

В статье рассматривается эволюция инженерных сооружений на Кавказе с древнейших времен до советского периода, с особым акцентом на качественный скачок в инфраструктурном развитии в XIX — начале XX века, обусловленный российским военно-инженерным освоением региона. Анализируются преемственность и новаторство в строительстве дорог, мостов и крепостных комплексов. На основе исторических источников и исследований демонстрируется, как инженерная деятельность русской армии, сочетавшая военные и гражданские задачи, стала ключевым фактором интеграции Кавказа в общеперсское и общесоюзное пространство, заложив материально-техническую основу для последующего развития в СССР.

Ключевые слова: Кавказ, инженерные сооружения, Военно-Грузинская дорога, российская армия, фортификация, дорожное строительство, мосты, XIX век, СССР, колонизация.

История пребывания российской армии на Северном Кавказе в первой половине XIX в. связана не только с военными действиями, но и с мирной, созидательной работой российских солдат и офицеров по обустройству территорий, присоединенных к России. «Уже в XIX в. на Западе стали обращать внимание на цивилизаторскую роль российской армии в регионе. Например, американский исследователь Дж. Джонсон полагал, что ослаблению напряжения в русско-кавказских отношениях благоприятствовало «сочетание гражданского и военного начал», под которыми он понимал способность русской армии на Кавказе действовать не только по прямому назначению, но и в качестве созидательной силы» [2, с. 73]. А известный французский дипломат Кюшваль Клариньи отмечал, что «главная сила русского могущества «заключается в качествах русского солдата, благодаря которым он служит бесценным орудием завоевания и колонизации. Равномерно послушный и храбрый, довольный малым, перенося без ропота усталости и лишения... русский солдат строит мосты, роет каналы и возобновляет древние плотины; он обжигает кирпичи, из которых строит потом крепости и казармы для себя; он приготавливает свои заряды и снаряды; он каменщик, литейщик или плотник, смотря по требованию времени, а на другой день по получении отставки берется с удовольствием за соху. Имея

в своем распоряжении такие орудия, русское могущество никогда не отступит: для него достаточно нескольких лет, чтобы окончательно покорить занятую им страну» [1, с. 309]. «Утверждение российской власти на Северном Кавказе потребовало немалых людских и материальных ресурсов. Как отмечал генерал Р. А. Фадеев, «устройство занятой части края требовало еще обширных работ», нужно было вырубить просеки, связать населенные пункты дорогами, создать мосты и переправы» [3, с. 169].

Инженерное освоение Кавказа имеет глубокие корни. Дороги древности и Средневековья (например, пути через Дарьяльское и Дербентский проходы), а также традиционные мосты местных народов (арочные, балочные из камня и дерева) и ранние крепости (как античные, так и средневековые, вроде грузинских крепостей или дагестанских аулов-цитаделей) свидетельствовали о высоком мастерстве строителей, адаптировавшихся к сложному рельефу. Однако эти сооружения зачастую имели локальное значение и не образовывали единой инфраструктурной сети.

Коренной перелом наступил с активным включением Кавказа в состав Российской империи. Инженерные сооружения стали главным материальным каркасом этого процесса. В дорожном строительстве ключевым проектом стало кардинальное усовершенствование Военно-Грузинской до-

роги. Из опасного горного тропа, описанного А. С. Пушкиным и М. Ю. Лермонтовым, она силами солдат, казаков и наемных рабочих была превращена в инженерное шоссе с вырубленными в скалах участками, подпорными стенами, системой водоотвода и станциями. Параллельно создавалась сеть военных дорог (Военно-Сухумская, Военно-Осетинская) и просек, которые, будучи проложенными первоначально для оперативного перемещения войск, стали артериями для торговли и заселения. Мостостроение также перешло на новый уровень. Наряду с использованием местных традиций (например, арочные каменные мосты), русские инженеры внедряли передовые по тем временам технологии: деревянные и позже металлические фермы, висячие системы. Мосты через Терек, Кубань, Аргун и другие реки стали не просто переправами, а символами преодоления пространственной разобщенности края.

Крепости эволюционировали от средневековых укреплений к регулярной фортификации Нового времени. На смену и в дополнение к древним цитаделям (как Дербентская) пришли мощные крепости, построенные по последним канонам: Владикавказская, Грозная, Внезапная, укрепления Кавказских Минеральных Вод. Они были не только военными опорными пунктами, но и центрами будущих городов, вокруг которых концентрировалась гражданская жизнь. В пореформенный период и на рубеже XX века инженерная мысль была направлена на дальнейшее развитие транспорта: началось строительство железных дорог (Владикавказская железная дорога), появились большепролетные металлические и бетонные мосты.

Советский период унаследовал и радикально трансформировал эту инфраструктурную базу. Инженерные сооружения стали рассматриваться в контексте плановой экономики и индустриализации всего региона. Если царские дороги и крепости служили преимущественно военно-административной интеграции, то советские про-

екты были нацелены на экономическое преобразование. Строились новые автомобильные дороги (Военно-Сухумская дорога была реконструирована), развернулось масштабное железнодорожное строительство (линии на побережье Черного моря, подходы к Закавказью). Мосты возводились из железобетона по типовым проектам, становясь элементами всесоюзной транспортной сети. Крепости утратили военное значение, многие были разрушены или стали памятниками, а их градообразующая функция перешла к промышленным предприятиям и новым жилым районам. Особый размах приобрело курортное строительство, требовавшее сложной инженерной инфраструктуры.

Эволюция инженерных сооружений Кавказа от древности до СССР отражает смену цивилизационных парадигм взаимодействия с горным пространством. От локальных, адаптивных решений древних и средневековых обществ регион перешел к планомерному, системному инфраструктурному освоению в имперский и особенно советский периоды. Решающую роль в этом переходе сыграла деятельность российской армии и военных инженеров в XIX веке, которая, как верно отмечали современники, сочетала военные и гражданские функции. Дороги, мосты и крепости, построенные в этот период, стали материальной основой для включения Кавказа в состав сначала Российской империи, а затем и СССР, выполнив не только стратегическую, но и колонизационно-хозяйственную миссию. Советская власть, используя и модернизируя этот каркас, придала ему новое, индустриальное и социально-ориентированное содержание, превратив инженерные сооружения в инструмент экономической интеграции и модернизации. Таким образом, история этих сооружений — это наглядная летопись технологического и политического покорения одного из самых сложных и важных регионов Евразии.

Литература:

1. Георгиева, Т. С. История русской культуры. М., 1999. — 576 с.
2. Дегоев, В. В. Большая игра на Кавказе: история и современность. Статьи, очерки, эссе. 2-е изд., М., 2003. — 510 с.
3. Фадеев, Р. А. Кавказская война. М., 2005. — 640 с.

Проектирование дорожной одежды с учетом расчета на колеобразование в Ставропольском крае

Торопова Ксения Петровна, студент

Научный руководитель: Говердовская Людмила Геннадьевна, старший преподаватель
Самарский государственный технический университет

В статье рассматриваются ключевые аспекты проектирования дорожной одежды с акцентом на расчёт устойчивости к колеобразованию. Анализируются причины формирования колеи, нормативные требования и методики расчёта, а также предлагаются практические рекомендации по снижению интенсивности колеобразования.

Ключевые слова: дорожная одежда, колеобразование, проектирование, расчёт, асфальтобетон, транспортно-эксплуатационные нагрузки.

Design of road pavement with consideration of rutting calculation in Stavropol Krai

Toropova Kseniya Petrovna, student

Scientific advisor: Goverdovskaya Lyudmila Gennadyevna, senior lecturer
Samara State Technical University

The article discusses the key aspects of road pavement design with a focus on the calculation of rut resistance. The causes of rut formation, regulatory requirements and calculation methods are analyzed, and practical recommendations are proposed to reduce the intensity of rut formation.

Keywords: travel clothes, gauge formation, design, calculation, asphalt concrete, transportation and operational loads.

Проектирование дорожной одежды — это ключевой этап создания долговечных и безопасных автомобильных дорог. В Ставропольском крае, где климатические условия характеризуются жарким летом, значительными перепадами температур и высокой интенсивностью движения, особое значение приобретает расчёт дорожной одежды на устойчивость к колееобразованию. Колее не только ухудшают эксплуатационные характеристики дороги, но и снижают безопасность движения, увеличивая риск аварий.

Колееобразование — один из наиболее распространённых дефектов дорожных покрытий, существенно снижающий безопасность и долговечность автомобильных дорог. Рост интенсивности движения и увеличение доли тяжёлого транспорта усугубляют проблему. Проектирование дорожной одежды с учётом устойчивости к колееобразованию — необходимое условие обеспечения требуемого уровня надёжности и долговечности дорожных конструкций.

Причины колееобразования

Основные причины формирования колее:

- Эксплуатационные нагрузки: высокая интенсивность движения, особенно тяжёлого транспорта.
- Природно-климатические факторы: температурные колебания, влажность, морозное пучение.
- Конструктивные недостатки: недостаточная прочность слоёв дорожной одежды, неправильный подбор материалов.
- Технологические ошибки: нарушение технологии укладки, недостаточное уплотнение слоёв.
- Износ покрытия: истирание верхнего слоя в полосе наката.

Методика расчёта глубины колее

Согласно ПНСТ 371–2019, глубина колее (h_k) складывается из остаточных деформаций слоёв дорожной одежды и грунта земляного полотна (S) и истирания материала верхнего слоя (h_n):

$$h_k = S + h_n$$

Остаточную деформацию (S , м) определяют по формуле:

$$S = 1,57 \cdot P \cdot D \cdot K / E_{\text{д.общ}}$$

где:

P — удельное давление на покрытие от нормативной нагрузки, МПа;

D — диаметр отпечатка колеса расчётного автомобиля, м;

$E_{\text{д.общ}}$ — общий модуль деформации на поверхности покрытия, МПа;

K — коэффициент, учитывающий повторность воздействия и динамичность нагрузки.

Коэффициент K рассчитывается по формуле:

$$K = 0,5 + 0,65 \lg(N_p)$$

где N_p — суммарное расчётное число приложений расчётной нагрузки за срок службы.

Альтернативная математическая модель прогнозирования глубины колее (СТО АВОДОП 2.28–2013):

$$h_k = a(1,85 \cdot 10 - 6 \Sigma N_p)^b$$

где:

h_k — прогнозируемая глубина колее, мм;

ΣN_p — суммарное расчётное число приложений нагрузки за T лет;

a и b — эмпирические коэффициенты модели (зависят от категории дороги).

Особенности условий Ставропольского края

Ставропольский край отличается:

- сухим жарким климатом, что приводит к размягчению асфальтобетонных покрытий в летний период;

- высокой интенсивностью движения на ключевых магистралях,
- необходимостью обеспечения надёжности дорог в курортных зонах, где нагрузка на дорожную сеть постоянно растёт.

Эти факторы требуют особого подхода к расчёту и проектированию дорожной одежды, чтобы минимизировать риск образования колеи и продлить срок службы покрытий.

Методика расчёта дорожной одежды на колееобразование

Расчёт дорожной одежды выполняется по утверждённым методикам, включающим:

- расчет остаточных деформаций в грунте земляного полотна;
- расчет остаточных деформаций в слоях основания, не содержащих органическое вяжущее;
- расчет остаточных деформаций в слоях асфальтобетона и других битумосодержащих слоях;
- расчет износа верхнего слоя покрытия.

В условиях Ставропольского края особое внимание уделяется:

- выбору материалов, устойчивых к высоким температурам (например, щебёночно-мастичный асфальтобетон);
- назначению толщины слоёв с учётом расчётных нагрузок и климатических факторов;
- применению современных технологий уплотнения и укладки, что позволяет повысить однородность и прочность покрытия

Практические рекомендации и современные решения

Для снижения риска колееобразования в регионе применяются:

- многослойные конструкции с использованием материалов различной прочности;
- современные асфальтоукладчики и катки с автоматическим контролем уплотнения;
- устройство эффективной системы водоотвода для предотвращения переувлажнения основания;
- регулярный мониторинг состояния дорог и своевременное проведение ремонтных работ.

Нормативные требования

При проектировании дорожной одежды необходимо учитывать следующие нормативные документы:

- ГОСТ Р 59120–2021 (требование учёта колееобразования).
- ГОСТ 32825 (предельно допустимая глубина колеи).
- ПНСТ 371–2019 (методика расчёта колеи для дорог с низкой интенсивностью движения).
- ПНСТ 541–2021 (расчёт коэффициентов приведения транспортных средств).
- ГОСТ Р 58406.1–2020 и ГОСТ Р 58406.2–2020 (нормирование глубины колеи для асфальтобетона).
- ГОСТ Р 58400.1–2019 и ГОСТ Р 58400.2–2019 (требования к битумам).

Заключение

Проектирование дорожной одежды с учётом расчёта на колееобразование позволяет существенно повысить долговечность и безопасность автомобильных дорог. Применение современных методик расчёта, подбор оптимальных материалов и соблюдение технологических требований — ключевые факторы успешного решения проблемы колееобразования. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку новых материалов и технологий, обеспечивающих максимальную устойчивость дорожных конструкций к эксплуатационным нагрузкам.

Литература:

1. ГОСТ Р 59120–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования.
2. ПНСТ 371–2019. Дороги автомобильные общего пользования с низкой интенсивностью движения. Дорожная одежда. Конструирование и расчёт.
3. ПНСТ 541–2021. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование дорожных одежд. Методика расчёта коэффициентов приведения транспортных средств к расчётной осевой нагрузке.
4. СТО АВТОДОР 2.28–2013. Методические рекомендации по прогнозированию поперечной ровности (колеи) дорожных одежд.
5. Дмитриева Ю. В. Причины колееобразования в конструкциях дорожных одежд на дорогах с асфальтобетонным покрытием // Молодой учёный. — 2021. — № 10. — С. 41–43.

ГЕОЛОГИЯ

Нефтеносность Среднеботуобинского месторождения

Акчурин Нияз Наилевич, студент магистратуры

Научный руководитель: Мустафин Сабир Кабирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Уфимский университет науки и технологий

В статье автор исследует геологическое строение, нефтеносность Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (Республика Саха-Якутия), а также анализирует проект создания промышленного комплекса по извлечению нефти, включая технологические особенности.

Ключевые слова: гелий, Среднеботуобинское месторождение, Непско-Ботуобинская антеклиза, Мирнинский выступ, блоковая тектоника, трапповый магматизм, территория опережающего развития.

Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение — один из крупнейших и наиболее перспективных объектов нефтедобычи Восточной Сибири, отличающийся высокой концентрацией углеводородов и сложным геологическим строением. Расположенное в Мирнинском районе Якутии, оно входит в состав Лено-Тунгусской нефтегазональной провинции и по запасам нефти и газа относится к категории стратегических месторождений федерального значения. На сегодняшний день его начальные извлекаемые запасы оцениваются более чем в 160 млн тонн нефти и свыше 150 млрд кубометров природного газа, что делает его одним из ключевых активов региона. [1]

Геологическое строение и продуктивные горизонты

Ботуобинский горизонт — основной объект разработки. Он представлен кварцевыми песчаниками, вытянут в северо-восточном направлении более чем на 270 км, максимальная толщина (до 33 м) отмечается в восточной части. В Центральном блоке сосредоточены основные запасы: нефть занимает 81 % площади, газонасыщенные песчаники — до 20 м, нефтенасыщенные — от 4 до 16 м. Дебиты нефти достигают 110–130 м³/сут, газа — 130–180 тыс. м³/сут. Для горизонта характерны аномально низкие пластовые давления (на 15 % ниже гидростатических) и сложное блоковое строение, обусловленное дизъюнктивной тектоникой и литологическими замещениями.

Осинский горизонт сложен хемогенными и органогенно-карбонатными породами, основные коллекторы находятся в Центральном блоке. Залежи имеют толщину 30–50 м, газовая зона занимает 3 %, газонефтяная — 55 %, нефтяная — 31 %. [3] Проницаемость низкая (до 5 мДарси), коэффициент извлечения нефти (КИН) — 6–16 %. Осинский горизонт — важнейший нефтеносный объект Восточной Сибири.

Особенности разработки

На месторождении широко распространены газоконденсатные залежи с нефтяной оторочкой, особенно в ботуобинском горизонте. [2] Нефтяная оторочка (1,5–7 м) формируется между газовой шапкой и водой, что осложняет разработку из-за риска прорыва газа или воды к скважинам. Для повышения эффективности применяют системы поддержания пластового давления (ППД), бурение боковых и многозабойных скважин, что позволяет увеличить площадь дренирования и повысить КИН.

Среднеботуобинское НГКМ — уникальный объект с аномальными пластовыми условиями, сложным строением залежей и высокой промышленной значимостью. Освоение месторождения требует применения современных технологий бурения и ППД для эффективной выработки запасов нефти и газа.

Нефть имеет высокую удельную плотность, залежь имеет сложное строение. Осинский горизонт является основным нефтеносным объектом в Восточной Сибири, который вносит большой вклад в экономическую составляющую Якутии. Основные параметры нефтеносности приведены в таблице 2.

Таблица 1. Параметры нефти продуктивных горизонтов [4]

Параметр	Ботубинский горизонт (Центральный блок)	Осинский горизонт (пласт 0-1)
Тип залежи	Нефтегазоконденсатная, пластовая сводовая, с элементами тектонического экранирования	Газонефтяная, пластовая
Эффективная мощность, м	9,5 (газовая часть)	4,4
Открытая пористость, %	14,4 (газ), 14,5 (нефть)	10,0
Газонасыщенность / Нефтенасыщенность, %	76 (газ), 79 (нефть)	72
Дебиты газа, тыс. м³/сут	150–350	до 127
Плотность нефти, г/см³	0,871–0,897	0,871–0,900
Пластовое давление, МПа	14,6 (ниже гидростатического)	15,71 (выше гидростатического)
Содержание серы в нефти, %	0,4–1,1	0,4–1,1

Таблица 2. Параметры осинского горизонта [2]

Параметр	Значение/Описание
Параметр	Значение/Описание
Тип залежи	Нефтегазовая, массивная, литологически замкнутая, блоковая
Мощность пласта	60–70 м (общая), эффективная — до 20 м
Тип коллектора	Карбонатный, порово- каверновый
Пористость	9–16 %
Содержание серы	0,89 %
Особенности строения	Сложное за счёт фациальных изменений и разрывных нарушений
Положение контактов	Водонефтяной контакт — наклонный, сложное строение
Содержание серы	0,89 %

История освоения и динамика добычи

Месторождение открыто в 1970 году, а промышленная эксплуатация началась в 2013 году после масштабного обустройства инфраструктуры. В последние годы здесь отмечается устойчивый рост добычи: только на Центральном блоке в 2023 году извлечено более 5,1 млн тонн нефти с газовым конденсатом, а на Восточных блоках — свыше 1,2 млн тонн. Внедрение современных технологий бурения, включая боковые горизонтальные стволы и 3D-сейсморазведку, позволило существенно повысить эффективность разработки и расширить фонд действующих скважин. [5]

Литература:

1. Акулов Н. И., Валеев Р. Р. Особенности геологического строения Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. — 2016. — Т. 18. — С. 3–15.
2. Бакин В. Е. Основные закономерности распространения коллекторов венд-рифейского терригенно-карбонатного комплекса юго-западных районов ЯССР // Вопросы нефтегазоносности и угленосности Центральной и Южной Якутии: Изд-во ЯФ СО АН СССР. Якутск, 1980. С. 42–47.
3. Максимова Е. Н., Чертина К. Н., Бобылев К. Д. и др. «Литологическое строение осинского подгоризонта и выявление перспективных зон развития коллекторов по методике Дж. Лусиа на примере Среднеботуобинского месторождения» // Нефтяная провинция. 2021. № 1(25). С. 18–40
4. Отчёт о подсчёте запасов углеводородов Центрального блока Среднеботуобинского НГКМ. — ООО «Таас-Юрях Нефтегазодобыча», 2019. — Фонды ЦДНГ.
5. Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение (периферийные зоны Северного блока, Тектуйский участок). — Углеводороды.ру, 2020. — URL: <https://uglevodorody.ru>

Применение технологии DDS для устройства свай в слабых водонасыщенных грунтах

Хурамшина Мария Руслановна, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Современное строительство в условиях плотной городской застройки и сложных инженерно-геологических условий требует применения эффективных и экологически безопасных технологий устройства фундаментов. Одним из перспективных методов является технология DDS (технология свай полного вытеснения), основанная на принципе формирования скважины без извлечения грунта на поверхность. В отличие от традиционных методов бурения с выемкой грунта (например, технологии CFA или бурения с применением глинистого раствора), метод DDS предусматривает радиальное уплотнение грунта в стенки формируемой скважины посредством специального рабочего органа — раскатчика. Грунт не удаляется из массива, а деформируется и уплотняется, что позволяет стабилизировать стенки скважины в слабых водонасыщенных грунтах и создать вокруг свай зону повышенной плотности, положительно влияющую на её несущую способность.

Бурунабивные сваи уплотнения, выполняемые по технологии DDS, применяются в гражданском, промышленном и жилищном строительстве, а также при реконструкции существующих зданий и сооружений. Они используются в качестве свайных фундаментов встроеной и пристроеной при реконструкции внутригородских территорий и действующих промышленных предприятий, для устройства свайных фундаментов при нагрузке на сваю до 3500 кН, для стабилизации слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов в основании насыпей и дорог, при устройстве свайных оснований транспортных сооружений, а также для уплотнения грунтов в целях противооползневой защиты. К ограничениям по применению

относятся большие толщ (более 6–8 м) плотных песчаных и гравийных грунтов, глин твёрдой консистенции и выветрелых трещиноватых скальных пород. При наличии таких грунтов сваи DDS могут использоваться при условии, что толща несжимаемого грунта ограничена, а вышележащие напластования являются сжимаемыми.

Основным конструктивным элементом технологии DDS является раскатчик — набор конических катков, последовательно закреплённых на общем валу. Оси катков смещены относительно оси вала, что при вращении создаёт одновременно два усилия: подачу раскатчика вглубь грунта и его радиальное перемещение. Раскатчики выпускаются разных диаметров — наиболее распространённые типоразмеры: 400, 450, 520, 600, 650 и 800 мм, что позволяет проектировать свайные фундаменты с широким диапазоном несущей способности. Конструктивно раскатчик выполнен с внутренней полостью, через которую бетонная смесь подаётся прямо через буровой инструмент. При встрече с препятствиями (валунами или крупными обломками скальных пород) используется сменный породоразрушающий инструмент — забурник, предназначенный для начального разрушения плотных слоёв грунта.

Технологический процесс устройства бурунабивных свай по технологии DDS включает несколько последовательных этапов. Первым этапом является позиционирование буровой установки с использованием современных геодезических систем и бортовых навигационных комплексов. Затем выполняется вытеснительное бурение — погружение раскатчика в грунт под действием вращения и усилия подачи с непрерывным радиальным уплотне-

нием грунта. После этого производится извлечение раскатчика с подачей бетонной смеси под давлением через полость бурового снаряда снизу вверх, что создаёт дополнительный эффект уплотнения грунта. Далее арматурный каркас погружается в свежееуложенную бетонную смесь с использованием вибропогружателя или под собственным весом. Завершающий этап — формирование оголовка сваи и уход за бетоном, включающий контроль температурно-влажностного режима и защиту от механических воздействий. Важной особенностью технологии является высокий уровень автоматизации: современные буровые установки оснащаются бортовыми компьютерами, которые в реальном времени регистрируют глубину погружения раскатчика, скорость бурения, крутящий, усилие подачи, давление бетонной смеси, объём поданного бетона и вертикальность бурения.

Сравнение технологии DDS с традиционными методами устройства буронабивных свай показывает её преимущества по ряду ключевых показателей. В отличие от технологии CFA, при которой грунт частично извлекается на поверхность шнеком, технология DDS полностью исключает выемку грунта и не требует приготовления, использования и последующей утилизации стабилизирующих растворов, что существенно снижает экологические риски и затраты. Кроме того, технология DDS не создаёт шламового осадка на забое скважины, который при традиционном бурении может снижать несущую способность свай по острию. Важным преимуществом является также отсутствие вибраций и низкий уровень шума, что делает технологию DDS предпочтительной при производстве работ в условиях плотной городской застройки, включая исторические центры городов.

Эффективность применения технологии DDS в условиях слабых водонасыщенных грунтов обусловлена механизмом вытеснительного бурения. В процессе погружения раскатчика происходит радиальное смещение и уплотнение окружающего грунта, в результате чего вокруг сваи образуется зона повышенной плотности. Грунт в стенках скважины уплотняется, что приводит к увеличению его прочностных характеристик: модуля деформации, угла внутреннего трения и сцепления. Как следствие, силы трения по боковой поверхности свай возрастают на 20–40 % по сравнению со сваями, выполненными с выемкой грунта. Поскольку технология DDS полностью исключает образование шлама (грунт не извлекается на поверхность), обеспечивается полная реализация сопротивления грунта под нижним концом сваи. Уплотнённая зона вокруг сваи выполняет функцию естественной «обоймы», повышая устойчивость системы «свая–грунт» при действии вертикальных и горизонтальных нагрузок. Кроме того, уплотнение грунта приводит к снижению его водопроницаемости, что особенно важно в условиях слабых водонасыщенных грунтов, так как уменьшает риск фильтрационных деформаций и обеспечивает более благоприятные условия для твердения бетонной смеси.

С учётом условий Санкт-Петербурга технология DDS обладает рядом дополнительных преимуществ. Отсутствие вибраций критически важно при строительстве в условиях плотной городской застройки и исторических центров, где вибрации могут привести к деформациям существующих зданий. Отсутствие шлама и глинистого раствора исключает необходимость их утилизации, что особенно актуально в условиях ограниченных строительных площадок и высоких экологических требований. Производительность одной буровой установки при работе по технологии DDS может достигать 30–35 свай глубиной до 25–32 м за смену, что позволяет существенно сократить сроки строительства. Уплотнённые стенки скважины препятствуют растеканию бетонной смеси, обеспечивая точное соответствие фактического расхода бетона проектному объёму, а подача бетона под давлением через полость раскатчика дополнительно повышает качество формирования свай.

Эффективность технологии DDS подтверждается как лабораторными исследованиями, так и натурными испытаниями. Компрессионные испытания образцов грунта, отобранных вокруг свай, устроенных методом раскатки без выемки грунта, показали значительное увеличение модуля деформации, угла внутреннего трения и сцепления в зоне уплотнения. Установлена зависимость указанных характеристик от диаметра свай, что позволяет прогнозировать несущую способность с учётом реальных условий работы грунта. Статические испытания свай DDS показали, что экспериментальная несущая способность превышает расчётные значения, полученные по нормативным методикам, что позволило определить коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности свай DDS. Сравнительное численное моделирование также подтвердило формирование уплотнённой зоны вокруг сваи DDS. В Санкт-Петербурге технология успешно применена на ряде объектов: строительство кольцевой автомобильной дороги (до 79 свай диаметром 600 мм глубиной 25 м на одну машину в сутки), «Лахта Центр», намывные территории Васильевского острова, а также объекты реконструкции в историческом центре города.

Несмотря на высокую эффективность, существуют определённые ограничения. Технология DDS наиболее эффективна в глинистых и связных грунтах; в рыхлых несвязных грунтах эффективность уплотнения может быть ниже. При встрече с крупными валунами или обломками скальных пород требуется замена раскатчика на забурник, что увеличивает время работ. Реализация технологии требует специализированного бурового оборудования с высокими показателями крутящего момента (до 250–300 кН·м) и усилия подачи (до 200–250 кН), а также высокой квалификации персонала для контроля параметров бурения и бетонирования в реальном времени.

Разработка стандарта организации (СТО) по изготовлению и применению буронабивных свай уплотнения по технологии DDS обусловлена тем, что действующая нормативная база Российской Федерации не содержит специализированных требований к данному методу. Основной

документ — СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты» — ориентирован преимущественно на забивные, буронабивные и винтовые сваи, технология DDS в нём прямо не упоминается. Отсутствуют методики расчёта несущей способности свай DDS с учётом радиального уплотнения грунта, а также нормативные требования к контролю параметров вытеснительного бурения. Смежные нормативные документы носят общий характер и не учитывают специфику технологии вытеснительного бурения.

На основании анализа производственного опыта и научных исследований установлено, что технология DDS требует нормативного закрепления следующих параметров: режимы бурения (крутящий момент, усилие подачи) для различных типов грунтов; контроль объёма бетона по вытеснению с определением коэффициента расхода бетона (1,05–1,15 в зависимости от типа грунта); методы оценки несущей способности с учётом уплотнения, поскольку несущая способность свай DDS на 20–40 % выше, чем у традиционных буронабивных свай; правила геотехнического мониторинга, так как при изготовлении свай DDS в водонасыщенных грунтах радиус влияния может достигать 20 м, а подъём существующих зданий — до 1–2 см.

Литература:

1. Жусупбеков А. Ж., Лукпанов Р. Е., Исина А. З., Алдунгарова А. К. Исследование взаимодействия грунтового массива со сваями вытеснения // Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева. — 2013. — Режим доступа: <https://dspace.enu.kz/handle/data/5317>
2. Заварзин, Л. Г. Слабые грунты на территории Санкт-Петербурга [Электронный ресурс] / Л. Г. Заварзин // Георекострукция: интернет-журнал. — 2000. — № 2. — URL: <https://georec.narod.ru/mag/2000n2/20/20.htm>
3. Исакулов, А. Б. Исследование взаимодействия грунтового массива с буронабивными сваями, устраиваемыми по технологии DDS / А. Б. Исакулов, А. Ж. Жусупбеков, Б. Р. Исакулов, С. Б. Исаков // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. — 2022. — Т. 141, № 4. — С. 19–29.
4. Исакулов А. Б., Жусупбеков А. Ж., Омаров А. Р. Основанная на надёжности оценка несущей способности буронабивных свай смещения (DDS) с использованием полевых испытаний и FEM // Репозиторий Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева: [Электронный ресурс]. — 2023. — URL: <http://rep.enu.kz/handle/enu/19869>

Корреляция динамики активности Co-60 в грунтовых водах зоны влияния утечки радионуклидов из хранилища ХЖО-2 Нововоронежской АЭС с гидрометрическими параметрами

Шадин Антон Евгеньевич, студент магистратуры
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва)

Статья посвящена анализу корреляции динамики удельной активности ^{60}Co в грунтовых водах зоны влияния утечки отходов из хранилища ХЖО-2 Нововоронежской АЭС (инцидент 1985 года) с гидрометрическими параметрами — скоростью расхода воды в реке вблизи НВАЭС.

Ключевые слова: кобальт, радионуклид, миграция, ХЖО-2, Нововоронежская АЭС.

В середине апреля 1985 года на Нововоронежской АЭС произошёл инцидент, повлёкший выход технологического раствора из ёмкости хранилища жидких радио-

С учётом региональной специфики Санкт-Петербурга (ленточные суглинки и глины, морские и озерные илы, торфы, техногенные насыпные грунты) в стандарте организации должны быть учтены: рекомендации по выбору типоразмера раскатчика в зависимости от типа слабого грунта; требования к глубине прорезки слабых грунтов; особенности бетонирования в условиях высокого уровня грунтовых вод; меры по предотвращению подъёма окружающих зданий в условиях исторической застройки.

Целью разработки СТО является установление единых технических требований к проектированию, производству работ и контролю качества при устройстве буронабивных свай уплотнения по технологии DDS в условиях слабых водонасыщенных грунтов (на примере Санкт-Петербурга). Основные задачи СТО включают систематизацию требований к инженерно-геологическим изысканиям, установление методики расчёта несущей способности с учётом радиального уплотнения грунта, регламентацию технологических параметров производства работ, определение требований к контролю качества на всех этапах, а также разработку рекомендаций по геотехническому мониторингу в условиях плотной застройки.

активных отходов ХЖО-2 за пределы здания хранилища. Объём потерянного технологического раствора составил около 480 м³, которые и поступили в грунт.

Возникшее вследствие утечки раствора из ХЖО-2 в 1985 году, повлекшее увеличение содержания радионуклидов в объектах окружающей среды, продолжает оставаться объектом внимания со стороны радиационной безопасности. Постоянная миграция с подземными водами радионуклидов, таких как ^{60}Co и ^{137}Cs , их накопление в донных отложениях реки Дон и потенциальное воздействие на население требуют постоянного мониторинга и оценки [1].

Изучение динамики изменения радиационной обстановки в области утечки актуально для обоснования прогноза долгосрочных последствий, разработки рекомендаций по оптимизации радиационного контроля и защитных мероприятий с целью обеспечения соответствия требованиям Федерального закона от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения».

Уровненный режим подземных вод характеризуется прямо пропорциональной связью с поверхностными водами. Первый водоносный горизонт, в котором сосредоточен основной ореол вод с повышенным содержанием радионуклидов, представлен преимущественно песками с широким диапазоном фильтрационных свойств. Существенным осложняющим фактором являются линзы глин и суглинков сложной морфологии в водоносном горизонте, т. к. они затрудняют фильтрацию грунтовых вод и, как следствие, прогнозирование и моделирование миграции. Потоки со стороны пруда-охладителя и реки Дон также осложняют картину.

Важнейшей особенностью, определяющей высокую подвижность ^{60}Co в данной системе, является форма его нахождения в растворе. Кобальт присутствовал в растворе преимущественно в виде анионных комплексов с трилоном Б — $\text{Co}^{II}\text{EDTA}^{2-}$. В отличие от ^{137}Cs , удерживаемого сорбцией непосредственно под зданием ХЖО-2, ^{60}Co в анионной форме практически не задерживался песками и проник до водоупорного слоя, где мигрировал с подземными водами в направлении р. Дон [2]. В водоносном горизонте в районе НВАЭС происходит замещение кобальта железом в комплексе, при этом образуется кобальт в катионной форме, которая лучше сорбируется грунтами, что приводит к замедлению фронта распространения радионуклида.

Миграция ^{60}Co в грунтовых водах подчиняется сложным закономерностям, поскольку природные объекты являются многокомпонентными системами с разнообразием условий окисления–восстановления, различной кислотностью и составом сорбирующих комплексов. Взаимоотношение форм ^{60}Co находится в прямой зависимости от геохимических и физических условий среды, в том числе температуры.

В таких условиях однозначное построение детерминированной модели миграции радионуклидов наталкивается на существенные ограничения, что обуславливает необходимость применения статистических методов, в частности корреляционного анализа динамики активности ^{60}Co в грунтовых водах, например, с гидрометрическими параметрами из таблицы 1 [3].

Таблица 1. Средний расход воды в р. Дон за период, м³/с

Год	За год	Месяц											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2001	216	197	169	365	402	264	186	172	157	167	173	172	166
2002	196	173	260	337	257	198	161	151	147	159	177	187	143
2003	237	126	122	162	970	273	158	163	166	166	173	185	179
2004	221	171	167	327	349	278	212	205	170	164	201	215	195
2005	295	236	211	207	850	539	270	226	183	169	192	219	234
2006	308	203	154	200	1020	382	275	207	203	215	253	297	292
2007	230	278	235	424	323	248	181	150	152	153	206	204	211
2008	223	185	216	541	305	256	178	158	142	151	174	177	188
2009	194	222	220	261	382	224	154	128	123	133	154	171	155
2010	211	152	148	367	788	229	135	107	96	99	120	148	141
2011	173	208	204	208	305	206	135	119	116	122	146	159	151
2012	253	149	177	245	1020	314	173	135	125	153	168	197	181
2013	285	159	202	357	1270	314	158	131	140	156	179	199	150
2014	150	157	203	261	217	172	116	111	91	103	119	131	117
2015	143	143	156	307	215	140	101	103	95	92	103	131	131
2016	212	141	233	427	299	272	209	152	141	130	157	189	196
2017	191	189	195	322	294	215	155	132	107	126	150	174	230
2018	258	184	144	179	1160	434	174	141	125	116	146	150	151
2019	154	167	200	223	218	166	123	109	111	107	144	135	150
2020	119	143	167	176	151	143	129	84	70	67	85	103	107
2021	153	124	153	205	325	196	126	100	94	105	126	137	150
2022	168	112	111	159	279	219	151	106	104	111	174	180	303

Для анализа использовались результаты наблюдений за удельной активностью ^{60}Co в подземных водах зоны влияния утечки ХЖО-2 за период 2002–2025 годов, представленные в таблице 2 [4]. Поскольку измерение активности проводилось от 1 до 2 раз в год на протяжении

указанного периода, чаще всего в тёплое время года, целесообразно искать связь расхода воды в реке с динамикой активности в грунтовых водах не только по среднему значению расхода воды, но и по среднемесячным в отдельности.

Таблица 2. Удельная активность ^{60}Co в воде наблюдательных скважин НВАЭС, Бк/кг

Год	№ скважины													
	35	45	61	80	86	87	103	104	105	106	108	110	116	117
2002	19	74	68	710	260	58	7	1,6	52	69	79	25	22	44
2003	640	47	56	680	310	60	11	1,7	58	33	63	42	11	390
2004	970	108	492	660	184	44	12	2	247	9	184	30	65	9
2005	1450	88	659	660	126	28	-	-	315	9	201	15	182	69
2006	388	80	287	94	50	14	2	-	132	17	73	-	54	12
2007	530	83	550	260	63	38	0,8	0,6	170	19	84	5,5	31	11
2008	360	34	210	77	64	43	-	19	52	2,2	180	2,8	64	2,8
2009	230	23	260	50	63	26	16,0	29	11	2,6	44	2,3	57	6,3
2010	13	-	-	-	-	-	-	-	0,01	2,4	10	8,8	18	15
2011	65	-	-	-	-	-	-	-	7	3,1	3,7	11	12	19
2012	40	5,3	3,2	19	29	3,5	-	0,4	0,4	2,7	4,7	7,1	1,5	15
2013	0,5	5,3	4,5	22	19	5,2	7,7	11	2,1	2,5	0,9	6,8	1,1	15
2014	0,1	4,4	11	4,6	5,7	3,2	7,0	24	0,5	2,3	1,8	5,2	4,1	18
2015	0,2	3,5	1,6	3,9	16	10	12	18	1,3	1,0	1,0	5,5	5,6	26
2016	0,01	0,7	0,3	2,2	1,1	2,9	0,0	2,8	0,01	0,8	0,9	5,2	0,01	11
2017	0,01	28	11	13	7,4	7,2	3,4	5,8	1,3	0,4	2,0	0,9	0,1	1,4
2018	0,01	9,0	0,2	9,0	1,0	2,0	0,2	1,0	0,01	0,4	0,3	2,0	0,4	1,0
2019	0,1	3,9	0,2	2,6	1,3	1,3	0,7	1,2	0,1	0,3	0,2	0,9	0,2	0,8
2020	0,1	1,1	0,2	1,5	3,1	3,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,6	0,1	0,7
2021	0,1	1,7	0,2	3,6	2,3	2,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,6
2022	0,1	1,7	0,2	2,5	4,3	4,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,7	0,1	0,6
2023	0,1	0,2	0,1	2,1	1,2	1,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2024	0,1	0,7	0,1	17,4	1,0	1,7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2025	0,1	0,6	0,1	0,9	0,1	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Примечание: «-» — данные отсутствуют, либо отброшены

Анализ проводился без учёта плато активности в грунтовой воде на основе изменения активности по ряду контрольных скважин, представляющих наибольший интерес в настоящее время, и сопоставления со средним за период расходом воды в реке Дон. Для оценки тесноты и направления связи использовался коэффициент линейной корреляции Пирсона; сила связи интерпретировалась согласно шкале Чеддока. Результаты расчётов коэффициентов корреляции Пирсона приведены в таблице 3.

Скважины приведены в таблице по мере удаления от ХЖО-2 и приближения к береговой линии. Ожидаемая связь динамики удельной активности с расходом воды в реке оказалась достаточно выраженной. Значительная положительная корреляция наблюдается для скважин, удалённых от берега реки Дон. Предполагается, что при снижении уровня воды и объёма стока к концу мая река перестаёт выполнять функцию гидрологического барьера, замедляющего движение радионуклидов с грунтовыми водами, что приводит к усилению разгрузки и снижению

активности в скважинах — исходя из этого в большинстве своём наблюдается положительная корреляция между расходом воды и активностью во второй половине года.

В результате анализа установлена взаимосвязь динамики активности радионуклидов в грунтовых водах и среднего расхода воды в реке Дон, позволяющая выдвигать новые гипотезы и строить прогнозы миграции радионуклидов в сложной системе под ядерно- и радиационно-опасными объектами, а также более рационально подходить к вопросам разработки программ мониторинга окружающей среды [5]. Установленную взаимосвязь не следует рассматривать как доказанный механизм миграции радионуклидов: наблюдение указывает лишь на то, что метеорологические факторы играют заметную роль в формировании уровней радиоактивного загрязнения грунтовых вод. Для более надёжного подтверждения зависимостей требуются дополнительные исследования с применением методов, способных выявлять нелинейные и запаздывающие связи в многомерных временных рядах

Таблица 3. Результаты анализа корреляции активности ^{60}Co и расхода воды в р. Дон

№ скважины	80	35	45	61	87	86	104	105	110	117	116	108	106
За год	0,18	0,03	0,40	0,42	0,05	0,27	-0,49	0,51	0,18	0,10	0,46	0,36	-0,46
Январь	0,09	-0,19	0,53	0,78	0,16	0,07	0,54	0,53	-0,27	-0,33	0,55	0,24	-0,31
Февраль	0,02	-0,30	0,07	0,13	0,03	0,07	0,13	0,02	-0,40	-0,42	0,13	0,20	0,31
Март	-0,20	-0,13	0,01	-0,02	0,05	-0,01	-0,10	-0,13	-0,44	-0,39	-0,13	0,33	-0,19
Апрель	-0,01	-0,18	-0,02	0,00	-0,12	0,14	-0,41	0,11	0,20	0,26	0,09	-0,21	-0,16
Май	0,21	0,06	0,35	0,58	0,00	0,15	-0,57	0,69	0,14	0,05	0,75	0,50	-0,47
Июнь	0,32	0,35	0,64	0,64	0,10	0,25	-0,54	0,74	0,20	-0,03	0,67	0,61	-0,49
Июль	0,62	0,64	0,82	0,73	0,39	0,53	-0,38	0,87	0,49	0,17	0,74	0,78	-0,48
Август	0,58	0,61	0,78	0,62	0,45	0,57	-0,33	0,73	0,56	0,28	0,55	0,60	-0,28
Сентябрь	0,47	0,46	0,70	0,46	0,37	0,53	-0,36	0,57	0,51	0,23	0,41	0,42	-0,09
Октябрь	0,39	0,45	0,75	0,59	0,32	0,38	-0,37	0,64	0,36	0,06	0,41	0,45	-0,27
Ноябрь	0,28	0,34	0,66	0,48	0,11	0,32	-0,61	0,58	0,34	0,03	0,40	0,32	-0,24
Декабрь	0,13	0,29	0,57	0,49	0,00	0,02	-0,63	0,56	0,17	0,00	0,53	0,41	-0,56

Литература:

1. Шукин А. П. Дис. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования закономерностей загрязнения окружающей среды в результате утечки радионуклидов из хранилища жидких радиоактивных отходов (на примере Нововоронежской АЭС) канд. тех. наук. Москва.: ВНИИАЭС, 2007.
2. Харитонова, Е. В. Изучение миграции ^{60}Co в природных средах: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Харитонова Елена Викторовна. — Обнинск, 2008. — 30 с. — EDN ZMНMFN.
3. «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации» [Электронный ресурс]. — 2025. — Режим доступа: <http://meteo.ru/data/temperature-precipitation/> (дата обращения: 08.08.2025).
4. Шадин, А. Е. Анализ динамики активности радионуклидов в подземных водах зоны влияния утечки ХЖО-2 НВАЭС (1985 г.) и выявление закономерностей их распределения за период 2002–2024 гг. / А. Е. Шадин. — Текст: непосредственный // Современные подходы и инновации в атомной энергетике: сборник тезисов докладов I Международной научно-технической конференции для студентов, молодых ученых и специалистов. — Нововоронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2025. — С. 110–112.
5. Обеспечение мониторинга подземных и поверхностных вод в районе размещения Нововоронежской АЭС с целью оценки последствий миграции радионуклидов из хранилища радиоактивных отходов (1985 г.) / Д. А. Шаров, А. С. Коротков, И. В. Пырков [и др.] // Гидросфера. Опасные процессы и явления. — 2023. — Т. 5, № 3. — С. 291–297. — DOI 10.34753/HS.2023.5.3.291. — EDN IYAPKT.

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 21 (624) / 2026

Выпускающий редактор Г. А. Письменная
Ответственные редакторы Е. И. Осянина, О. А. Шульга, З. А. Огурцова
Художник Е. А. Шишков
Подготовка оригинал-макета П. Я. Бурьянов, М. В. Голубцов, О. В. Майер

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.
Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.
При перепечатке ссылка на журнал обязательна.
Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал размещается и индексируется на портале eLIBRARY.RU, на момент выхода номера в свет журнал не входит в РИНЦ.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-38059 от 11 ноября 2009 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN-L 2072-0297

ISSN 2077-8295 (Online)

Учредитель и издатель: ООО «Издательство Молодой ученый». 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

Номер подписан в печать 03.06.2026. Дата выхода в свет: 10.06.2026.

Формат 60×90/8. Тираж 500 экз. Цена свободная.

Почтовый адрес редакции: 420140, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Юлиуса Фучика, д. 94А, а/я 121.

Фактический адрес редакции: 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.

E-mail: info@moluch.ru; <https://moluch.ru/>

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25, пом. 1, 3, 4, 5, 6.