

МОЛОДОЙ УЧЁНЫЙ

ISSN 2072-0297

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



16+

2026
ЧАСТЬ III

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 20 (623) / 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 *Павел Николаевич Яблочков* (1847–1894), русский электротехник, военный инженер, изобретатель и предприниматель.

Павел Николаевич Яблочков родился в селе Жадовка Саратовской губернии в дворянской семье. С самого детства он любил конструировать: придумал угломерный прибор для землемерных работ, устройство для отсчета пути, пройденного телегой.

Яблочков окончил Николаевское инженерное училище в Петербурге, а через некоторое время — Техническое гальваническое заведение в Кронштадте. Тогда это была единственная в России школа, которая готовила специалистов в области электротехники. Там будущий ученый познакомился с новейшими достижениями в области изучения и технического применения электрического тока.

В 1872 году Павел Николаевич переехал в Москву. Именно тогда он начал изобретать, однако успехов на данном поприще достиг лишь в 1874 году, когда создал мастерскую физических приборов, где проводил работы по электротехнике, которые в дальнейшем легли в основу его изобретений в области электрического освещения, гальванических элементов и аккумуляторов.

Весной 1874 года Яблочкову представилась возможность практически применить электрическую дугу для освещения. Из Москвы в Крым должен был следовать правительственный поезд. Впервые в истории железнодорожного транспорта на паровозе установили прожектор с дуговой лампой — регулятором Фуко.

Яблочков был членом кружка электриков-изобретателей при Московском политехническом музее. Здесь он узнал об опытах Александра Лодыгина по освещению улиц и помещений электрическими лампами, после чего решил заняться усовершенствованием существовавших тогда дуговых ламп. К 1875 году относится одно из его главных изобретений — «электрическая свеча».

В том же году Яблочков уехал в Париж, где создал промышленный образец электрической лампы, а через год запатентовал свою «электрическую свечу». Ее первая демонстрация состоялась в 1876 году в Лондоне, и в Париж Павел Николаевич вернулся уже известным изобретателем. Сразу же была создана кампания по эксплуатации его патентов. Специальный завод производил несколько тысяч «свечей» в день. Они получили применение главным образом в уличном освещении.

Также Яблочков разработал и внедрил систему электрического освещения на однофазном переменном токе, разработал способ «дробления света посредством индукции катушек» и др. Система освещения Яблочкова, получившая название «русский свет», пользовалась исключительным успехом. Компании по ее коммерческой эксплуатации были основаны во многих странах мира.

В России первая проба электрического освещения по системе Яблочкова была проведена осенью 1878 года: были освещены казармы и площадь в Кронштадте, а также Большой театр в Петербурге. Ни одно из изобретений в области электротехники не получало столь быстрого и широкого распространения, как «свечи» Яблочкова. Это был подлинный триумф русского инженера, а его изобретение ускорило решение многих насущных технических задач и легло в основу будущей электротехнической промышленности.

После изобретения «свечи» Яблочков очень много работал и в России, и за рубежом. В 1879 году он организовал «Товарищество электрического освещения П. Н. Яблочков-изобретатель и Ко», в числе акционеров которой были промышленники, финансисты, военные. Компания открыла электромеханический завод в Петербурге, производивший осветительные установки для военных судов, заводов военно-морского ведомства и для многих городов России.

С 1880-х годов Павел Николаевич занимался главным образом вопросами генерирования электрической энергии: созданием динамомашии и гальванических элементов. Инженер провел много исследований в области превращения энергии топлива в электрическую энергию. В последующие годы он получил ряд патентов на электрические машины.

Яблочков также был участником электротехнических выставок в России и в Париже, участником Первого международного конгресса электриков, стал одним из инициаторов создания электротехнического отдела Русского технического общества и журнала «Электричество». Он был награжден медалью императорского Русского технического общества и французским орденом Почетного легиона.

Умер талантливый ученый Павел Николаевич Яблочков в 1894 году в Саратове от болезни сердца. Он был похоронен в селе Сапожок Саратовской области в фамильном склепе.

В конце 1930-х годов Михайло-Архангельскую церковь разрушили, при этом пострадал и фамильный склеп Яблочковых. По решению АН СССР 26 октября 1952 года на могиле П. Н. Яблочкова был воздвигнут памятник, который представляет собой каменное изваяние. На лицевой стороне — барельеф с изображением изобретателя, а ниже установлена мемориальная доска, на которой выбиты слова: «Здесь покоится прах Павла Николаевича Яблочкова — выдающегося русского изобретателя в области электротехники (1847–1894 гг.)». По боковым сторонам расположены изображения «свечи» Яблочкова, электрической машины эклипс, гальванических элементов. На памятнике выбиты слова Павла Николаевича: «Электрический ток будет подаваться в дома, как газ или вода».

*Информацию собрала ответственный редактор
Екатерина Осянина*

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Волков Г. А.**
Математическая модель
фототранзистора на основе аппроксимации
графиков из документации на электронный
компонент..... 143
- Долотов И. И.**
Применение и выбор развязывающих
конденсаторов в системах электропитания.... 145
- Животиков М. Ю.**
Волоконно-оптические датчики в системах
мониторинга высоковольтных линий
электропередачи..... 151
- Животиков М. Ю.**
Разработка высокосветосильного объектива
для тепловизионных устройств 153
- Зарипов А. Р.**
Оценка технического состояния газовой
горелки путевого подогревателя нефти
по виброакустическим характеристикам
и динамике давления топлива..... 155
- Космовский С. С.**
Причины выхода из строя центробежного
компрессора в нефтегазовой отрасли 157
- Кристоваль О. А.**
Система обнаружения металлических
объектов 161
- Мухаммедова Д. Ч., Дурдымырадова Э.**
Оптимизация процессов
гидродинамического исследования
нефтяных скважин на основе компьютерного
моделирования..... 165
- Панькова А. М.**
Изменение фильтрационных свойств
песчаных грунтов при загрязнении
нефтепродуктами..... 167
- Sarsenov B. S.**
Adaptive control algorithms for distributed
access control systems in high-traffic public
facilities..... 174
- Шилов А. Е.**
Устройство запуска дизельного двигателя 177

МЕДИЦИНА

- Керимова З. Е.**
Ингибиторы тирозинкиназы как
перспективный терапевтический подход
при рассеянном склерозе..... 181
- Топчийн Д. А.**
Патофизиология изменений слизистой
оболочки полости рта и слюнных желёз
при паренхиматозных и обтурационных
желтухах..... 185
- Шаповалова Я. И., Харина Д. А.**
Искусственный интеллект в микробиологии:
новые горизонты исследований 187

ФАРМАЦИЯ И ФАРМАКОЛОГИЯ

- Нух Б., Абдэльфаттах М. Э. Э.**
Ингибиторы CaV3.2: новая надежда
в лечении остеоартритной боли 191

ГЕОЛОГИЯ

- Абзалилов Э. Р.**
Геологическое строение и нефтеносность
Приобского нефтяного месторождения..... 197
- Карамова И. А.**
Геологическое строение и минеральный
состав золото-сульфидно-вкрапленно-
прожилковых руд месторождения Сухой Лог ... 198
- Мукан А. С.**
Обоснование ресурсосберегающей
буровзрывной технологии при отработке
сложноструктурных рудных блоков
в условиях месторождения Коктасжал 200
- Taufik M. N. M.**
Hybrid drilling systems: integrating rotary
and percussive technologies for hard rock
formations..... 204
- Taufik M. N. M.**
Optimization of hydraulic fracturing design
for enhanced reservoir development..... 211

Фаезов Р. Р.

Высоковязкая нефть сеноманских отложений
Западной Сибири: сопоставление свойств
и условий залегания на примере Русского
и Северо-Комсомольского месторождений 216

ЭКОЛОГИЯ**Сванидзе З. З.**

Озеленение городов: нормативная база
и учет климатических последствий
принимаемых градостроительных решений ... 218

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Математическая модель фототранзистора на основе аппроксимации графиков из документации на электронный компонент

Волков Георгий Алексеевич, студент магистратуры
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

В современных сенсорных системах: датчиках приближения, системах охраны, устройствах оптической связи, широко применяются фототранзисторы, однако документация на такие компоненты обычно содержит лишь наборы графиков с отдельными зависимостями параметров, а не комплексные математические модели. Это создаёт сложности для разработчиков: без аналитических выражений невозможно точно прогнозировать поведение фототранзистора в реальных условиях. Целью работы является создание математической модели фототранзистора, преобразование графиков из документации в аналитические формулы и объединение их в единую модель для расчёта тока коллектора.

Ключевые слова: фототранзистор, математическая модель, аппроксимация, ток коллектора, сенсорные системы, оптоэлектроника, детектирование светового излучения.

Современные сенсорные системы всё чаще задействуют открытые оптроны [1] — комбинации излучателя и фотоприёмника, работающие в неконтролируемых условиях внешней среды. Такие решения широко применяются в датчиках приближения, системах охраны, устройствах оптической связи, робототехнике и элементах «умного дома». Ключевым компонентом подобных систем нередко выступает фототранзистор [2]: он совмещает функции детектирования света и усиления сигнала, что делает его удобным для компактных и энергоэффективных решений.

Однако работа фототранзистора в открытой среде сопряжена с рядом проблем, существенно влияющих на точность и надёжность измерений. На выходной сигнал воздействуют разнообразные физические явления — от фундаментальных тепловых нагрузок, до внешних факторов, связанных с условиями эксплуатации. Фоновая освещённость [3], атмосферные помехи [4], пыль, туман, флуктуации интенсивности источника излучения, температурные изменения и старение компонентов вносят дополнительные искажения, затрудняющие выделение полезного сигнала.

В этих условиях критически важна адекватная математическая модель фототранзистора, которая не ограничивается идеализированными предположениями, а учитывает комплекс реальных воздействий. Такая модель позволит прогнозировать поведение системы в различных сценариях, оптимизировать параметры излучателя и приёмника, оценивать предельные характеристики детектирования и разрабатывать эффективные методы подавления шумов.

Фототранзистор — это оптоэлектронный полупроводниковый прибор, представляющий собой разновидность биполярного транзистора (структуры pnp или npn), в котором управление коллекторным током осуществляется за счёт воздействия светового излучения на базовую область. В отличие от обычного биполярного транзистора, у фототранзистора базовый слой доступен для оптического облучения, может отсутствовать электрический вывод базы, либо он присутствует, но используется преимущественно для задания начальной рабочей точки.

Фототранзистор можно описать как зависимость $I_c(E_e)$ тока коллектора от облучённости фототранзистора, потому что свет непосредственно создаёт базовый ток через фотоэффект, транзисторная структура гарантированно усиливает этот ток с высоким коэффициентом, а связь «освещённость → фототок → ток коллектора» является прямой, монотонной и воспроизводимой в рабочем режиме электрического компонента.

Создадим модель фототранзистора КР-3216РЗС [5]. Для этого рассмотрим зависимость тока коллектора от облучённости фототранзистора, показанную на рисунке 1.

Для того чтобы преобразовать график, изображённый на рисунке 1, в математическую формулу, воспользуемся степенной аппроксимацией по 3 точкам на графике. Выбраны следующие точки $\{(0.05, 0.03), (0.5, 0.2), (1, 0.4)\}$.

Получена следующая формула: $I_c = 0,38 E_e^{0,85}$, где I_c — ток коллектор, E_e — облучённость фототранзистора.

Но следует обратить внимание, что ток коллектора также зависит от температуры и угла облучённости фототранзистора. Температурная зависимость тока в относительных единицах измерения показана на рисунке 2.

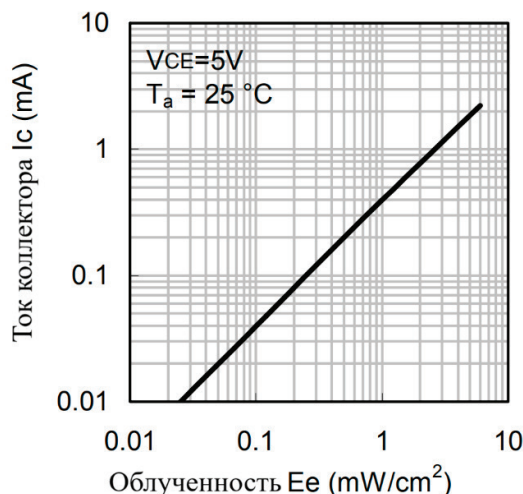


Рис. 1. Зависимость тока коллектора от облученности фототранзистора КР3216РЗС

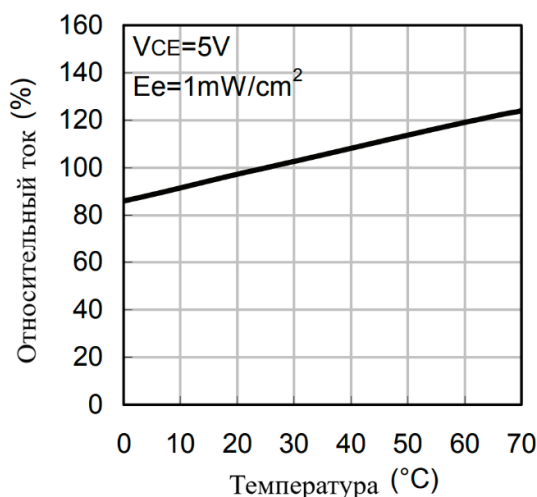


Рис. 2. Зависимость тока коллектора от температуры фототранзистора КР3216РЗС

Для того чтобы преобразовать график, изображенный на рисунке 2, в математическую формулу, воспользуемся линейной аппроксимацией по 2 точкам на графике. Выбраны следующие точки $\{(25, 100), (60, 120)\}$.

Получена следующая формула: $I_{c,отн} = 0,57 t + 85,7$, где $I_{c,отн}$ — относительный ток коллектора от температуры, t — температура фототранзистора.

Теперь необходимо аппроксимировать зависимость тока от угла облученности фототранзистора. График показан на рисунке 3. Преобразование будем вести с учетом полярных координат, аппроксимировать будем в виде функции, имеющей форму круга с радиусом $r = 1$, смещённую относительно начала координат.

Формула будет иметь следующий вид: $I_{c,отн,г} = |\sin(\varphi)|$, где $I_{c,отн,г}$ — относительный ток коллектора от угла облученности, φ — угол облученности.

На основе ранее выведенных выражений можно составить итоговую модель фототранзистора:

$$I_c = \frac{0,38 * I_{c,отн} * I_{c,отн,г}}{1000} E_e^{0,85}.$$

Если подставим ранее выведенные функции, получим следующую итоговую математическую формулу модели тока коллектора фототранзистора: $I_c = \frac{0,38}{1000} * (0,57 t + 85,7) * |\sin(\varphi)| * E_e^{0,85}$, где I_c — ток коллектор, t — температура фототранзистора, φ — угол облученности фототранзистора, E_e — облученность фототранзистора.

В заключение следует отметить, что в ходе работы была разработана математическая модель фототранзистора КР-3216РЗС, базирующаяся на аппроксимации графиков из документации и учитывающая ключевые факторы, влияющие на ток коллектора (I_c): облученность (E_e), температуру (t) и угол облученности (φ) фототранзистора.

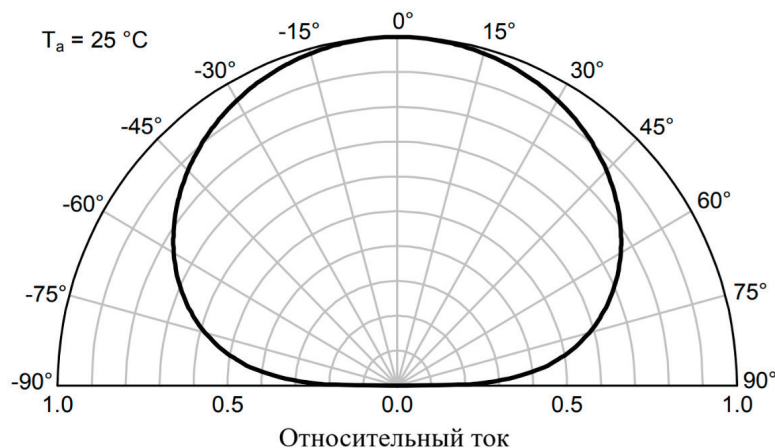


Рис. 3. Зависимость тока коллектора от температуры фототранзистора КР3216РЗС

Вместе с тем, модель имеет ряд ограничений: аппроксимация основана на ограниченном числе точек с графиков документации, что может приводить к погрешностям вне диапазона исходных данных; модель предполагает квазистатический режим работы без учёта времени отклика фототранзистора.

Перспективы развития модели включают расширение за счёт включения временных характеристик, учёта нелинейных эффектов при высоких уровнях облученности или температуры, а также добавления коррекции на разброс параметров между экземплярами фототранзисторов посредством статистического анализа.

Литература:

1. Как работает оптопара, где используется и особенности различных оптопар. — Текст: электронный // microkontroller.ru: [сайт]. — URL: <https://microkontroller.ru/components/kak-rabotaet-optopara-gde-ispolzuetsya-i-osobennosti-razlichnyh-optopar/> (дата обращения: 08.05.2026).
2. Тявловский, К. Л. Мультипараметрические сенсоры на основе полевого фототранзистора / К. Л. Тявловский, Р. И. Воробей, О. К. Гусев. — Текст: непосредственный // Приборостроение — 2024: материалы 17-й Международной научно-технической конференции, Минск, 26–29 ноября 2024 года. — Минск: Б. и., 2024. — С. 98–100.
3. Ефремова, О. А. Математическое моделирование систем солнечного теплоснабжения / О. А. Ефремова, Л. А. Хворова. — Текст: непосредственный // Известия Алтайского государственного университета. — 2017. — № 4 (96). — С. 98–103.
4. Иванов, П. С. Классификация атмосферных оптических помех / П. С. Иванов, А. В. Федотов, О. Н. Немов. — Текст: непосредственный // Современные тенденции развития науки и технологий. — 2015. — № 1–2. — С. 49–51.
5. КР 3216РЗС, фототранзистор 1206, 100 нА, SMD, Kingbright. — Текст: электронный // ChipDip: [сайт]. — URL: <https://www.chipdip.ru/product/kp-3216p3c-fotranzistor-1206-item-100na-smd-kingbright-4406721> (дата обращения: 08.05.2026).

Применение и выбор развязывающих конденсаторов в системах электропитания

Долотов Илья Игоревич, студент магистратуры

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

В статье рассматривается применение развязывающих конденсаторов в системах электропитания в рамках электронной аппаратуры. Представлен обзор основных функций и критериев выбора с учетом переменных электрических и внешних условий функционирования.

Ключевые слова: конденсаторы, импеданс, развязка электропитания.

Основными причинами применения развязывающих конденсаторов является изменения потребляемого тока и шум в цепях электропитания [1]. Использование развязывающих конденсаторов позволяет осуществить следующие функции:

– Локальное хранение энергии. Конденсатор является источником энергии, расположенным ближе к нагрузке, чем источник питания. За счет расположения позволяет быстрее обеспечить нагрузку необходимым током при резких скачках потребления. При этом энергия, запасенная в конденсаторе, может быть определена по формуле, представленной в уравнении 1.

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (1)$$

где W — энергия, Дж;

C — значение емкости конденсатора, мкФ;

U — напряжение, до которого заряжен конденсатор, В.

В высокочастотной области значительным становится расположение конденсаторов. Поскольку решающей становится эквивалентное последовательное сопротивление и эквивалентная последовательная индуктивность подключения [2].

— Стабилизация напряжения питания. При изменения потребляемого тока, отдаёт накопленную энергию или поглощает избыток, за счет чего снижает амплитуду просадок или выбросов напряжения. Для быстрых переходных процессов можно определить значение изменения напряжения питания в результате изменения потребления тока с помощью уравнения 2.

$$\Delta U = \frac{\Delta I \Delta t}{C}, \quad (2)$$

где ΔU — изменение напряжения, В;

ΔI — изменения тока, А;

Δt — длительность переходного процесса, с;

C — емкость конденсатора, Ф.

При увеличении емкости конденсатора, изменение напряжения при том же токе и длительности импульса, будет меньше.

— Снижение импеданса сети питания. Импеданс сети питания не должен превышать допустимого значения на всем диапазоне частот. При возникновении на какой-то частоте бросков тока, которые будут превышать заложенное изменение тока, будет происходить превышение заложенных диапазонов напряжения питания. Значение требуемого импеданса системы может быть вычислено следующим образом:

$$Z = \frac{\Delta U}{\Delta I}, \quad (3)$$

Импеданс системы питания складывается из импеданса всех её составляющих. И фактически описывает как система может реагировать на изменение параметров потребления.

– Устранение резонансов и возбуждения. Печатная плата и компоненты имеют множество индуктивных и емкостных составляющих, образующих неявные контуры, которые могут приводить к резонансу при функционировании нагрузки. В свою очередь применение конденсаторов в системе питания призвано демпфировать систему и сдвинуть резонансные пики.

– Фильтрация помех. Шумы от различных компонентов благодаря конденсаторам не должны попадать на чувствительные цепи питания. Скачки потребления нагрузки не должны сказываться на других компонентах той же электрической цепи или на цепи, обеспечивающий источник питания.

Критерии выбора конденсаторов

Исходя из перечисленных выше основных функций применения конденсаторов в цепях электропитания, можно сформировать последовательность шагов. Перейдем к обсуждению каждого.

Типы диэлектриков

Различные типы диэлектриков имеют различные эксплуатационные, конструкторские и электрические характеристики, так можно выделить следующую типовую зависимость импеданса конденсаторов для различных типов диэлектриков. Так на рисунке 1 представлены диапазоны емкости и номинального напряжения для конденсаторов различных типов [3].

Температурный диапазон работы

После выбора типа конденсатора, важным шагом является определение диапазонов температур, при которых компонентная база будет функционировать. Диапазон температур следует определять с учетом нагрева компонента при про-

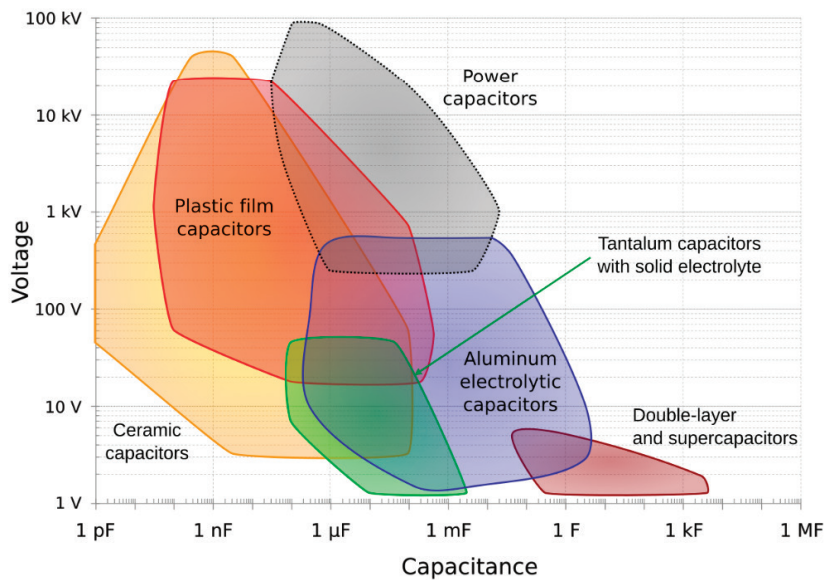


Рис. 1. Емкость и номинальное напряжение конденсаторов различных типов

хождении электрического тока через него и взаимного влияния температур компонентов друг на друга. Так в рамках применения как шунтирующих конденсаторов, наибольшее применение нашли многослойные керамические конденсаторы (MLCC). Согласно классификации EIA, существует три класса конденсаторов, они представлены в таблице 1 [4].

Таблица 1

Класс	Стабильность	Ёмкость	Размер	Варианты температурных характеристик
1	Очень высокая	Небольшая	Крупнее	COG/NPO
2	Средняя	Высокая	Маленький	X7R, X5R
3	Низкая	Очень высокая	Очень маленький	Y5V, Z5U

Классы 2 и 3 имеют общую систему обозначения вида AnB, где A кодирует нижний температурный предел, n — верхний температурный предел, а B — максимальное допускаемое отклонение емкости. В таблице 2 представлены варианты температурных диапазонов конденсаторов, а также наиболее распространенные допуски изменения ёмкости.

Таблица 2

Символ на позиции A	Минимальная температура, °C	Символ на позиции n	Максимальная температура, °C	Символ на позиции B	Допуск изменения емкости
X	-55	2	+45	R	±15 %
Y	-30	4	+65	S	±22 %
Z	+10	5	+85	T	+22 %...-33 %
		6	+105	V	+22 %...-82 %
		7	+125		
		8	+150		
		9	+200		

Для конденсаторов 1 класса, стандарт EIA не использует жёсткую систему кодирования температурного диапазона, как у 2 и 3 классов. Основной характеристикой является температурный коэффициент ёмкости, поскольку изменение ёмкости у таких конденсаторов происходит линейно в зависимости от температуры, он характеризует величину отклонение в зависимости от конкретного значения температуры. Допустимый рабочий диапазон температур определяется производителем и конкретной серией конденсаторов.

В зависимости от используемых приложений, и необходимой при них точности, и возникающих температурных условий работы, необходимо выбирать соответствующий класс конденсаторов, не хуже предъявляемых требований. Так, например для работы при температуре окружающей среды от 0 до 80 °С и нагреве компонентной базы конденсаторов до 50 °С с возможным изменением емкости не более $\pm 10\%$, ограничит применение конденсаторов и сделает возможным применение только типов X8R и X9R.

Максимальное рабочее напряжение и изменение напряжения от приложенного напряжения

Рабочее (номинальное) напряжение — это максимальное напряжение, при приложении которого к конденсатору, он может работать в течение длительного времени с сохранением стабильной работы компонента.

При работе электрической схемы, напряжение, приложенное к конденсатору, не должно превышать значения номинального напряжения. Даже кратковременное превышение может привести к значительному падению емкости, ускоренному старению, микротрещинам и пробоям.

Для избежания этого, всегда стоит определять максимальное напряжение, приходящееся на конденсатор, и выбирать конденсатор с рабочим напряжением в 1,3–1,5 раза больше.

Также немаловажно учитывать влияние прикладываемого напряжения на емкость конденсатора, этот эффект имеет название DC Bias. В большинстве случаев максимальное отклонение в рамках допустимого прикладываемого напряжения, может составлять -50% , что значительно сказывается на работе электрической схемы.

Пример изменения емкости при приложении напряжения представлен на рисунке 2 [5].

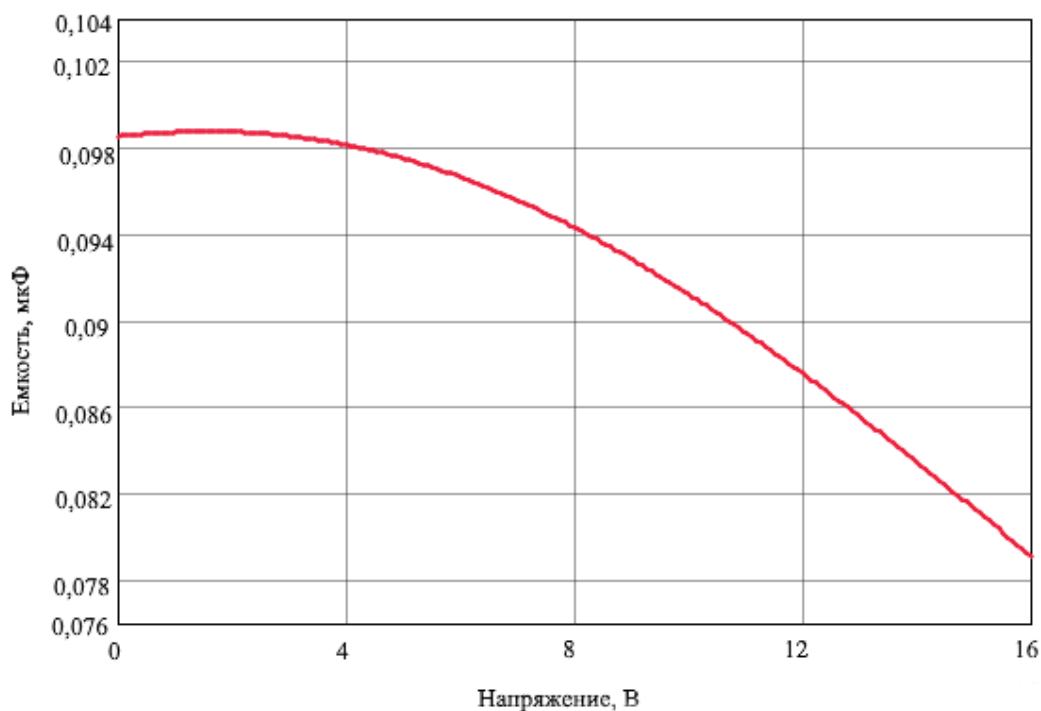


Рис. 2. Емкость конденсатора при различном приложенном напряжении

Как уже было сказано ранее, функцией применения развязывающих конденсаторов является снижение импеданса системы питания ниже определенного уровня на требуемом диапазоне частот. Эти требования обоснованы максимально допустимым отклонением изменения напряжения при изменении потребляемого нагрузкой тока.

Полный импеданс определяется следующим выражением:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}, \quad (4)$$

где R — сопротивление, Ом;

f — частота, Гц;

L — индуктивность, Гн;

C — емкость, Ф.

На практике эта зависимость дает результат, представленный на рисунке 3.

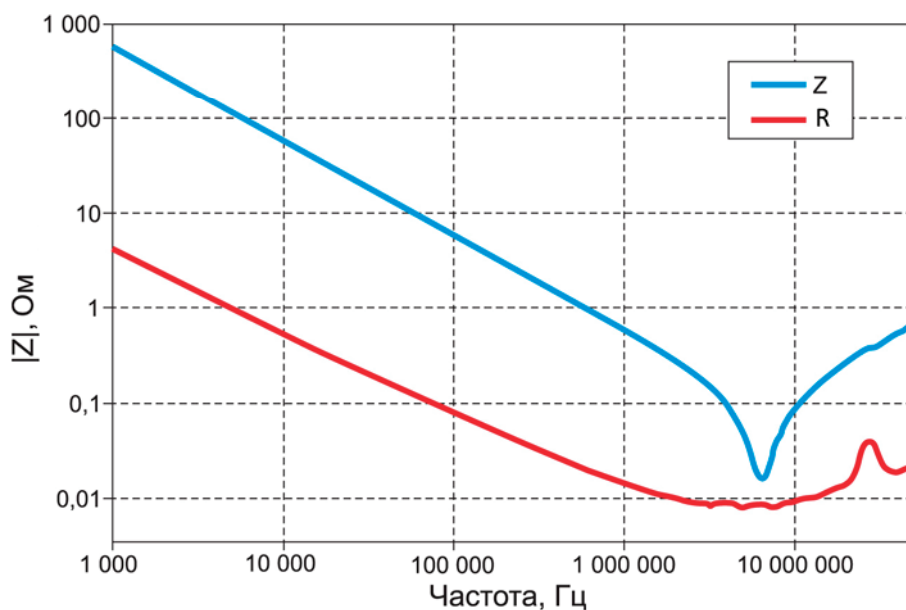


Рис. 3. Активное сопротивление и импеданс конденсатора при различной частоте

Минимальное значение достигается при резонансной частоте, которая может быть вычислена следующим образом:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (5)$$

На рисунке 4 показана зависимость различия характеристик для конденсаторов различной емкости. Данная зависимость показана при сохранении типоразмера конденсатора, правая ветвь характеристика имеет равный наклон при различных значениях емкости.



Рис. 4. Импеданс конденсаторов различной емкости при одинаковом размере корпуса

При параллельном соединении конденсаторов их минимальный импеданс будет меньше импеданса минимального значения.

При этом значительное влияние оказывает индуктивная составляющая компонента и его подключения на печатной плате. Так 5 показано отличие импеданса для конденсаторов емкость 100 нФ в различных типоразмерах. Различия в характеристиках, исходя из конструктивных особенностей компонента и его подключения тоже необходимо учитывать при разработке системы питания.

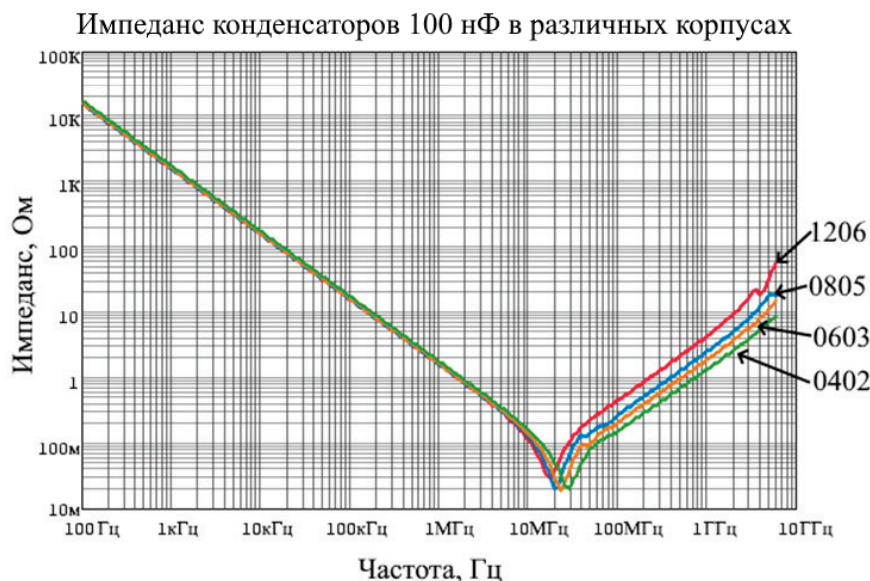


Рис. 5. Импеданс конденсаторов одинакового номинала в различных корпусах

Вывод

Таким образом, на основе перечисленных выше пунктов, можно выделить следующие моменты, необходимые для контроля при подборе конденсаторов в системах питания.

Необходимо учитывать следующие факторы:

Рабочее напряжение и изменение ёмкости конденсатора при его приложении

Допустимый температурный диапазон работы и изменение ёмкости конденсатора от температуры

Допуск номинала ёмкости самого конденсатора

Значения импеданса

Ограничения на тип и размер конденсаторов

В работе проанализированы основные функции развязывающих конденсаторов и факторы, влияющие на их функционирование. Также показано, что совместный учет этих факторов необходим для корректного проектирования систем электропитания.

Литература:

1. Богатин, Э. Целостность сигналов и систем питания: современный курс проектирования. — Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2021. — 720 с.
2. Джонсон, Г., Грэхем, М. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: методический курс по ПХД. — М.: Вильямс, 2006. — 624 с.
3. Ahmed, M. Topological Overview of Auxiliary Source Circuits for Grid-Tied Converters / M. Ahmed, A. S. Haider, M. B. Shadmand // ResearchGate. — 2023. — № 1. — P. 12–18.
4. EIA-198-D. Ceramic Dielectric Capacitors: Classes I, II, III and IV. Part I. — Washington: Electronic Industries Alliance, 1991. — 45 p.
5. Murata Manufacturing Co., Ltd. Chip Multilayer Ceramic Capacitors: Selection Guide. — Catalog No. C02E. — Kyoto: Murata Manufacturing Co., Ltd., 2024. — 120 p.

Волоконно-оптические датчики в системах мониторинга высоковольтных линий электропередачи

Животиков Максим Юрьевич, студент

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

В статье рассматривается применение волоконно-оптических датчиков для контроля состояния высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП). Описаны физические принципы работы различных типов датчиков, их практическое использование для мониторинга температуры, гололедообразования, вибраций и токов. Проанализирована экономическая эффективность внедрения таких систем.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, линии электропередачи, мониторинг ЛЭП, брэгговские решетки, распределенные системы.

Современная электроэнергетика требует надежных методов контроля состояния высоковольтных ЛЭП. Эти линии постоянно подвергаются перегрузкам, обледенению, ветру и вибрациям. Аварии на ЛЭП приводят к серьезным экономическим потерям и перебоям в электроснабжении. Традиционные способы контроля (визуальные осмотры, тепловизионная съемка) не позволяют вести непрерывный мониторинг в реальном времени, требуют много времени и малоэффективны в труднодоступных местах. Кроме того, обычные электромагнитные датчики плохо работают в условиях сильных полей [1, 2].

Альтернативой выступают волоконно-оптические технологии. Оптическое волокно — диэлектрик, поэтому оно нечувствительно к электромагнитным помехам и может одновременно служить датчиком и каналом передачи данных [3].

Физические принципы работы оптоволоконных датчиков

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) — участки волокна с периодическим изменением показателя преломления. Они отражают свет на определенной длине волны. При изменении температуры или деформации период решетки меняется, и длина волны отраженного света сдвигается. Чувствительность: ~ 10 пм/°C и ~ 1 пм/мк [4, 5]. Недостаток — перекрестная чувствительность к темпера-

туре и деформации, что требует методов разделения воздействий.

Распределенные системы используют само волокно как непрерывный датчик. В волокно запускается лазерный импульс, анализируется обратное рассеяние.

Рамановское рассеяние чувствительно к температуре — позволяет строить температурный профиль вдоль десятков километров с точностью до метра [2, 3].

Бриллюэновское рассеяние реагирует и на температуру, и на деформацию, что важно для обнаружения обледенения или провисания проводов [6].

Датчики на эффекте Фарадея (волоконно-оптические трансформаторы тока). Магнитное поле тока поворачивает плоскость поляризации света в волокне. Угол поворота пропорционален силе тока. Такие датчики безопаснее, компактнее и выдают цифровой сигнал [7].

Флуоресцентные датчики (со специальными добавками в волокно) позволяют измерять температуру в критических точках (места соединений) по времени затухания свечения [8].

Применение оптоволоконных систем для мониторинга ЛЭП

Контроль температуры проводов. Нагрев провода током и погодой снижает его прочность и увеличивает провисание.

Принцип работы ВОД датчика

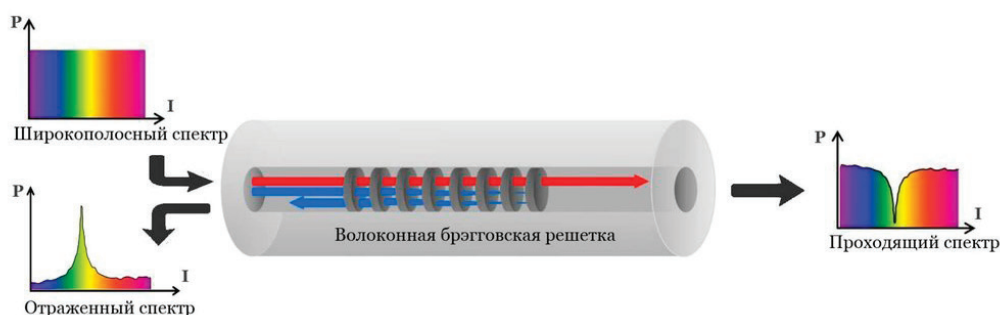


Рис. 1. Волоконно Брэгговская решетка (ВБР)

Традиционно максимальный ток рассчитывают для худших условий (жара, безветрие), что занижает пропускную способность. Установка датчиков (например, ВБР) позволяет динамически определять допустимый ток в реальном режиме. Это подход динамического определения пропускной способности (Dynamic Line Rating) — увеличение нагрузки на 10–30 % без строительства новых линий [1].

Борьба с гололедом. Намерзание льда создаёт дополнительную нагрузку, опасную обрывом проводов и падением опор. Распределенные системы на бриллиантовом рассеянии (волокно встроено в грозотрос) фиксируют деформации от натяжения. Система показывает точный участок обледенения, что позволяет своевременно включить плавку [6].

Контроль вибраций. Ветровая нагрузка вызывает вибрацию проводов, приводящую к усталости металла и обрывам. Для контроля используют ВБР с высокой частотой опроса или акустические системы, «слышащие» вибрацию вдоль всей линии [6].

Мониторинг состояния опор. Датчики деформации на опорах фиксируют наклон из-за подмыва грунта или оползней, позволяя принять меры до разрушения [5].

Цифровые трансформаторы тока на эффекте Фарадея — ключевой элемент цифровых подстанций. Они не содержат масла, не взрываются при КЗ и выдают информацию прямо в цифровом формате для релейной защиты [7].

Эффективность и перспективы внедрения

Внедрение оптоволоконных систем дает экономические преимущества. Несмотря на первоначальные за-

траты, они быстро окупаются за счет предотвращения аварий. Своевременное обнаружение проблемы позволяет избежать дорогостоящего ремонта и ущерба от отключений. По некоторым данным, непрерывный мониторинг предотвращает до 70 % аварийных отказов [9].

Становится возможным переход от плановых ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию — ремонтные бригады выезжают только при сигнале датчиков. Это снижает эксплуатационные затраты на 30–50 % [3].

Современные оптоволоконные системы легко интегрируются в общую систему управления подстанции, поддерживают протокол МЭК 61850 и часто используют те же оптические каналы, что и для связи, что дополнительно снижает затраты [9].

Волоконно-оптические датчики — перспективное направление для мониторинга высоковольтных ЛЭП. Их главные достоинства: нечувствительность к электромагнитным помехам, возможность распределенного измерения параметров на больших расстояниях, безопасность и долгий срок службы.

Разные типы датчиков позволяют решать практически все задачи эксплуатации ЛЭП: контроль температуры, своевременное обнаружение гололеда, мониторинг вибрации и деформаций опор, точное измерение тока.

Внедрение таких систем дает реальный экономический эффект за счет предотвращения аварий, более полного использования пропускной способности линий и снижения затрат на обслуживание. В будущем они станут основой полностью автоматизированных, самодиагностируемых энергосистем.

Литература:

1. Проект «Оптоволоконный датчик температуры проводов ЛЭП». Казанский государственный энергетический университет / Университет 2035. — URL: <https://pt.2035.university/project/optovolonnyj-datchik-temperatury-provodov-lep> (дата обращения: 14.03.2026).
2. How Fiber Optic Asset Monitoring Improves Power Asset Performance and Safety / FJINNO. — 2025. — URL: <https://www.fjinno.net/ru/how-fiber-optic-asset-monitoring-improves-power-asset-performance-and-safety/>
3. Мониторинг силового кабеля с использованием распределенных волоконно-оптических датчиков / FJINNO. — 2025. — URL: <https://www.fjinno.net/ru/power-cable-monitoring-using-distributed-optical-fiber-sensors/>
4. Патент № 2319988 РФ. Оптоволоконная мультисенсорная система... — Оpubл. 27.03.2008.
5. Strain Sensor | Fiber Optic Strain Measurement & Structural Health Monitoring Solutions / FJINNO. — 2025. — URL: <https://www.fjinno.net/ru/strain-sensor-fiber-optic-strain-measurement-structural-health-monitoring-solutions/>
6. Power Cable Condition Monitoring: Fiber Optic Sensors for Fault Prevention / FJINNO. — 2026. — URL: <https://www.fjinno.net/ru/power-cable-condition-monitoring-fiber-optic-sensors-for-fault-prevention/>
7. Волоконно-оптический измерительный трансформатор тока / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. — URL: <https://ni.spbstu.ru/наука-и-образование/волоконно-оптический-измерительный>
8. Патент № 2527308 РФ. Волоконно-оптический измеритель температуры. — Оpubл. 27.08.2014.
9. Васев А. Н., Мисбахов Р. Ш., Зиганшина А. И., Федотов В. В. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2018. — Т. 20, № 11–12. — С. 16–26.

Разработка высокосветосильного объектива для тепловизионных устройств

Животиков Максим Юрьевич, студент

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске

В работе рассмотрены этапы конструирования высокоапертурного объектива, работающего в длинноволновой инфракрасной области (LWIR, спектральный отрезок 8–12 мкм). Приведены исходные технические условия, проанализированы известные конструктивные решения, выполнен подбор оптических сред, описана методика исправления аберраций и обеспечения термостабильности. Представлены итоги компьютерного моделирования в пакете Zemax, а также результаты допускового расчёта.

Ключевые слова: тепловизионная оптика, высокосветосильный объектив, длинноволновый ИК-диапазон, германий, селенид цинка, термокомпенсация.

Введение

Тепловизионная техника нашла широкое применение в оборонной промышленности, охранных системах, неразрушающем контроле и медицинской визуализации. Ключевым элементом любого тепловизора является объектив, формирующий изображение на приёмнике излучения. К современным тепловизионным объективам предъявляют высокие требования: большая светосила (относительное отверстие вплоть до 1:1), малые габариты и стабильность фокусировки при изменении температуры окружающей среды.

Настоящая работа посвящена созданию принципиальной оптической схемы светосильного объектива для диапазона 8–12 мкм, совместимого с неохлаждаемой микроболометрической матрицей, имеющей шаг пикселя 17 мкм.

1. Формулировка задачи и технические условия

Анализ современных разработок позволил сформулировать следующие параметры проектируемой системы:

- Рабочий спектральный интервал: 8...12 мкм (окно прозрачности атмосферы)
- Фокусное расстояние: $f'=50f=50$ мм
- Относительное отверстие: $D/f'=1:1$ (светосила $F=1.0$)
- Угловое поле по диагонали: $2\omega=16^\circ$
- Формат фотоприёмника: 640×480 пикселей с размером 17 мкм
- Температурный диапазон эксплуатации: от -40°C до $+60^\circ\text{C}$

Пороговое значение модуляционной передаточной функции (МТФ) на пространственной частоте Найквиста (29.4 мм^{-1}): не ниже 0.4 для всех точек поля.

2. Анализ возможных конструкций и выбор прототипа

Изучение патентной и научно-технической литературы показало, что наилучшие результаты для указанных требований демонстрируют четырёхлинзовые схемы на

основе менисков. В качестве базового прототипа рассмотрена конструкция по патенту РФ № 2403598, включающая четыре компонента: первый — положительный мениск (вогнутостью в сторону изображения), второй — двояковогнутая линза, третий и четвёртый — положительные мениски. Данное решение обеспечивает относительное отверстие 1:1 при поле 25° , однако обладает увеличенной осевой длиной.

Для нашей задачи выбрана схема «+ — + +» (знаки оптических сил по ходу лучей) с воздушными зазорами. Все поверхности предполагаются сферическими, что упрощает изготовление.

3. Обоснование выбора оптических материалов

Выбор материалов для ИК-оптики ограничен. В интервале 8–12 мкм основными кандидатами выступают:

Германий (Ge): большой показатель преломления ($\approx 4,0$), низкая дисперсия, но сильная температурная зависимость показателя ($dn/dT \approx 400 \cdot 10^{-6}$), высокая цена.

Селенид цинка (ZnSe): умеренный показатель ($\approx 2,4$), отрицательный коэффициент dn/dT , используется для хроматической и температурной коррекции.

Халькогенидные стёкла (например, ИКС-25, IRG-26): промежуточные свойства ($n \approx 2,5 \dots 2,6$), технологичны.

В разрабатываемой схеме применено следующее распределение материалов:

- Линзы 1 и 4: германий (основная оптическая сила).
- Линза 2: селенид цинка (отрицательный компонент для коррекции хроматизма).
- Линза 3: халькогенидное стекло (положительная линза для финальной коррекции и пассивной термокомпенсации).

4. Аберрационная коррекция и оптимизация в среде Zemax

Расчёт проводился в коммерческом ПО Zemax OpticStudio. Стартовая система строилась с нулевыми толщинами, затем вводились предварительные значения радиусов и зазоров по параксиальным формулам. Апер-

турная диафрагма размещена вблизи второй линзы — это позволило эффективно подавить сферическую абберацию и кому.

Порядок коррекции aberrаций:

- **Сферическая aberrация** минимизировалась подбором радиусов первой и четвёртой линз.
- **Хроматизм положения** устранялся введением отрицательной линзы из ZnSe (высокая дисперсия), что

обеспечило ахроматизацию в рабочем спектральном интервале.

- **Астигматизм и кривизна поля** снижались варьированием расстояния между второй и третьей линзами.

Критерием качества служила среднеквадратичная (RMS) геометрическая пятнистость рассеяния. После автоматической оптимизации (метод DLS) получены конструктивные параметры, приведённые в табл. 1.

Таблица 1. Конструктивные параметры оптической схемы

№ пов.	Тип	Радиус, мм	Расстояние до след., мм	Материал
1 (Л1)	Сфера	45.2	6.0	Ge
2	Сфера	125.5	28.0	воздух
3 (Л2)	Сфера	-67.8	3.5	ZnSe
4	Сфера	180.3	15.0	воздух
5 (Л3)	Сфера	85.1	5.0	ИКС-25
6	Сфера	210.4	10.2	воздух
7 (Л4)	Сфера	92.6	6.5	Ge
8	Сфера	-134.7	25.0	воздух

Общая длина системы от первой поверхности до фокальной плоскости равна **99.2 мм**.

Итоговые показатели качества:

RMS-пятно в центре поля: **8.5 мкм** (менее половины размера пикселя).

МТФ на частоте 30 мм⁻¹: **0.45** в центре, **0.35** на краю поля.
Дисторсия: < **1.5 %**.

5. Обеспечение температурной стабильности

Ввиду сильной зависимости показателя преломления германия от температуры (положительный dn/dT) необходимо компенсировать смещение фокуса в диапазоне -40...+60°C. Применён **пассивный метод атермализации**, основанный на комбинации материалов с разными знаками dn/dT : германий (положительный), селенид цинка (отрицательный). Подбором оптических сил и толщин, а также выбором алюминиевого корпуса с соответствующим коэффициентом линейного расширения достигнуто, что положение плоскости наилучшей установки остаётся в пределах глубины резкости (± 20 мкм) во всём диапазоне температур.

Литература:

1. Михалюта М. А., Хацевич Т. Н., Дружкин Е. В. Разработка серии широкоугольных светосильных объективов для тепловизионных приборов // 2015.

2. Автоматизированное проектирование оптических систем светосильных объективов для длинноволнового инфракрасного диапазона //Электронный архив КПИ, 2024.

3. Патент РФ № 2403598. Светосильный объектив для тепловизора.

4. Кулакова Н. Н., Мишин С. В. Расчет допусков объектива тепловизионной системы // Инженерный журнал МГТУ им. Н. Э. Баумана.

5. Грейсух Г. И., Ежов Е. Г., Левин И. А. Компоновка и расчёт двухдиапазонного атермального рефракционно-линзового ИК-объектива // Компьютерная оптика, 2022.

6. Допусковый анализ

Для оценки технологичности выполнен допусковый расчёт согласно методикам, описанным в работах Кулаковой Н. Н. и Мишина С. В.. В Zemax заданы предполагаемые производственные погрешности:

- Радиусы кривизны: $\pm 0,5 \%$
- Толщины линз: $\pm 0,03$ мм
- Воздушные зазоры: $\pm 0,05$ мм
- Децентрации линз: $\pm 0,02$ мм

Метод Монте-Карло показал, что для 90 % собранных систем МТФ на частоте 30 мм⁻¹ будет не ниже 0,32, что подтверждает технологичность схемы.

Заключение

Спроектирован высокосветосильный тепловизионный объектив ($f^*=50$ мм, F/1.0, поле 16°). Схема включает четыре сферические линзы из германия, селенида цинка и халькогенидного стекла. Качество изображения близко к дифракционному пределу, обеспечена пассивная термокомпенсация, допуски являются приемлемыми для серийного производства.

Оценка технического состояния газовой горелки путевого подогревателя нефти по виброакустическим характеристикам и динамике давления топлива

Зарипов Айнур Русланович, студент магистратуры

Научный руководитель: Хуснияров Мират Ханифович, доктор технических наук, профессор

Уфимский государственный нефтяной технический университет

Предложен метод оценки технического состояния газовой горелки путевого подогревателя нефти по виброакустическим характеристикам и динамике давления топлива. Построен ансамблевый классификатор (решающее дерево + метод опорных векторов), различающий три состояния: «Норма», «Предупреждение», «Авария». Экспериментальная проверка на реальной горелке показала общую точность 94,2 % и своевременное обнаружение дефектов (за 38 минут до отказа). Даны рекомендации по внедрению в систему ПАЗ.

Ключевые слова: газовая горелка, диагностика, виброакустика, давление топлива, классификация технического состояния, предиктивная аналитика.

Газовые горелки путевых подогревателей нефти являются основным источником тепла для поддержания текучести высоковязкой нефти при трубопроводном транспорте. Отказ горелки (забивка форсунки, износ подшипников вентилятора, нестабильность горения) приводит к остановке нагревателя, застыванию нефти и аварии. Традиционные системы противоаварийной защиты (ПАЗ) фиксируют уже наступивший критический режим: погасание факела, превышение температуры. Такой подход не предотвращает отказ. Более эффективен непрерывный мониторинг технического состояния по косвенным диагностическим признакам.

В настоящей работе предлагается метод оценки технического состояния газовой горелки по двум группам изменений: виброакустические характеристики корпуса (чувствительные к подшипникам, дисбалансу вентилятора) и динамика давления топлива перед форсункой (пульсации, тренды). Выбор этих параметров обусловлен их информативностью, возможностью неинвазивного измерения и низкой стоимостью аппаратной реализации. Цель работы — разработка и экспериментальная проверка классификатора, выдающего сигналы «Норма», «Предупреждение» (зарождающийся дефект) и «Авария» (критическое состояние).

Виброакустический сигнал на корпусе горелки содержит информацию о вращающихся узлах (подшипники вентилятора, крыльчатка). Износ подшипников проявляется ростом среднеквадратичного значения (RMS) в диапазоне 300–2000 Гц и увеличением коэффициента эксцесса (kurtosis). Нестабильное горение генерирует низкочастотные колебания 5–50 Гц. Давление топлива перед форсункой в нормальном режиме стабильно (пульсации не более 2–3 % среднего). При закоксовывании форсунки или засорении фильтра появляются медленные тренды и возрастают высокочастотные пульсации (10–100 Гц). Комбинирование признаков из обеих областей позволяет надёжно различать предотказные состояния.

Эксперимент проводился на действующем путевом подогревателе нефти (горелка мощностью 1,2 МВт, природный газ). На корпусе установлен вибропреобразова-

тель IEPE (0,5–10000 Гц, дискретизация 20 кГц). В топливной линии перед форсункой — датчик давления (0–1 МПа, полоса 200 Гц). Созданы искусственные дефекты: ослабление подшипника вентилятора, засорение топливного фильтра (30 % сечения), закоксовывание форсунки. Проведено 15 сессий, записано 1200 фрагментов по 5 секунд с метками «Норма», «Предупреждение», «Авария».

Для каждого фрагмента рассчитаны признаки: из вибрации — RMS в полосах 5–50, 50–300, 300–1000, 1000–5000 Гц; коэффициент эксцесса; амплитуды первых трёх гармоник частоты вращения вентилятора. Из давления — среднее значение за 5 с, размах пульсаций, стандартное отклонение, амплитуда доминирующей гармоники в диапазоне 5–100 Гц, скорость изменения среднего за 60 с. Всего 12 признаков. Решающее правило построено как ансамбль решающего дерева (CART) и метода опорных векторов (SVM) с радиальным ядром. Обучение на 70 % данных, валидация — 20 %, тест — 10 %.

Алгоритм работает в реальном времени с окном 5 с и сдвигом 1 с, применяется медианная фильтрация выходных меток по трём окнам. Программная реализация на Python (numpy, scikit-learn) показала время обработки 0,15 с на окно на стандартном промышленном компьютере.

На рисунке 1 показана динамика изменения давления топлива и вибрации при развитии дефекта (закоксовывание форсунки). Давление (сплошная линия) постепенно снижается с 0,85 до 0,55 МПа, а вибрация (пунктирная линия) растёт с 0,12 до 0,28 g. Пересечение трендов происходит примерно на 35-й минуте. Такое поведение однозначно указывает на начало неисправности. По данным графика, уже на 20-й минуте можно зафиксировать отклонение от нормы, а на 50-й минуте параметры достигают критических значений. Это подтверждает, что комбинированный контроль давления и вибрации позволяет заблаговременно (за 30–40 минут) выдать предупреждение.

Результаты классификации на тестовой выборке приведены в таблице 1.

Общая точность (accuracy) — 94,2 %. Ложные тревоги (норма как предупреждение) — 2 %, пропуск аварии — 0,5 %. Сигнал «Предупреждение» появлялся за 38 минут

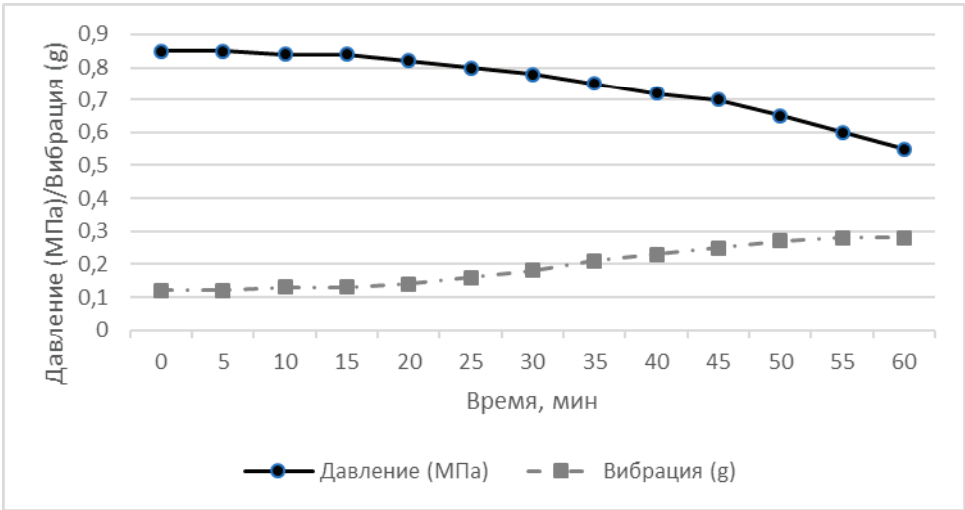


Рис. 1. Изменение давления и вибрации при закоксовании форсунки

Таблица 1. Результаты классификации технического состояния горелки

Состояние	Precision	Recall	F1-мера
Норма	0,97	0,98	0,975
Предупреждение	0,91	0,88	0,894
Авария	0,95	0,96	0,955

до аварийного отключения по ПАЗ, «Авария» — за 6 минут. Это позволяет оператору провести плановую остановку и техническое обслуживание.

Для сравнения были обучены модели только по вибрации (9 признаков) и только по давлению (4 признака). F1-мера для класса «Предупреждение» составила 0,72 и 0,68 соответственно, против 0,89 в гибридном методе. Комбинация датчиков существенно повышает робастность: дефекты, слабо влияющие на один сигнал, хорошо видны в другом.

Как видно из рисунка 2, гибридный метод диагностики (комбинация вибрации и давления) обеспечивает значение F1-меры 0,89, что на 0,17–0,21 выше, чем при ис-

пользовании только одного типа датчиков. Это подтверждает эффективность предложенного подхода.

Алгоритм может быть реализован на промышленных контроллерах (PLC с ARM-процессором) или периферийных компьютерах. Ориентировочная стоимость дополнительного оборудования на одну горелку — 40–70 тыс. руб. Окупаемость достигается за 2–4 месяца за счёт предотвращения одного аварийного простоя (стоимость ~1 млн руб. за 8 ч простоя). Сигналы «Авария» могут быть поданы на отсечные клапаны, а «Предупреждение» — на пульт оператора.

В работе предложен и экспериментально апробирован метод оценки технического состояния газовой горелки

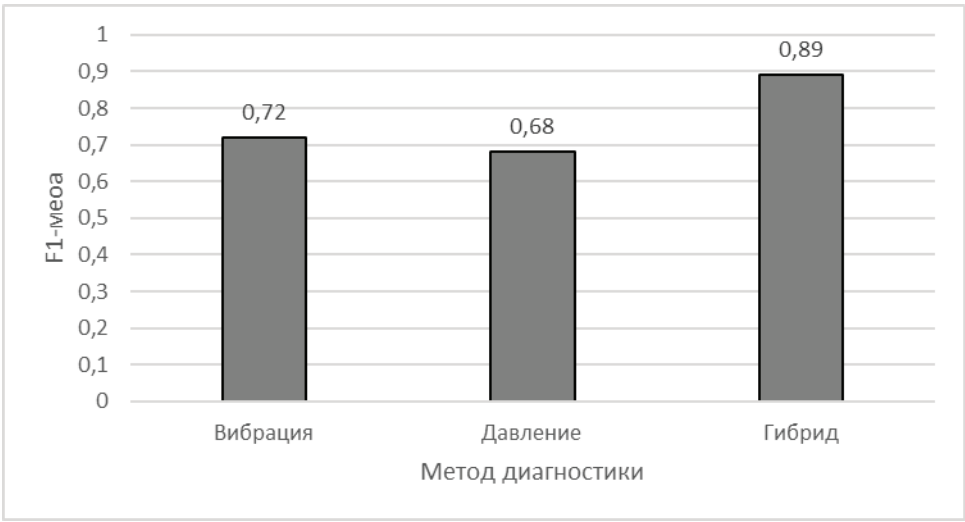


Рис. 2. Сравнение F-1 меры для различных методов диагностики

путевого подогревателя нефти по виброакустике и динамике давления топлива. Ансамблевый классификатор (решающее дерево + SVM) различает три состояния с общей точностью 94,2 %, ложно-тревожная сигнализация не превышает 2 %. Комбинирование двух типов датчиков повышает F1-меру для класса «Предупреждение» на 0,17–0,21

по сравнению с одиночными методами. Рекомендовано внедрение на всех газовых горелках путевых подогревателей, особенно в условиях низких температур и нестабильного качества топлива. Дальнейшие исследования направлены на создание самообучающейся системы, адаптирующейся к изменению характеристик горелки.

Литература:

1. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся частях. — М.: Стандартиформ, 2003. — 32 с.
2. Ключев В. В., Соснин Ф. Р. Неразрушающий контроль. Том 7. Вибродиагностика. — М.: Машиностроение, 2019. — 456 с.
3. Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. — Wiley, 2021. — 640 p.
4. Гореликов Е. Ю. и др. Режимы обедненного горения... // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 5. — С. 18–27.
5. Патент РФ № 2419076. Способ измерения пульсаций давления / Зайцев А. В., Морозов А. А. — Оpubл. 20.05.2011.

Причины выхода из строя центробежного компрессора в нефтегазовой отрасли

Космовский Салих Сергеевич, студент магистратуры

Научный руководитель: Калашник Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной технический университет

В статье систематизированы причины выхода из строя центробежного компрессора, применяемого в нефтегазовой отрасли. Отказ рассмотрен как последовательность технически связанных стадий: изменение рабочей среды или режима работы, нарушение течения в проточной части, рост динамических, тепловых и контактных нагрузок, повреждение рабочего колеса, ротора, подшипниковых узлов, уплотнений или системы управления. Выделены аэродинамические, материаловедческие, конструктивно-геометрические, роторно-опорные и эксплуатационные факторы.

Ключевые слова: центробежный компрессор, нефтегазовая отрасль, отказ, помпаж, рабочее колесо, ротор, подшипник скольжения, сухое газовое уплотнение, коррозионная среда, техническое диагностирование.

Отказ центробежного компрессора редко определяется одной изолированной неисправностью. Обычно он формируется как последовательный процесс: отклонение режима работы или изменение свойств рабочей среды нарушает течение в проточной части; далее возрастают вибрационные, тепловые и контактные нагрузки; после этого развиваются повреждения рабочего колеса, ротора, подшипниковых узлов, уплотнений или системы управления [1, с. 187–198; 2].

Для нефтегазовой эксплуатации характерны влажная среда, наличие H_2S и других коррозионно-активных компонентов, механические примеси, изменчивый состав газа и длительные интервалы непрерывной работы. Поэтому надежность компрессора определяется не только прочностью деталей, но и качеством подготовки газа, устойчивостью режима, состоянием смазочной системы, исправностью уплотнений и корректностью защитной автоматики [3, с. 1–11; 4; 5].

При анализе отказа целесообразно разделять четыре уровня: первичный фактор, механизм развития, диагно-

стический признак и конечное повреждение. К первичным факторам относятся агрессивная или загрязненная среда, увеличение зазоров, несоосность, дефект опоры, ошибка регулирования и изменение состава газа. На уровне механизма развития проявляются перетечки через зазоры, отрыв потока, помпаж, перераспределение напряжений, нарушение масляного клина, сухое трение, коррозионное или усталостное растрескивание [3, с. 1–11; 6, с. 20–29; 7].

Основные группы причин представлены таблице 1. Такая форма позволяет сопоставить условие возникновения, механизм развития и ожидаемое последствие отказа.

К основным режимным причинам относятся срыв потока и помпаж. Срыв потока представляет собой локальное нарушение обтекания в рабочем колесе или диффузоре и сопровождается снижением эффективности и ростом вибрации. Помпаж является неустойчивостью компрессорной системы: агрегат теряет способность поддерживать требуемое давление, возникают циклические изменения расхода и давления, меняется осевая сила и возрастает динамическая нагрузка [2; 7].

Таблица 1. Причины отказов, условия возникновения и последствия

Группа причин	Чем вызывается	Механизм развития	К чему приводит
Аэродинамическая неустойчивость	Малый расход, высокое противодавление, неэффективная рециркуляция, загрязнение проточной части, изменение состава газа.	Срыв потока, рециркуляция, смещение рабочей точки к границе помпажа, циклические изменения расхода и давления.	Рост вибрации и осевых нагрузок, повреждение уплотнений и рабочего колеса, аварийный останов
Загрязнение, влага и коррозионная среда	Пыль, капельная жидкость, конденсат, H_2S и другие коррозионно-активные компоненты, продукты коррозии, недостаточная фильтрация и сепарация.	Отложения, коррозия, образование жидкой фазы, ухудшение обтекания, повреждение поверхности и снижение сопротивления материала растрескиванию.	Падение эффективности, дисбаланс, коррозионное растрескивание, сужение проходных сечений, ускоренный износ
Конструктивно-геометрические отклонения	Увеличенный зазор по вершинам лопаток, неблагоприятная геометрия диффузора, погрешности ремонта, восстановление по изношенному образцу.	Перетечки через зазоры, вторичные течения, рециркуляция, изменение межлопаточных каналов и распределения нагрузок.	Сужение устойчивого диапазона, снижение напора и КПД, рост вибрации, предпосылки усталостного повреждения
Прочностные и усталостные повреждения	Циклические нагрузки, концентрация напряжений, сварочные дефекты, локальные динамические нагрузки, агрессивная среда, чрезмерный натяг посадки.	Зарождение и рост трещин, сульфидное и коррозионное растрескивание, снижение сопротивления разрушению.	Трещины ступицы, лопаток и диска, разрушение рабочего колеса, повреждение ротора
Ротор, опоры и смазка	Дефекты рабочей поверхности подшипника, несоосность, посторонние частицы в проточной части, загрязнение или недостаток масла.	Перераспределение нагрузок, рост контактного давления, нарушение масляного клина, сухое трение и локальный нагрев.	Повреждение баббитовой наплавки, смещение ротора, задевание неподвижных деталей, повреждение вала и корпуса
Уплотнения и вспомогательные системы	Загрязненный или влажный уплотнительный газ, нарушение перепада давления, попадание масла в линии, неисправность фильтров и вентиляционных линий.	Повреждение рабочих поверхностей уплотнения, рост утечек, потеря герметичности, нарушение безопасности последовательности пуска и останова.	Утечки газа, срабатывание защиты, пожарный и экологический риск, повторные остановки
Система управления и защиты	Сбои датчиков, исполнительных механизмов и логики противопомпажной защиты, запаздывание рециркуляционного клапана, неверные уставки.	Неверная оценка положения рабочей точки, поздний отвод от помпажа, ложная или недостаточная защитная реакция.	Работа в опасной области карты, избыточная рециркуляция, помпаж, вторичные механические повреждения

Срыв потока и помпаж различаются по масштабу, но связаны причинно. Локальное ухудшение обтекания уменьшает запас устойчивости. При сочетании малого расхода, высокого противодавления, изменения состава газа и недостаточной реакции противопомпажной защиты режим может перейти в помпаж [4; 7; 8].

Аэродинамическая неустойчивость может иметь конструктивные предпосылки. Увеличенные зазоры, неблагоприятная геометрия лопаточного аппарата и диффузора усиливают перетечки, вторичные течения и рециркуляцию. Следствием являются снижение степени повышения давления, уменьшение коэффициента полезного действия (КПД) и сокращение устойчивого диапазона работы [2; 9, с. 53–60].

Состав рабочей среды влияет на положение рабочей точки и параметры сжатия. Изменение плотности и термодинамических характеристик газа изменяет степень повышения давления, политропический КПД и температуру газа на выходе. При неблагоприятном сочетании этих факторов рабочая точка может смещаться к опасной области карты компрессора [4].

Способ регулирования также влияет на риск отказа. Дросселирование на всасывании и неэффективная рециркуляция уводят агрегат от расчетной рабочей точки, увеличивают удельные энергозатраты и снижают запас до границы помпажа [8].

Загрязнение газа и недостаточная фильтрация относятся к эксплуатационным факторам, способным ухуд-

шать состояние проточной части и вспомогательных систем. Механические частицы, жидкая фаза, продукты коррозии и отложения изменяют условия течения, повышают риск повреждения поверхности и могут ускорять деградацию уплотнений и смазочных узлов [2; 10; 11].

Влага в газе повышает риск коррозии и образования жидкой фазы. При наличии H_2S и других коррозионно-активных компонентов, повышенном давлении и приближении к точке росы конденсация усиливает коррозионное воздействие и риск повреждения поверхности. Для материалов, работающих в H_2S -содержащей среде, критичным является риск коррозионного и сульфидного растрескивания [3, с. 1–11; 5].

Попадание жидкой фазы в проточную часть повышает риск локальных динамических нагрузок и ускоряет повреждение материалов. Коррозионно-активная жидкая фаза снижает сопротивление материала трещинообразованию. Поэтому подготовка газа и контроль влажности относятся к мерам обеспечения механической надежности компрессора [3, с. 1–11; 5; 6, с. 20–29].

На ранней стадии загрязнение и коррозия могут проявляться не ростом вибрации, а снижением напора, падением эффективности, ростом мощности, ухудшением теплового режима и смещением рабочей точки. Поэтому анализ состояния должен учитывать не только динамические признаки, но и эксплуатационные параметры, состав газа, влажность, состояние фильтров и результаты осмотра проточной части [12].

Конструктивные отклонения рабочего колеса и лопаточного аппарата изменяют структуру течения и распределение нагрузок. К таким отклонениям относятся увеличенный зазор по вершинам лопаток, неблагоприятные параметры диффузора и ошибки восстановления профиля при ремонте [2; 9, с. 53–60].

При восстановлении деталей необходимо сохранять исходную геометрию. Воспроизведение рабочего колеса или сопряженных поверхностей по изношенному образцу без проверки профиля может привести к увеличенным зазорам, измененной форме межлопаточных каналов и отклонению посадочных размеров. Такие отклонения меняют картину течения и напряженное состояние детали [9, с. 53–60].

После модернизации, замены рабочего колеса или изменения состава газа прежние эксплуатационные пределы не должны использоваться без проверки. Новая конфигурация может изменить динамическую устойчивость ротора, уровень осевых сил, положение рабочей точки и взаимодействие с присоединенными системами [2; 9, с. 53–60; 12].

Прочностные повреждения рабочих колес и элементов ротора связаны с концентрацией напряжений, циклическим нагружением и накоплением усталостных дефектов. Трещины могут развиваться под действием эксплуатационного режима, дефектов изготовления, сборочных отклонений и агрессивной среды [3, с. 1–11; 6, с. 20–29].

Очаги повреждений формируются на ступице, кромках лопаток, в сварных соединениях и зонах концентрации на-

пряжений. Локальные динамические нагрузки, вибрация и колебания частоты вращения ускоряют рост трещин. Поэтому прочностная оценка должна учитывать не только номинальные статические нагрузки, но и реальные циклические воздействия, коррозионную среду и конструктивные концентраторы напряжений [6, с. 20–29].

Отдельный риск связан с посадкой рабочего колеса на вал. При наличии влажной сероводородной среды, чувствительного материала и высокого напряженного состояния возможно сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением. Чрезмерный натяг посадки и шпоночные пазы увеличивают концентрацию напряжений в зоне посадки [3, с. 1–11; 5].

Усталостное разрушение обычно является результатом совместного действия нескольких факторов: вибрации, нестационарных аэродинамических сил, коррозионной среды, концентрации напряжений, дефектов сборки и недостаточного контроля состояния [3, с. 1–11; 6, с. 20–29].

Дефекты опорной системы и подшипниковых узлов относятся к причинам тяжелых повреждений. Нарушение состояния рабочей поверхности подшипника, рост зазоров, несоосность и дополнительные осевые силы изменяют распределение нагрузок по ротору. При этом возрастает контактное давление и ухудшаются условия формирования масляного клина [1, с. 187–198; 10].

При нарушении масляного клина возникает сухое трение, локальный нагрев и повреждение баббитовой наплавки. Дальнейшее развитие процесса может привести к смещению ротора, задеванию неподвижных деталей и повреждению корпуса компрессора [1, с. 187–198; 10].

Несоосность создает предварительные нагрузки на подшипники и вращающиеся элементы. В результате повышаются контактные напряжения, ускоряется усталостное повреждение и увеличивается вероятность контакта ротора с неподвижными деталями [1, с. 187–198; 7].

Система смазки выполняет защитную функцию для подшипников и ротора. Загрязнение масла, снижение подачи или ухудшение теплоотвода увеличивают трение и ускоряют деградацию опор. После ремонта должны контролироваться фактический расход масла, чистота масла, состояние фильтров, зазоры, центровка и базовый уровень вибрации [10; 12].

Сухие газовые уплотнения и система уплотнительного газа влияют на герметичность, безопасность и устойчивость работы компрессора. Нарушение перепада давления, загрязнение уплотнительного газа, наличие жидкой фазы и попадание масла в линии приводят к повреждению рабочих поверхностей, росту утечек и срабатыванию защиты [10; 11].

Переходные режимы требуют отдельного контроля. При остановленном роторе под давлением, медленном проворачивании и повторных пусках возможно нарушение разделения технологического газа, уплотнительного газа и масла. В этих условиях загрязнение уплотнительного газа может привести к деградации уплотнений даже при исправной механической части [11].

Система управления и защиты относится к факторам, определяющим развитие отказа. Потеря сигналов, сбой датчиков, отказ исполнительных механизмов и некорректная логика противопомпажной защиты могут привести к позднему отводу рабочей точки от опасной области или к ложным защитным действиям [2; 7; 8].

Противопомпажная защита должна учитывать фактическое положение рабочей точки, состав газа, корректность датчиков и быстродействие рециркуляционного клапана. Недостаточная защитная реакция переводит режимное отклонение в механическое повреждение [7; 8].

Отказ компрессора развивается по нескольким повторяющимся сценариям. Если первичным фактором является рабочая среда, то влага, кислые компоненты и загрязнение ухудшают состояние проточной части, ускоряют коррозию и изменяют структуру течения. Далее возрастают вибрационные нагрузки и формируются локальные повреждения рабочего колеса [3, с. 1–11; 5; 6, с. 20–29].

Если исходным фактором является геометрия, увеличенные зазоры, неблагоприятная форма лопаточного аппарата, ошибки ремонта или изменение свойств рабочей среды смещают рабочую точку к неустойчивой области. Это повышает вероятность срыва потока, помпажа, вторичных механических перегрузок, дисбаланса и усталостных повреждений [2; 8; 9, с. 53–60].

Роторно-опорный сценарий связан с дефектами опор, несоосностью, нарушением масляного клина и локальными механическими воздействиями на рабочее колесо. Эти факторы вызывают перераспределение напряжений, сухое трение, нагрев и контакт ротора с неподвижными деталями [1, с. 187–198; 7; 10].

Сценарий, связанный с управлением и вспомогательными системами, включает сбой датчиков, запаздывание защитной реакции, загрязнение уплотнительного газа,

ухудшение состояния масла и нарушение последовательности пуска или останова. Эти факторы не всегда вызывают немедленное разрушение, но создают условия для перехода режимного отклонения в механическое повреждение [7; 8; 11].

Отказ центробежного компрессора в нефтегазовой отрасли формируется под действием взаимосвязанных аэродинамических, механических, материаловедческих, эксплуатационных и управленческих факторов. К основным группам причин относятся аэродинамическая неустойчивость, загрязнение и влага, конструктивно-геометрические отклонения, прочностные и усталостные повреждения, дефекты ротора и опор, нарушения в системе смазки, деградация сухих газовых уплотнений и ошибки управления.

Технически обоснованное объяснение отказа требует установления последовательности: первичный фактор, механизм развития, диагностический признак и конечное повреждение. Такой подход позволяет отделить непосредственное повреждение детали от условий, которые привели к его формированию. Для центробежного компрессора это особенно важно, поскольку один и тот же конечный дефект может быть следствием разных механизмов: помпажа, коррозионного растрескивания, нарушения масляного клина, несоосности или ошибочной работы защитной системы.

Практический вывод состоит в том, что расследование отказа не должно ограничиваться заменой поврежденной детали. Необходимо проверять рабочую среду, положение рабочей точки, состояние проточной части, геометрию восстановленных деталей, роторно-опорную систему, смазку, сухие газовые уплотнения и корректность защитной автоматики. Только комплексная проверка позволяет устранить не только следствие, но и причину отказа.

Литература:

1. Баязитов М. И. Разрушение центробежного компрессора в условиях критического состояния / М. И. Баязитов [и др.] // Нефтегазовое дело. — 2022. — Т. 20, № 6. — С. 187–198. — DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-187-198.
2. API Standard 617. Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors: стандарт. — 9-е изд. — Washington, DC: American Petroleum Institute, 2022. — 348 с.
3. Łagodziński J. Failure Analysis of a Centrifugal Compressor Impeller Made of 17-4PH Steel in the Moist Hydrogen Sulfide Environment / J. Łagodziński, Z. Kozanecki, E. Tkacz // Energies. — 2022. — Т. 15, № 12. — С. 1–11. — DOI: 10.3390/en15124183.
4. Xiao L. Performance Analysis of Natural Gas Centrifugal Compressors Under Hydrogen-Blended Conditions / L. Xiao [и др.] // Processes. — 2025. — Т. 13, № 11. — Ст. 3536. — 19 с. — DOI: 10.3390/pr13113536.
5. ISO 15156-1:2020. Petroleum and natural gas industries — Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production — Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials: стандарт. — Geneva: International Organization for Standardization, 2020.
6. Антипин Н. А. Прочность и трещиностойкость колес центробежных компрессоров / Н. А. Антипин [и др.] // Газовая промышленность. — 2017. — № 11. — С. 20–29.
7. API Standard 670. Machinery Protection Systems: стандарт. — 6-е изд. — Washington, DC: American Petroleum Institute, 2025. — 225 с.
8. Cruickshank J. O. Controlling Centrifugal Compressors / J. O. Cruickshank. — Rotating Machinery Services, 2021. — 8 с. — URL: <https://rotatingmachinery.com/wp-content/uploads/2023/07/Controlling-Centrifugal-Compressors.pdf> (дата обращения: 09.05.2026).

9. Сарманаева А. Ф. Проблемные вопросы и пути их решения при проведении реверс-инжиниринга узлов компрессорных машин / А. Ф. Сарманаева [и др.] // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». — 2024. — Т. 8, № 3. — С. 53–60. — DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-53-60.
10. API Standard 614. Lubrication, Shaft-sealing, and Oil Control Systems and Auxiliaries: стандарт. — 6-е изд. — Washington, DC: American Petroleum Institute, 2022. — 246 с.
11. API Standard 692. Dry Gas Sealing Systems for Axial, Centrifugal, and Rotary Screw Compressors and Expanders: стандарт. — 1-е изд. — Washington, DC: American Petroleum Institute, 2018. — 258 с.
12. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines: стандарт. — Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

Система обнаружения металлических объектов

Кристобаль Освальдо Альварес, студент магистратуры
МИРЭА — Российский технологический университет (г. Москва)

Научный руководитель: Мошкин Владимир Валентинович, кандидат технических наук, доцент
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики

В статье рассматривается система обнаружения металлических объектов с регистрацией координат в глобальной навигационной спутниковой системе и беспроводной связью измерительного блока с компьютером оператора.

Ключевые слова: металлодетектор, импульсная индукция, глобальная навигационная спутниковая система, беспроводная связь.

Задача обнаружения металлических предметов актуальна в различных областях деятельности человека: в горнодобывающей промышленности для защиты дорогостоящего оборудования от повреждений металлическими включениями в руде; на пищевых и обрабатывающих предприятиях для предотвращения попадания металлических фрагментов и стружки в готовую продукцию; на охраняемых объектах для обнаружения запрещенных вещей на людях и в багаже. Широко распространены поисковые металлодетекторы для обнаружения металлических предметов в приповерхностном слое земли в археологии и расчистке территории, например, для земледелия.

В работе рассмотрена система обнаружения металлических объектов при сканировании поверхности земли. К разработке предъявлялись следующие основные требования:

- использование совместно с беспилотным летательным аппаратом;
- определение и регистрация координат обнаруженных металлических предметов в глобальной навигационной спутниковой системе;
- беспроводная передача данных на компьютер оператора.

Структурная схема системы обнаружения показана на рис. 1.

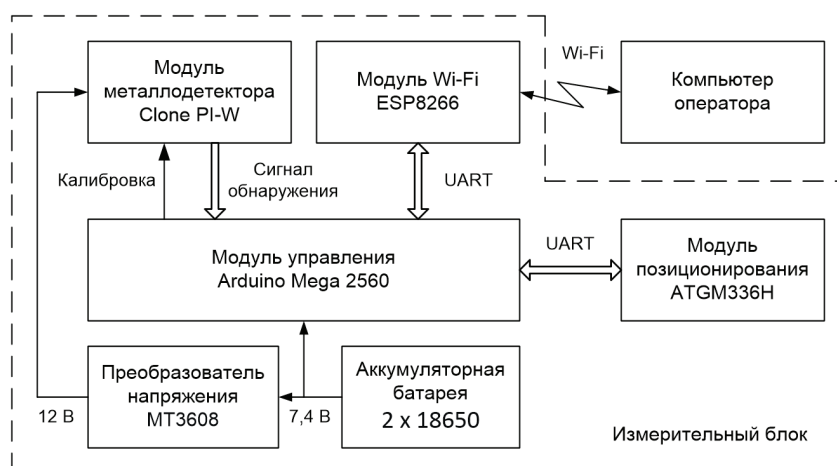


Рис. 1. Структурная схема системы обнаружения металлических объектов

На рис. 2 показаны компоненты измерительного блока системы, а на рис. 3 — измерительный блок в сборе.

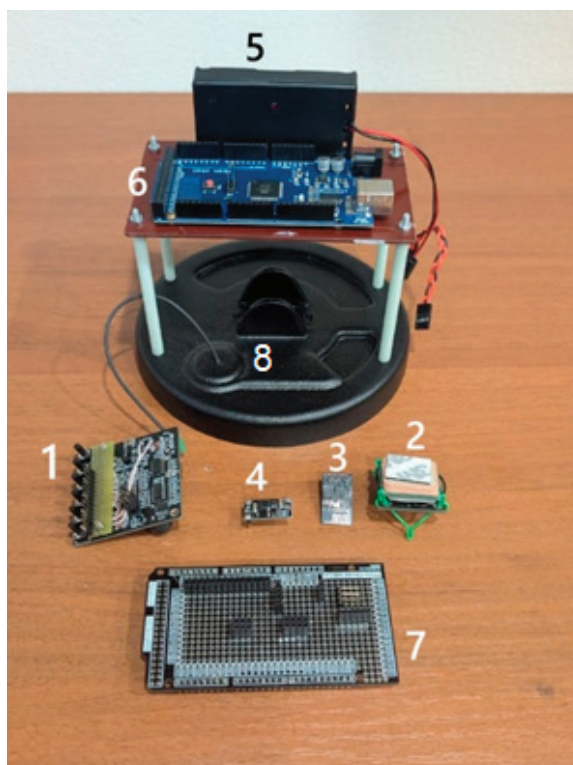


Рис. 2. Компоненты измерительного блока

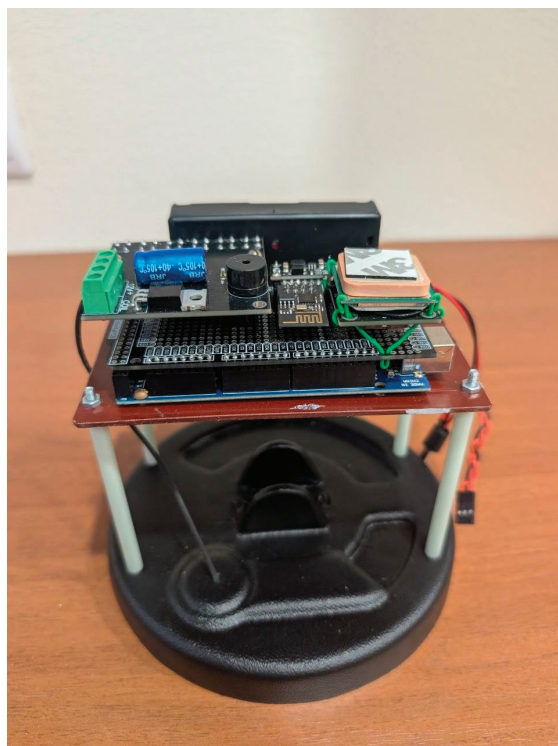


Рис. 3. Измерительный блок в сборе

На рис. 2 цифрами отмечены следующие компоненты измерительного блока: 1 — модуль металлодетектора; 2 — модуль позиционирования; 3 — модуль Wi-Fi; 4 — преобразователь напряжения; 5 — аккумуляторная батарея; 6 — модуль управления; 7 — монтажная плата; 8 — поисковая катушка металлоискателя.

На рис. 4 показано крепление измерительного блока к квадрокоптеру.

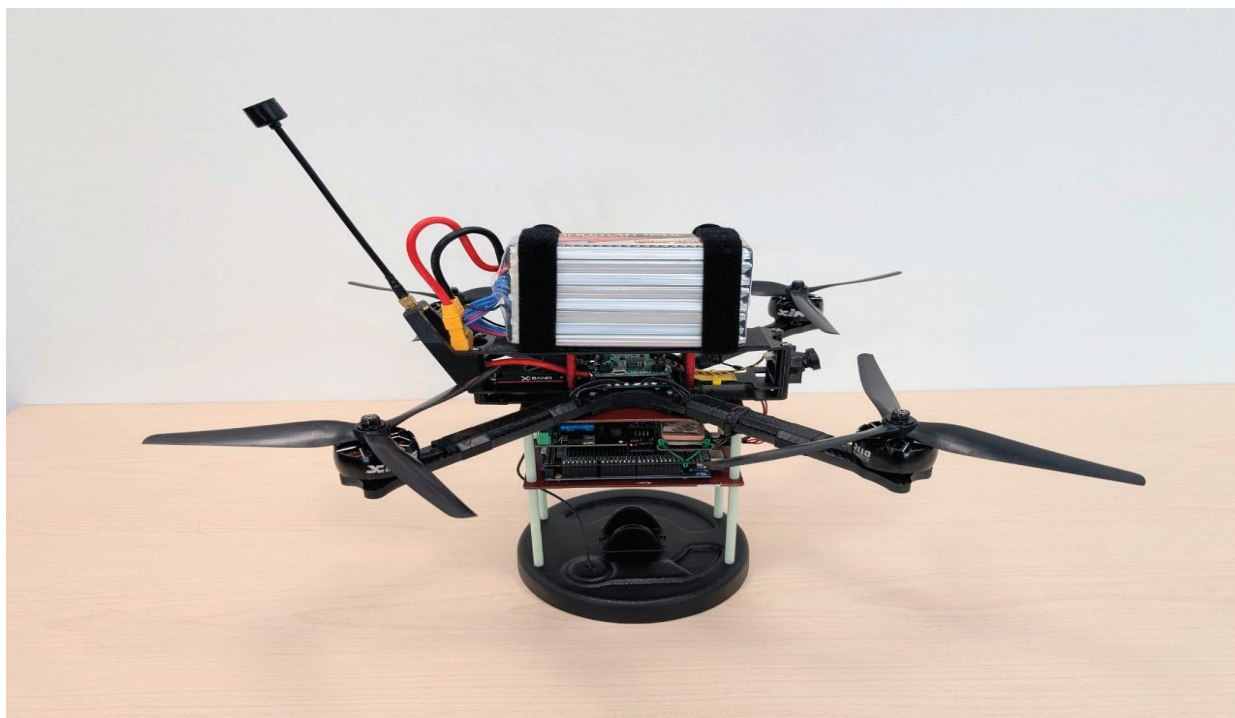


Рис. 4. Крепление измерительного блока к квадрокоптеру

В составе измерительного блока использован металлодетектор, работающий на основе метода импульсной индукции (Pulse Induction, PI) [1]. В этом методе поисковая катушка излучает короткие электромагнитные импульсы прямоугольной формы. После окончания возбуждающего импульса в результате самоиндукции в катушке возникают затухающие электромагнитные колебания, параметры которых в отсутствие металлических предметов запоминаются как эталонные. В металлических предметах зондирующий электромагнитный импульс наводит вихревой ток, поле которого изменяет форму и время затухания колебаний в катушке. На сравнении этого сигнала с эталонным основана работа импульсного металлодетектора.

Использованный в работе металлодетектор типа Clone PI-W выполнен на основе микроконтроллера ATmega8 [2]. При включении, а также при перезапуске микроконтроллера выполняется калибровка устройства, при которой поисковая катушка должна быть максимально удалена от металлических предметов. Сигнал обнаружения передается в модуль управления по проводной параллельной шине. Поисковая катушка была изготовлена из медного изолированного провода диаметром 0,4 мм и имеет 31 виток диаметром 15 см.

Для определения и регистрации географического положения обнаруженных металлических предметов использован навигационный модуль ATGM336H [3], позволяющий определять координаты по широте, долготе и высоте. Дополнительно этот модуль определяет текущую дату и время, а также скорость и направление движения. Модуль может одновременно работать со спутниками трех навигационных систем: GPS (США), Глонасс (Россия) и Beidou (Китай). При подаче питания навигационный модуль ищет доступные спутники и фиксирует начальную позицию с частотой 1 Гц. После первоначального определения координат скорость обновления может увеличиваться до 10 Гц. Модуль обрабатывает полученную информацию и передает данные в модуль управления по интерфейсу UART в виде текстовых сообщений в формате протокола NMEA 0183. Паспортная точность позиционирования модуля ATGM336H составляет около 2 м [3]. Для повышения точности определения координат существуют методы дифференциальной коррекции — кинематика в реальном времени (Real Time Kinematic, RTK) и кинематика в постобработке (Post Processing Kinematic, PPK), которые применяются в геодезии и картографии для повышения точности позиционирования в глобальной навигационной спутниковой системе до 2–3 см [4].

Беспроводная передача данных от измерительного блока к компьютеру оператору осуществляется модулем Wi-Fi ESP8266 [5]. Модуль работает в режиме точки доступа (AP) и создает собственную сеть Wi-Fi, к которой непосредственно подключается компьютер оператора. Установка режима работы модуля Wi-Fi, а также информационный обмен с модулем управления осуществляется по интерфейсу UART посредством выполнения стандартных AT-команд в программе модуля управления.

В качестве модуля управления выбрана плата Arduino Mega 2560 [6], имеющая четыре независимых аппаратных модулей UART, два из которых необходимы для взаимодействия с модулями ATGM336H (GPS/GLONAS/BeiDou) и ESP8266 (Wi-Fi), а третий — для программирования модуля управления. Модуль управления выполняет конфигурирование мо-

дулей измерительного блока, а также формирует информационное сообщение, которое с помощью модуля Wi-Fi по протоколу UDP пересылается в компьютер оператора для обработки и регистрации. По каналу обратной связи оператор может передать на модуль управления сигнал перезапуска металлодетектора для выполнения его калибровки.

Питание измерительного блока осуществляется от аккумуляторной батареи, состоящей из двух включенных последовательно элементов типа 18650. Напряжение питания 7,4 V подается непосредственно на модуль управления, в котором формируются питающие напряжения для модулей ATGM336H и ESP8266. Для питания модуля металлоискателя Clone PI-W напряжение аккумуляторной батареи с помощью повышающего преобразователя напряжения типа MT3608 увеличивается до 12 V.

Информационное сообщение поступает в компьютер оператора по каналу Wi-Fi в текстовом формате и имеет следующую структуру:

<Широта> <Долгота> <Время> <Дата> <Уровень>

Анализ, отображение и регистрация данных в компьютере оператора выполняется прикладной программой, разработанной в среде графического программирования LabVIEW. Интерфейс этой программы показан на рис. 5.

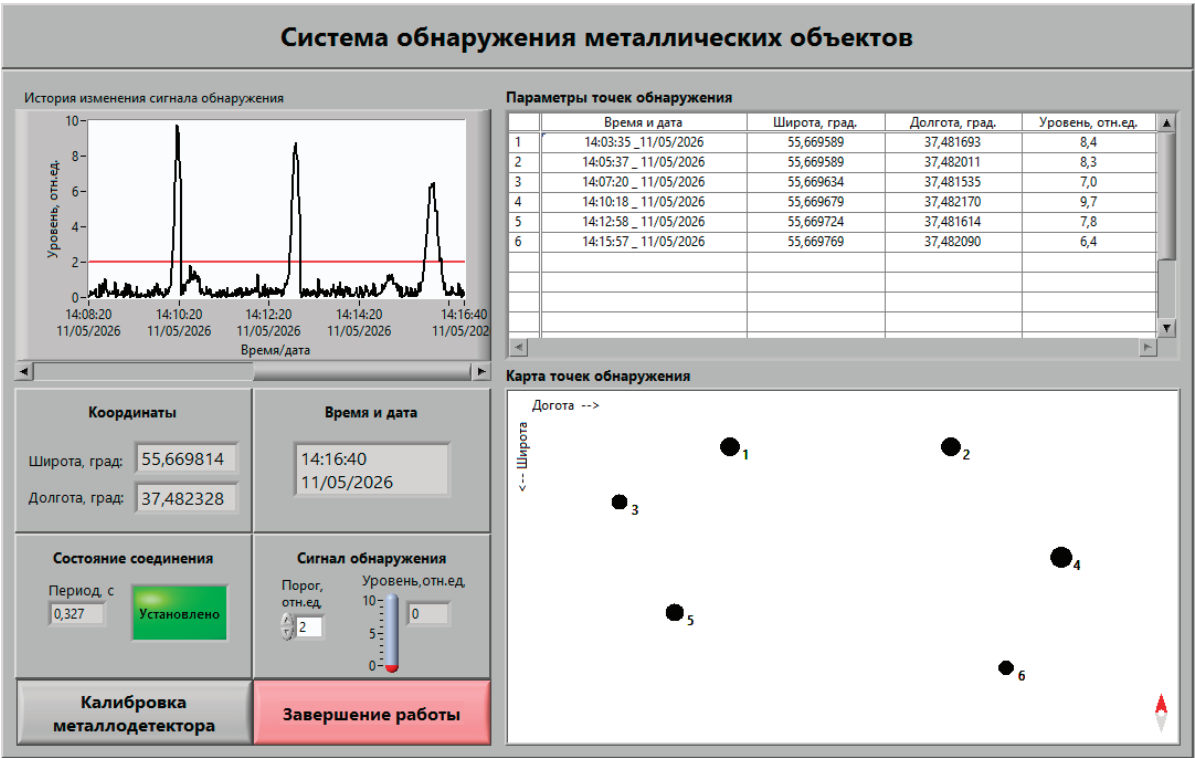


Рис. 5. Интерфейс прикладной программы

На графическом индикаторе «История изменения сигнала обнаружения» отображается изменение уровня сигнала обнаружения от времени. Индикатор имеет горизонтальную полосу прокрутки для просмотра сигнала обнаружения на всем интервале времени работы системы.

Значения широты и долготы расположения измерительного блока на местности, текущее время и дата проведения измерений, и уровень сигнала обнаружения отображаются на цифровых индикаторах, соответственно, в полях «Координаты», «Время и дата», «Сигнал обнаружения».

В области «Состояние соединения» на цифровой индикатор выводится значение периода поступления измерительных данных в компьютер оператора, а на панели зеленого цвета отображается надпись «Установлено». При значениях этого периода более 2 с панель окрашивается в красный цвет и выводится надпись «Разорвано».

По экстремальным значениям сигнала обнаружения идентифицируются точки обнаружения и соответствующие им значения времени, даты, широты, долготы и уровня сигнала заносятся в таблицу «Параметры точек обнаружения». На графический индикатор «Карта точек обнаружения» выводятся кружки, диаметр которых пропорционален уровню сигнала обнаружения. Около кружков отображаются номера точек обнаружения. На цифровом элементе управления в поле «Сигнал обнаружения» оператор может задать пороговое значение сигнала обнаружения, отображаемое на графике «История изменения сигнала обнаружения» в виде горизонтальной линии красного цвета.

Для выполнения калибровки металлодетектора служит кнопка «Калибровка металлодетектора». При нажатии кнопки «Завершение работы» данные из таблицы «Параметры точек обнаружения» и изображение индикатора «Карта точек обнаружения» сохраняются в файл, а выполнение программы прекращается.

Измерение дистанции обнаружения, обеспечиваемой измерительным блоком, проводилось в лабораторных условиях для металлических объектов разного размера. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Дистанция обнаружения металлических объектов

Тип и размеры металлического объекта	Дистанция обнаружения, см
Монета 5 руб.	10
Латунный цилиндр Ø 16 мм x 26 мм	11
Латунный цилиндр Ø 12 мм x 100 мм	15
Алюминиевый параллелепипед 50 мм x 25 мм x 25 мм	15
Алюминиевый цилиндр Ø 18 мм x 170 мм	16
Стальной параллелепипед 37 мм x 26 мм x 13 мм	17
Стальной диск Ø 120 мм x 30 мм	30

Масса измерительного блока с элементами крепления составила около 360 гр. Согласно классификации Международной ассоциации по беспилотным летательным системам (Association for Unmanned Vehicle Systems International — UVSИ) для применения разработанного устройства могут быть использованы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), относящиеся к группе малых БПЛА, категории микро БПЛА с взлетной массой до 5 кг [7].

Литература:

1. Адаменко, М. В. Металлоискатели / М. В. Адаменко. — М: ДМК Пресс, 2008. — 128 с. — ISBN 5–9706–0022–9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/881> (дата обращения: 11.05.2026).
2. Металлоискатель Clone PI-W. — Текст: электронный — URL: <https://radio-magic.ru/metalloiskateli/169-clone-pi> (дата обращения: 11.05.2026).
3. GPS/GLONASS модуль (Trema-модуль). — Текст: электронный // IARDUINO: [сайт]. — URL: <https://iarduino.ru/shop/Expansion-payments/gps-glonass-modul-trema-modul.html> (дата обращения: 11.05.2026).
4. Липанов И. Д., Хомоненко А. Д., Молодкин И. А. Сравнительный анализ методов точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2025. № 1 (41). С. 27–36. DOI: 10.20295/2413–2527–2025–141–27–36.
5. Wi-Fi модуль ESP8266 (ESP-01). — Текст: электронный // IARDUINO: [сайт]. — URL: <https://iarduino.ru/shop/Expansion-payments/esp8266-serial-wifi.html> (дата обращения: 11.05.2026).
6. Arduino Mega 2560 R3 (USB CH340). — Текст: электронный // IARDUINO: [сайт]. — URL: <https://iarduino.ru/shop/boards/dccduino-mega-2560-rev3-na-ch340g.html> (дата обращения: 11.05.2026).
7. Классификация БПЛА по летным характеристикам. — Текст: электронный — URL: <https://docs.geoscan.ru/pioneer/database/const-module/classification/classification.html> (дата обращения: 11.05.2026).

Оптимизация процессов гидродинамического исследования нефтяных скважин на основе компьютерного моделирования

Мухаммедова Джерен Чарыевна, старший преподаватель;

Дурдымырадова Энеджан, преподаватель

Международный университет нефти и газа имени Ягшигельды Какаева (г. Ашхабад, Туркменистан)

В данной статье рассматриваются современные методы применения компьютерного моделирования для оптимизации процедур испытаний нефтяных скважин. Исследуются методы использования специализированных программных пакетов для моделирования процессов фильтрации, цифрового анализа характеристик пласта и интерпретации результатов гидродинамических испытаний. Особое внимание уделяется повышению точности определения характери-

стик фильтрационной способности продуктивных пластов, прогнозированию поведения пласта и снижению технологических рисков во время эксплуатации месторождения. Проводится анализ влияния математического моделирования на способность нефтегазовой отрасли эффективно интерпретировать геологические и производственные данные и принимать инженерные решения.

Ключевые слова: гидродинамические исследования, нефтяные скважины, компьютерное моделирование, фильтрационные процессы, нефтегазовая отрасль, цифровые технологии, математическое моделирование, разработка месторождений, анализ данных, гидродинамика пласта.

В соответствии с современным развитием нефтегазовой отрасли активно внедряются цифровые технологии и интеллектуальные системы анализа производственных процессов. Оптимизация испытаний скважин, предоставляющая данные о характеристиках пласта продуктивных формаций, режимах работы скважин и параметрах потока флюидов в пористых средах, является одним из важнейших направлений повышения нефтеотдачи. Поскольку испытания скважин позволяют оценивать динамику добычи, определять пластовые условия и принимать обоснованные инженерные решения, они имеют важное значение для разработки нефтяных месторождений [1].

Традиционные методы обработки результатов исследований становятся все более неэффективными в связи с растущим объемом геологических и производственных данных, увеличением глубины бурения и сложностью геологической структуры месторождений. Для обеспечения высокоточной обработки данных и возможности всестороннего изучения поведения пластовых систем это требует применения современных компьютерных технологий и математических моделей [2]. С помощью компьютерного моделирования можно оценить влияние различных элементов на производительность скважин, оптимизировать режимы разработки месторождений и моделировать процессы фильтрации нефти, газа и воды в продуктивных формациях.

Необходимость повышения эффективности добычи нефти, снижения финансовых затрат и устранения технологических опасностей при эксплуатации нефтяных месторождений делает данное исследование актуальным. Качество гидродинамических исследований повышается за счет использования цифровых моделей и автоматизированных методов обработки данных, которые также обеспечивают более точную интерпретацию результатов полевых испытаний [3].

Теоретические основы гидродинамических исследований нефтяных скважин

Совокупность методов исследования потока пластовых флюидов в пористых средах во время эксплуатации нефтяных и газовых скважин известна как гидродинамические исследования. Основная цель этих исследований — определение параметров пласта, таких как проницаемость, продуктивность, пластовое давление и уровень гидродинамической связи между различными участками пласта [4].

Теоретической основой гидродинамических исследований служат правила фильтрации жидкости и газа в пористых средах. Наиболее популярным законом является закон Дарси, объясняющий линейную зависимость между скоростью фильтрации и градиентом давления. Нестационарные процессы фильтрации имеют решающее значение на протяжении всего роста месторождения, что требует применения сложных математических моделей и численных методов решения дифференциальных уравнений [5].

Появление устройств для регистрации давления и расхода в реальном времени связано с развитием методов гидродинамических исследований. Точность анализа пластовых процессов значительно повышается благодаря непрерывному сбору данных о работе скважин, что стало возможным благодаря современным датчикам и цифровым системам мониторинга [6]. Однако обработка и интерпретация больших объемов данных требует использования специализированного программного обеспечения и высокопроизводительных вычислительных систем.

Компьютерное моделирование процессов фильтрации

Одним из лучших методов исследования гидродинамической динамики в нефтяных пластах является компьютерное моделирование. Мы можем воспроизвести реальные условия разработки месторождения и спрогнозировать поведение пласта при различных параметрах эксплуатации, используя математические модели [7].

Многокомпонентные потоки нефти, газа и воды в неоднородных пластах могут быть смоделированы с помощью современных программных средств, учитывающих геологические характеристики месторождения. Мы можем решать сложные гидродинамические задачи пласта и находить идеальные параметры работы скважины, используя численные методы, основанные на алгоритмах конечных разностей и конечных элементов [8].

Особенно важно моделировать изменения пластового давления при эксплуатации пласта. Мы можем прогнозировать изменения дебита скважины, выявлять зоны истощения пласта и оценивать эффективность систем поддержания пластового давления с помощью анализа распределения давления. Цифровые модели значительно повышают точность оценок остаточных запасов углеводородов и упрощают логическое управление процессами добычи нефти [9].

В современном мире широко используются инструменты трехмерного гидродинамического моделирования.

Тщательное изучение геологической структуры водохранилища, пространственного распределения его характеристик и динамики процессов фильтрации становится возможным благодаря разработке цифровых полевых моделей. Интеграция гидродинамической модели с географическими информационными системами повышает качество интерпретации полевых данных и упрощает принятие инженерных решений [10].

Заключение

Таким образом, важнейшим направлением развития в современном нефтегазовом секторе является оптимизация процедур испытания нефтяных скважин с помощью компьютерного моделирования. Точность исследований пластов и эффективность разработки нефтяных месторождений повышаются за счет применения цифровых технологий, математических моделей и интеллектуальных систем анализа данных.

Комплексный анализ процесса фильтрации, прогнозирование параметров пласта и оптимизация режимов работы скважин становятся возможными благодаря современным методам компьютерного моделирования. Результаты исследований становятся более надежными, а производственные риски снижаются при интеграции гидродинамических моделей с автоматизированными системами мониторинга.

Появление цифровых двойников, высокопроизводительных вычислительных систем и технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности для гидродинамических испытаний. Инновационные методы анализа данных могут помочь повысить эффективность добычи нефти, рационально использовать природные ресурсы и произвести революцию в нефтегазовом секторе в цифровом формате.

Появление цифровых двойников, высокопроизводительных вычислительных систем и технологий искусственного интеллекта открывает новые возможности для гидродинамических испытаний. Инновационные методы анализа данных могут помочь повысить эффективность добычи нефти, рационально использовать природные ресурсы и произвести революцию в нефтегазовом секторе в цифровом формате.

Литература:

1. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. — М.: Недра, 2010.
2. Бурде А. Основы гидродинамических исследований скважин. — М.: Институт компьютерных исследований, 2012.
3. Earlougher R. Advances in Well Test Analysis. — Society of Petroleum Engineers, 1977.
4. Matthews C., Russell D. Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. — SPE, 1967.
5. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств пород. — М.: Недра, 1985.
6. Ahmed T. Reservoir Engineering Handbook. — Gulf Professional Publishing, 2019.
7. Peaceman D. Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation. — Elsevier, 2000.
8. Aziz K., Settari A. Petroleum Reservoir Simulation. — Applied Science Publishers, 1979.
9. Lake L. Enhanced Oil Recovery. — Prentice Hall, 1989.
10. Ertekin T., Abou-Kassem J., King G. Basic Applied Reservoir Simulation. — SPE Textbook Series, 2001.

Изменение фильтрационных свойств песчаных грунтов при загрязнении нефтепродуктами

Панькова Ангелина Михайловна, студент магистратуры
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Приведен обзор статей отечественных и зарубежных исследователей на влияние коэффициента фильтрации песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, при взаимодействии с различными видами грунтов и нефтепродуктами. По полученным данным было проведено сравнение результатов теоретического анализа с результатами лабораторных испытаний и экспериментально зафиксировано влияние гранулометрического состава песчаного грунта при взаимодействии с нефтепродуктом на фильтрационные свойства грунта. Загрязнение образцов было получено путем добавления в песчаный грунт различной крупности дизельного топлива в концентрации 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % и 12 %. Зафиксировано снижение коэффициента фильтрации при увеличении концентрации загрязняющего вещества.

Ключевые слова: *песчаный грунт, нефть, дизельное топливо, концентрация, коэффициент фильтрации, агрегирование, диспергирование, поровое пространство.*

Введение

Результатами разлива нефти могут служить аварийные ситуации при эксплуатации сооружений, добычи, хранении или транспортировке. Распространение нефтепродуктов в результате разлива происходит по поверхности земли

с испарением летучих компонентов нефтепродуктов при дальнейшем просачивании в глубь грунта под действием силы гравитации [1]. В поровое пространство попадает загрязняющее вещество, которое приводит к негативному влиянию на механические и физические характеристики грунта. Скорость проникновения в глубь грунта нефте-

продуктов зависит от свойств загрязняющих веществ, типа грунта, гранулометрического состава, концентрации загрязнения и времени [2]. Нефть является одним из самых распространенных веществ, загрязняющих окружающую среду [3]. Целью статьи является определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов различной крупности, загрязненных дизельным топливом.

Объект исследования: пески крупной, средней и мелкой фракции, загрязненные дизельным топливом.

Предмет исследования: изменение фильтрационных свойств песчаного грунта, загрязненного дизельным топливом.

Методы исследования

Были проанализированы научные исследования отечественных и зарубежных авторов на тему изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении их нефтепродуктами различной концентрации. Проведены лабораторные испытания по определению коэффициента фильтрации в песчаных грунтах различной крупности при загрязнении их нефтепродуктами различной концентрации согласно ГОСТ 25584–2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации». Проведены лабораторные исследования по определению изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при помощи ситового метода, сита с размерами ячейки 0,5; 0,25; 0,1 мм согласно ГОСТ 12536–2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Адаптированы аналитические формулы Хазена, Заумбрея, Слихтера для расчета коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении их нефтепродуктами различной концентрации.

Результаты

Определение коэффициента фильтрации в загрязненных грунтах является важной составляющей для про-

гнозирования осадок во времени и изменении несущей способности основания фундаментов. Поэтому необходимо понять, как загрязнение песчаных грунтов различными видами нефтепродуктов влияет на гранулометрический состав песчаных грунтов и их фильтрационные свойства. Автор [3] в своем лабораторном исследовании подтвердил, что при загрязнении нефтепродуктами происходило агрегирование частиц грунта, то есть изменение гранулометрического состава, наблюдалось уменьшение порового пространства с вытеснением из грунта воды. Автор [4] говорит, что коэффициент фильтрации загрязненного грунта снизился. При загрязнении нефтью частицы агрегируют, некоторое поровое пространство заполняется нефтью и количество пор уменьшается, доступных для прохождения воды. В исследовании авторов [2] рассматривали действие нефти на песчаный грунт в концентрациях 4, 8, 12 %. Было обнаружено, что при загрязнении нефтью происходит агрегирование песчаных фракций, а также изменение шероховатости поверхности песчинок грунта. При увеличении концентрации нефтепродукта в грунте происходит увеличение контактов между частичками, а также заполнение больших пор в песчаном грунте, приводящее к снижению коэффициента фильтрации на 20–80 %. Зависимость от увеличения количества нефтепродуктов к коэффициенту фильтрации песчаных грунтов показана на рис. 1:

Было выполнено исследование изменения гранулометрического состава песчаных монофракционных грунтов крупной, средней и мелкой фракции при загрязнении их дизельным топливом в концентрациях 2 %, 6 % и 12 % в воздушно-сухом состоянии. В результате исследования была подтверждена гипотеза о процессе агрегирования и диспергирования. Результаты изменения гранулометрического состава показана в таблице 1.

При загрязнении крупного песка дизелем с концентрацией 2 % содержание крупной фракции снижается на 5 %, что доказывает процесс диспергирования. Средняя фракция при загрязнении 2 % произошло агрегиро-



Рис. 1. Зависимость от увеличения количества нефтепродуктов к коэффициенту фильтрации песчаных грунтов [2]

Таблица 1. Результаты изменения гранулометрического состава

	Крупная фракция	Средняя фракция	Мелкая фракция	Пылеватая фракция
Концентрация загрязнения 2 %				
песок крупный				
До загрязнения	100	-	-	-
После загрязнения	94,92 г	5,08 г	-	-
песок средней крупности				
До загрязнения	-	100	-	-
После загрязнения	9,08 г	79,70 г	11,22 г	-
песок мелкой крупности				
До загрязнения	-	-	100	-
После загрязнения	-	6,41 г	86,44 г	3,28 г
Концентрация загрязнения 6 %				
песок крупный				
До загрязнения	100	-	-	-
После загрязнения	99,08 г	0,92 г	-	-
песок средней крупности				
До загрязнения	-	100	-	-
После загрязнения	9,00 г	80,34 г	10,66 г	-
песок мелкой крупности				
До загрязнения	-	-	100	-
После загрязнения	-	11,37 г	83,39 г	3,28 г
Концентрация загрязнения 12 %				
песок крупный				
До загрязнения	100	-	-	-
После загрязнения	99,34 г	0,66 г	-	-
песок средней крупности				
До загрязнения	-	100	-	-
После загрязнения	11,38 г	83,68 г	4,94 г	-
песок мелкой крупности				
До загрязнения	-	-	100	-
После загрязнения	-	13,45 г	85,04 г	1,51 г

вание от массы навески на ~9 г и диспергирование ~11 г. Мелкая фракция при загрязнении 2 % так же подверглась как агрегированию, так и диспергированию. Увеличение фракции произошло на 4 %, уменьшение фракции произошло на 6 %.

При загрязнении крупного песка дизелем с концентрацией 6 % содержание крупной фракции снижается на 1 %, что доказывает процесс диспергирования. Средняя фракция при загрязнении 6 % так же произошло агрегирование от массы навески на ~9 г и диспергирование ~11 г. Мелкая фракция при загрязнении 6 % так же подверглась как агрегированию, так и диспергированию. Увеличение фракции произошло на 11 % и уменьшение фракции произошло на 3 %.

При загрязнении крупного песка дизелем с концентрацией 12 % содержание крупной фракции снижается на 1 %, что доказывает процесс диспергирования. Средняя фракция при загрязнении 12 % так же произошло агрегирование от массы навески на ~14 г и диспергирование ~1,5 г. Мелкая фракция при загрязнении 12 % подверглась только агрегированию. Увеличение фракции произошло на 96 %.

Изменение коэффициента фильтрации было определено для песчаных грунтов различной фракции при загрязнении дизельным топливом в концентрации 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %, в плотном и рыхлом сложении. Испытание проводилось по ГОСТ 25584–2016 с гидравлическим градиентом $I=1$. Зависимость коэффициента фильтрации песчаного грунта различной крупности от концентрации дизельного топлива представлена в таблице 2.

По полученным данным лабораторных испытаний можно сделать вывод, что с увеличением концентрации дизельного топлива в песке крупной, средней и мелкой фракции наблюдается снижение коэффициента фильтрации в плотном и рыхлом сложении. Коэффициент фильтрации в плотном сложении меньше, чем в рыхлом при одинаковых значениях концентрации дизеля. Коэффициента фильтрации крупной и средней фракции при концентрации 2 % в рыхлом сложении снижается на 43 %, в плотном сложении коэффициент фильтрации у крупной фракции снизился на 39 %, у средней 15 %, у мелкой 12 %, фильтрация у мелкой фракции в рыхлом сложении снижается на 16 %. Графики зависимости коэффициента фильтрации от дизеля показаны на рис. 2.

Таблица 2. Зависимость коэффициента фильтрации (см/с) песчаного грунта крупной, средней и мелкой фракции от концентрации дизельного топлива

№ п/п	Плотность образца и фракция грунта	Концентрация дизеля, %						
		0	2	4	6	8	10	12
1	Предельно рыхлое сухое, крупная фракция	0,419	0,182	0,098	0,039	0,012	0,004	0,003
2	Предельно плотное сухое, крупная фракция	0,236	0,091	0,041	0,025	0,014	0,003	0,0027
3	Предельно рыхлое сухое, средняя фракция	0,258	0,102	0,040	0,024	0,018	0,012	0,008
4	Предельно плотное сухое, средняя фракция	0,122	0,018	0,006	0,003	0,0016	0,0015	0,0015
5	Предельно рыхлое сухое, мелка фракция	0,123	0,020	0,011	0,009	0,007	0,007	0,007
6	Предельно плотное сухое, мелкая фракция	0,072	0,009	0,003	0,001	0,001	0,0005	0,0004

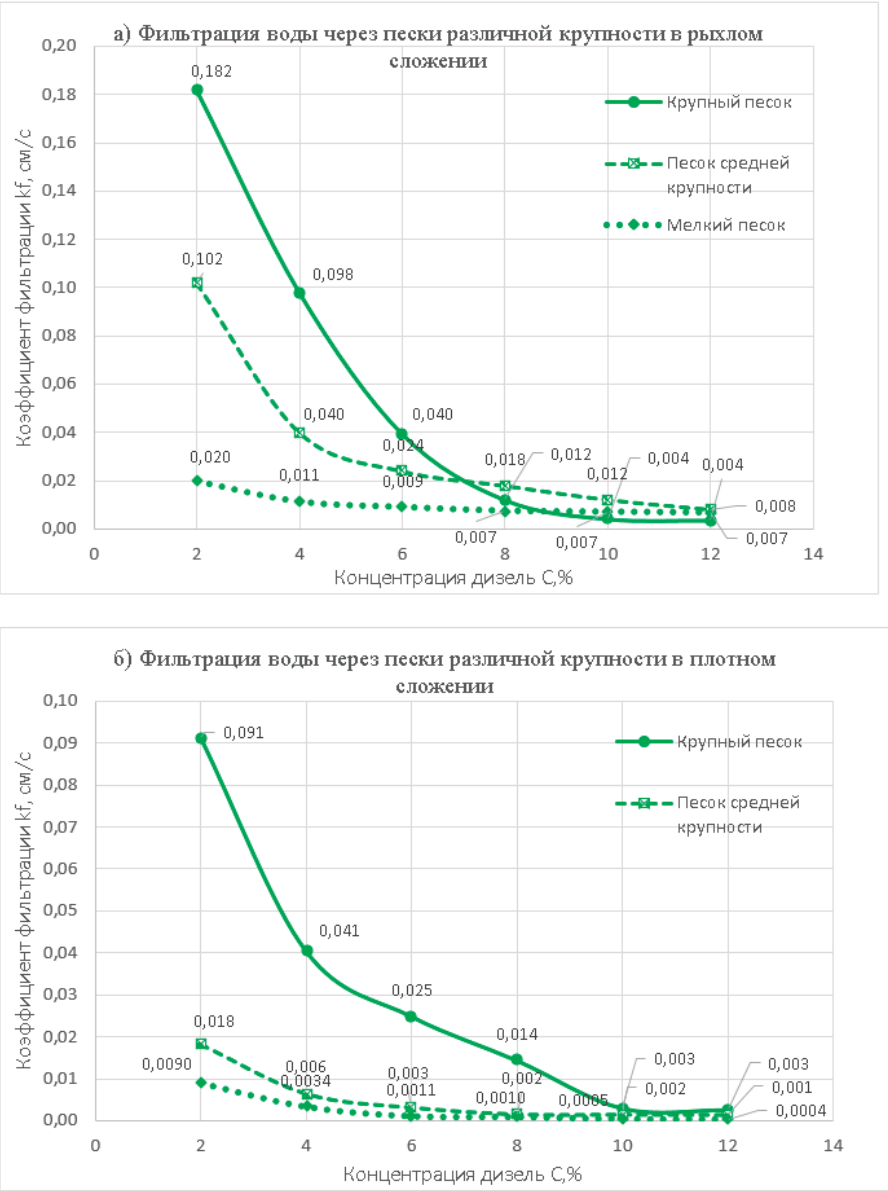


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента фильтрации k_f (см/с) от концентрации дизеля (%): а — песок крупной, средней и мелкой фракции в рыхлом сложении; б — песок крупной, средней и мелкой фракции в плотном сложении

Адаптированы аналитические формулы Хазена, Заумбрея, Слихтера для расчета коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении их дизелем при концентрации 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %. Форма кривой коэффициента фильтрации k_f (см/с) от концентрации дизеля (%) указывает на экспоненциальную зависимость. Аналитические формулы были посчитаны на основе коэффициента фильтрации, полученные путем лабораторных испытаний. Общий вид формулы Хазена будет выглядеть следующим образом:

$$k_f = c d_{\text{эф}}^2 e^{-\omega c} + \kappa, \quad (1)$$

где c — эмпирический коэффициент «чистоты и однородности» песков, принимаемый для загрязненных пеков крупной фракции равным 800, песков средней и мелкой фракции равным 400; $d_{\text{эф}}$ — диаметр частиц (%); ω — параметр экспоненты, отвечающий за «кривизну» функции; c — концентрация нефтепродукта, (%); κ — коэффициент отношения чистого коэффициента фильтрации к загрязненному коэффициенту фильтрации при $c=0$ %.

Общий вид формулы Зауэрбрея будет выглядеть следующим образом:

$$k_f = \beta d_{\text{эф}}^2 \frac{n^3}{(1-n)^2} e^{-\omega c} + \kappa, \quad (2)$$

где β — эмпирический коэффициент, зависящий от крупности и однородности грунта; $d_{\text{эф}}$ — диаметр частиц (мм); n — пористость грунта (д.е.); c — концентрация нефтепродукта, (%); ω — параметр экспоненты, отвечающий за «кривизну» функции; κ — коэффициент отношения чистого коэффициента фильтрации к загрязненному коэффициенту фильтрации при $c=0$ %.

Общий вид формулы Слихтера будет выглядеть следующим образом:

$$k_f = 88,3 d_{\text{эф}}^2 \frac{m}{\mu} e^{-\omega c} + \kappa, \quad (3)$$

$d_{\text{эф}}$ — диаметр частиц (мм); m — коэффициент, зависящий от пористости; c — концентрация нефтепродукта, (%); μ — коэффициент вязкости, зависящий от температуры воды; ω — параметр экспоненты, отвечающий за «кривизну» функции; κ — коэффициент отношения чистого коэффициента фильтрации к загрязненному коэффициенту фильтрации при $c=0$ %.

Параметр экспоненты, отвечающий за «кривизну» функции был определен путем логарифмической функции от процента концентрации дизельного топлива. Коэффициент отношения чистого коэффициента фильтрации к загрязненному коэффициенту фильтрации при $c=0$ % был определен для песков крупной, средней и мелкой фракции в плотном и рыхлом сложении, представлен в таблице 3.

Графики зависимости коэффициента фильтрации песчаных грунтов в рыхлом сложении от концентрации дизеля, посчитанные при помощи аналитических формул Хазена, Заумбрея, Слихтера, показаны на рисунке 3. По построенным графикам от результатов, полученных лабораторными испытаниями, с результатами, посчитанные при помощи формул, видно, что максимальное отклонение при загрязнении дизельным топливом в концентрации 4 % для крупного песка в рыхлом сложении составляет 21 %, песка средней крупности в концентрации 4 % дизельного топлива — 27,5 %, песка мелкой фракции в концентрации 2 % дизельного топлива — 10 %.

Графики зависимости коэффициента фильтрации песчаных грунтов в плотном сложении от концентрации дизеля, посчитанные при помощи аналитических формул Хазена, Заумбрея, Слихтера, показаны на рисунке 4. По построенным графикам от результатов, полученных лабо-

Таблица 3

№ п/п	Плотность образца и фракция грунта	κ
1	Предельно рыхлое сухое, крупная фракция, формула Хазена	1,17
2	Предельно рыхлое сухое, средняя фракция, формула Хазена	2,88
3	Предельно рыхлое сухое, мелкая фракция, формула Хазена	8,57
4	Предельно плотное сухое, крупная фракция, формула Хазена	0,66
5	Предельно плотное сухое, средняя фракция, формула Хазена	1,36
6	Предельно плотное сухое, мелкая фракция, формула Хазена	5,02
1	Предельно рыхлое сухое, крупная фракция, формула Заумбрея	1,4
2	Предельно рыхлое сухое, средняя фракция, формула Заумбрея	1,7
3	Предельно рыхлое сухое, мелкая фракция, формула Заумбрея	4,8
4	Предельно плотное сухое, крупная фракция, формула Заумбрея	3,1
5	Предельно плотное сухое, средняя фракция, формула Заумбрея	6,4
6	Предельно плотное сухое, мелкая фракция, формула Заумбрея	13,5
1	Предельно рыхлое сухое, крупная фракция, формула Слихтера	2
2	Предельно рыхлое сухое, средняя фракция, формула Слихтера	3
3	Предельно рыхлое сухое, мелкая фракция, формула Слихтера	3,5
4	Предельно плотное сухое, крупная фракция, формула Слихтера	1,1
5	Предельно плотное сухое, средняя фракция, формула Слихтера	2,4
6	Предельно плотное сухое, мелкая фракция, формула Слихтера	8,7

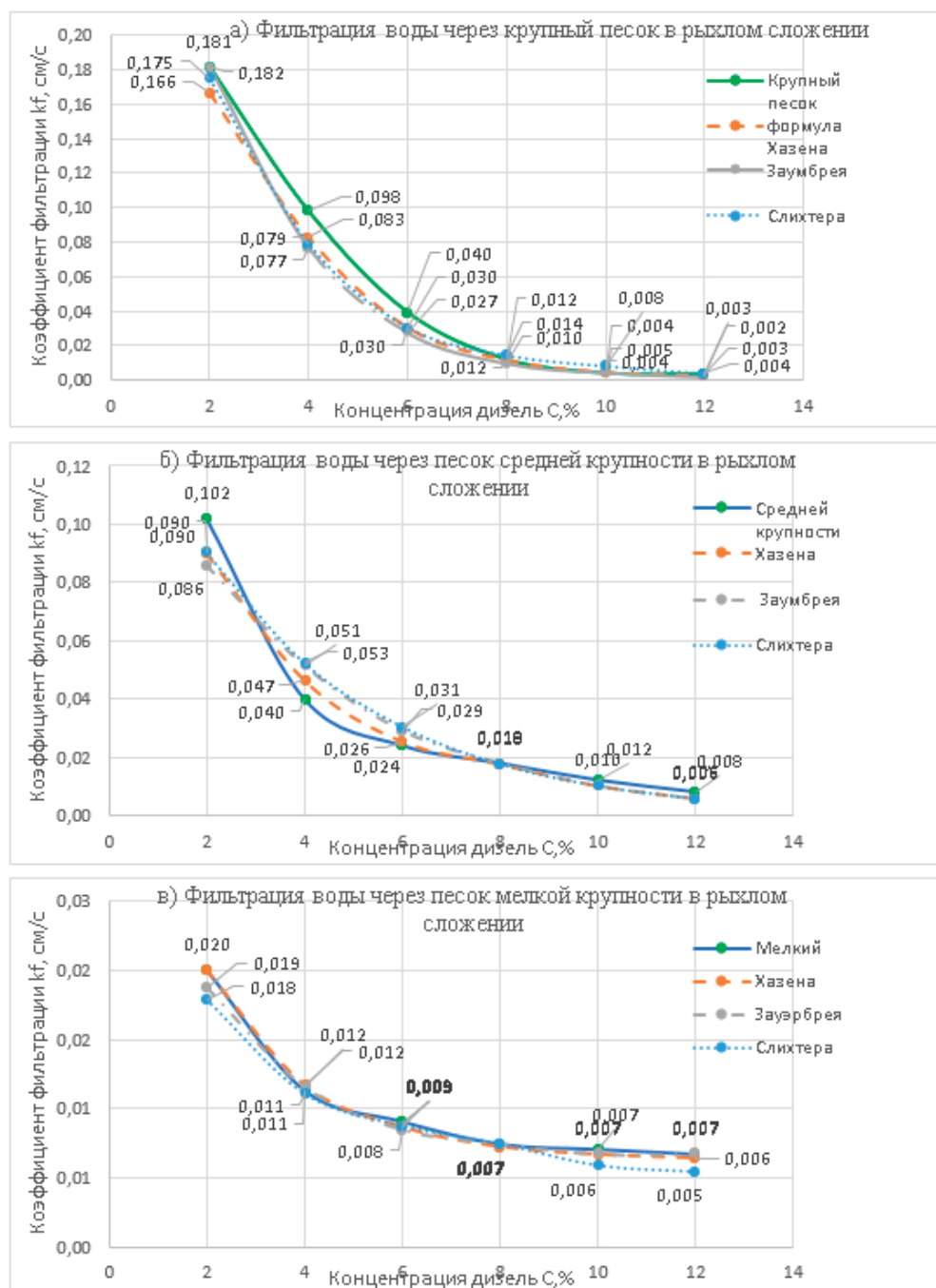


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента фильтрации k_f (см/с) от концентрации дизеля (%):

а — песок крупной в рыхлом сложении; б — песок средний в рыхлом сложении; в — песок мелкий в рыхлом сложении

раторными испытаниями, с результатами, посчитанные при помощи формул, видно, что максимальное отклонение при загрязнении дизельным топливом в концентрации 6 % для крупного песка в плотном сложении составляет 32 %, песка средней крупности в концентрации 2 % дизельного топлива — 8 %, песка мелкой фракции в концентрации 6 % дизельного топлива — 29 %.

Выводы

По результатам проведенных лабораторных исследований была подтверждена гипотеза агрегирования и дис-

пергирования частиц песчаных грунтов, загрязненных дизельным топливом в концентрации 2 %, 6 %, 12 %.

При загрязнении крупного песка дизелем с концентрацией 2 % содержание крупной фракции снижается на 5 %, что доказывает процесс диспергирования. Средняя фракция при загрязнении 2 % и 6 % подверглась процессам агрегирования, изменение массы навески произошло на ~9 г, и диспергирования, изменение массы навески произошло на ~11 г. Мелкая фракция при загрязнении 2 % так же подверглась как агрегированию, так и диспергированию. Увеличение фракции произошло на 4 %, уменьшение фракции произошло на 6 %.

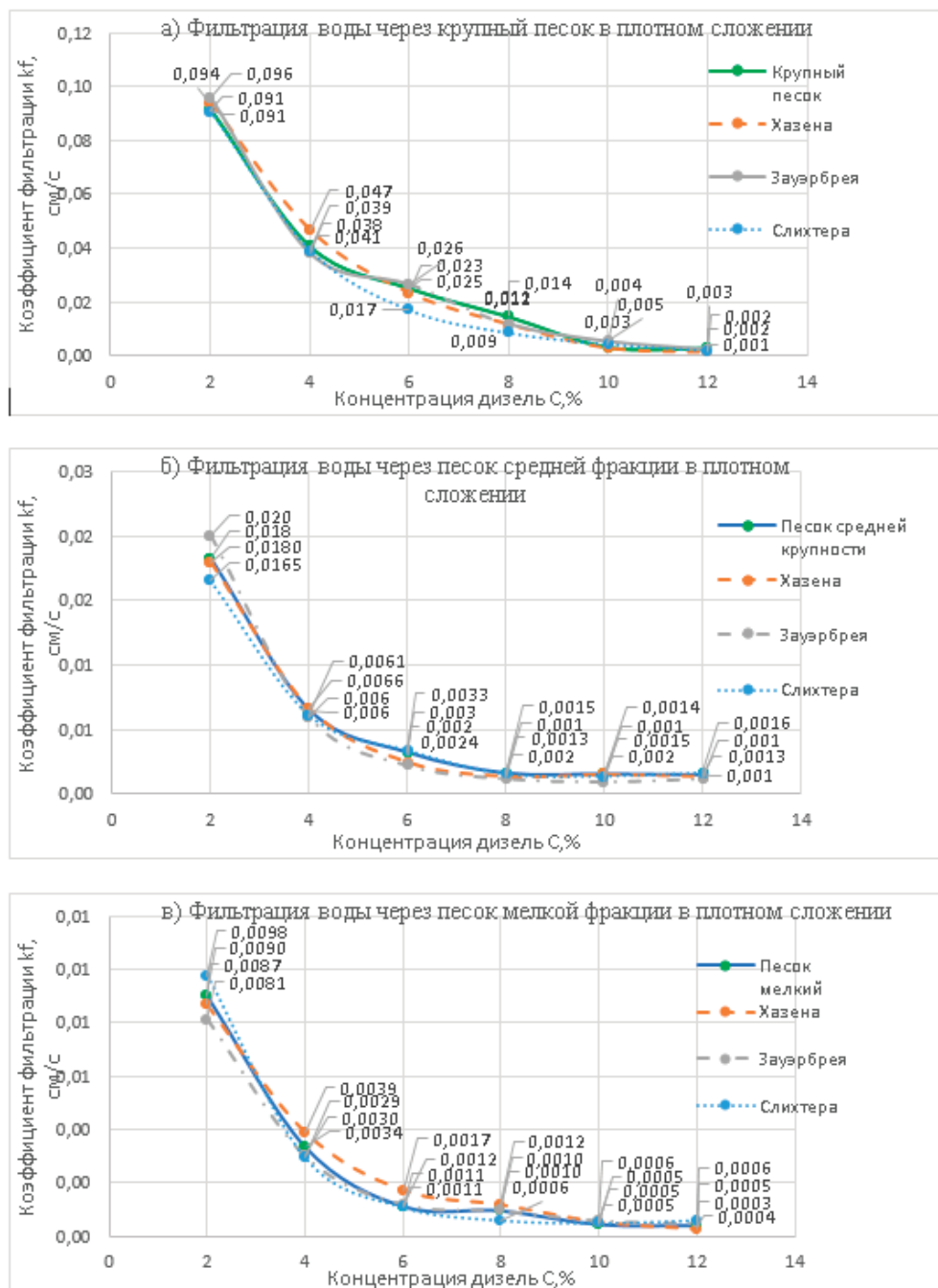


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента фильтрации k_f (см/с) от концентрации дизеля (%):

а — песок крупной в плотном сложении; б — песок средний в плотном сложении; в — песок мелкий в плотном сложении

При загрязнении крупного песка дизелем с концентрацией 6 % и 12 % содержание крупной фракции снижается на 1 %, что доказывает процесс диспергирования. Мелкая фракция при загрязнении 6 % так же подверглась как агрегированию, так и диспергированию. Увеличение фракции произошло на 11 % и уменьшение фракции произошло на 3 %.

Средняя фракция при загрязнении 12 % так же произошло агрегирование от массы навески на ~14 г и диспергирование ~1,5 г. Мелкая фракция при загрязнении 12 % подверглась только агрегированию. Увеличение фракции произошло на 96 %.

По данным лабораторных видно, что с увеличением концентрации дизельного топлива в песке крупной, средней и мелкой фракции наблюдается снижение коэффициента фильтрации в плотном и рыхлом сложении. Коэффициент фильтрации в плотном сложении меньше, чем в рыхлом при одинаковых значениях концентрации дизеля.

Коэффициента фильтрации крупной и средней фракции при концентрации 2 % в рыхлом сложении снижается на 43 %, в плотном сложении коэффициент фильтрации у крупной фракции снизился на 39 %, у средней 15 %, у мелкой 12 %, фильтрация у мелкой фракции в рыхлом сложении снижается на 16 %.

Адаптированы аналитические формулы Хазена, Заумбрея, Слихтера для расчета коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении их дизелем при концентрации 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %, 12 %.

По построенным графикам от результатов, полученных лабораторными испытаниями, с результатами, посчитанные при помощи формул, видно, что максимальное отклонение при загрязнении дизельным топливом в концентрации 4 % для крупного песка в рыхлом сложении составляет 21 %, песка средней крупности в концентрации

4 % дизельного топлива - 27,5 %, песка мелкой фракции в концентрации 2 % дизельного топлива - 10 %.

По построенным графикам от результатов, полученных лабораторными испытаниями, с результатами, посчитанные при помощи формул, видно, что максимальное отклонение при загрязнении дизельным топливом в концентрации 6 % для крупного песка в плотном сложении составляет 32 %, песка средней крупности в концентрации 2 % дизельного топлива - 8 %, песка мелкой фракции в концентрации 6 % дизельного топлива - 29 %.

Литература:

1. И. В. Кумпаненко, Н. А. Иванова, Н. Ю. Ковалева, Н. А. Сахарова, К. А. Шиянова, А. В. Рошин: Исследование просачивания в грунт нефти и нефтепродуктов при их разливах // Химическая физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 45–54. DOI: 10.31857/S0207401X21010088
2. Hamid Rajabi, Mohammad Sharifipour. Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review // Bulletin of Engineering Geology and the Environment/2019. Vol.78. Pp. 3685–3717. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1343-1>
3. Григорьева Ия Юрьевна. И. Ю. «Можно ли добиться эффективной очистки нефтезагрязнённых песков с помощью растений и почему?» // электронный журнал «Геоинфо» 2019г.
4. Hamed Haghsheno, Mahyar Arabani. Geotechnical properties of oilpolluted soil: a review // Environmental Science and Pollution Research (2022) 29:32670–32701 <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19418-1>
5. Красильников П. А., Середин В. В., Леонович М. Ф. Исследование распределения углеводородов по разрезу грунтового массива // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2–14. — С. 3100–3104.
6. Середин В. В., Ядзинская М. Р. Исследование механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 8–6. — С. 1408–1412.
7. Rajab M. Abousnina, Allan Manalo, Weena Lokuge, Jim Shiau Oil contaminated sand: An emerging and sustainable construction material // International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, Procedia Engineering, 2015. Vol. 118. Pp.1119–1126
8. Аль-Адили Акиль, Ёали Кавтар, Шакир Али. Исследование влияния загрязнения нефтью песчаного и гипсосо-державшего грунтов на прочность//ОФМГ. 2017.№ 4. С.30–35
9. Дашко Р. Э. и Ланге И. Ю. Инженерно-геологические аспекты негативных последствий контаминации дисперсных грунтов нефтепродуктами // Записки Горного института. 2017. Т.228. С. 624–630. DOI 10/25515/PML 2017/6/624
10. Осовецкий Б. М., Растегаев А. В., Ибламинов Р. Г., Каченов В. И., Ядзинская М. Р. Изучение влияния масла моторного как поровой жидкости на прочностные свойства песков// Современные проблемы науки и образования. -2014. -№ 4. — С.637.

Adaptive control algorithms for distributed access control systems in high-traffic public facilities

Sarsenov Batyrkhan Samatuly, master's student

Scientific advisor: Zhamangarin Dusmat Samatovich, dr. phd, acting head of department

L. N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan)

This paper addresses the critical problem of improving the efficiency and reliability of access control and management systems (ACMS) for public facilities, using the «Aulie-Ata» Congress Hall as a representative case study. In high-traffic venues with mixed access scenarios, traditional centralized architectures suffer from decision latency and processing timeouts. This research proposes a set of optimization measures: a transition to event-driven processing, offloading the central server through local edge controllers, and implementing a hybrid RBAC+ABAC access model with adaptive risk scoring. A simulation-based evaluation demonstrates a 25–35 % reduction in average event processing time. The results are highly relevant for the modernization of automated security infrastructures in high-occupancy buildings.

Keywords: access control, ACMS, automation, optimization, RBAC, ABAC, security, integration, event-driven architecture, adaptive control.

1. Introduction

The safety and security of public facilities depend fundamentally on the quality of automated control processes. As urban infrastructure grows, particularly in major administrative centers, the complexity of managing access for thousands of individuals simultaneously increases. Congress halls, theaters, and large academic buildings are characterized by high variability in access scenarios. Throughout a single day, staff shifts occur, contractors move through temporary zones, and massive influxes of visitors happen during major events [1, p. 45].

Practical experience shows that as the number of access points increases, the hardware—such as turnstiles and electromagnetic locks—is rarely the bottleneck. Instead, the logic of control, encompassing rule consistency, processing speed, and network resilience, becomes the primary limiting factor. Inefficient optimization leads to queues at checkpoints, increased conflict situations, and fragmented security logs. The goal of this research is to develop and justify a set of optimization methods for ACMS that ensure minimal decision time while maintaining high security and comprehensive logging.

2. Literature Review and Problem Statement

Traditional systems rely heavily on Role-Based Access Control (RBAC), where access rights are assigned to static roles such as «security», «admin», or «visitor». While RBAC is straightforward to administer, it severely lacks the flexibility required to handle context-dependent conditions. For example, restricting a contractor’s access exclusively to active event hours is cumbersome in pure RBAC. Conversely, Attribute-Based Access Control (ABAC) defines rights through subject, object, and environmental attributes [2, p. 38]. Recent studies in automation suggest that hybridizing RBAC and ABAC provides optimal balance, retaining administrative simplicity while enabling dynamic rule enforcement [3, p. 112].

Performance issues in large-scale ACMS frequently stem from centralized architectural paradigms. In these setups, a single

server handles decision-making, database writes, and integration calls to video or fire systems. During peak loads—such as the opening of a major exhibition—resource contention (CPU, Disk I/O) leads to severe latency. Research based on queuing theory demonstrates that the sequential processing of access events creates a bottleneck [4, p. 210]. When thousands of users present their credentials within a 15-minute window, database locks and synchronous external API calls cause response times to spike beyond the acceptable 500-millisecond threshold.

Furthermore, the transition from legacy Wiegand protocols to the Open Supervised Device Protocol (OSDP) has improved physical security through encryption but increased the computational load on controllers [5, p. 14]. This necessitates a shift toward Edge computing, where local controllers possess enough processing power and memory to cache complex policies and evaluate them autonomously [6, p. 102345]. Thus, the core problem is engineering a distributed logic flow that mitigates central server dependency during traffic surges without compromising global security directives.

3. Proposed Methodology: Adaptive Event-Driven Control

To resolve the identified bottlenecks, we propose a three-tier functional separation strategy. The first tier is the Edge Level, comprising local controllers that perform primary credential validation using locally cached rules. The second tier is the Core Services Level, responsible for global administration, complex policy generation, and analytics. The third tier is the Asynchronous Integration Level, which interfaces with CCTV, Fire Alarms, and Human Resources systems via a centralized message broker [7, p. 2350].

Optimization begins with the formalization of the hybrid RBAC+ABAC logic. RBAC acts as the «skeleton», defining the baseline permissions for a user’s primary role. ABAC functions as an «overlay» that evaluates situational attributes. To further enhance security against credential sharing and tailgating, we integrate a Risk-Adaptive Access Control (RAdAC) layer [8, p.

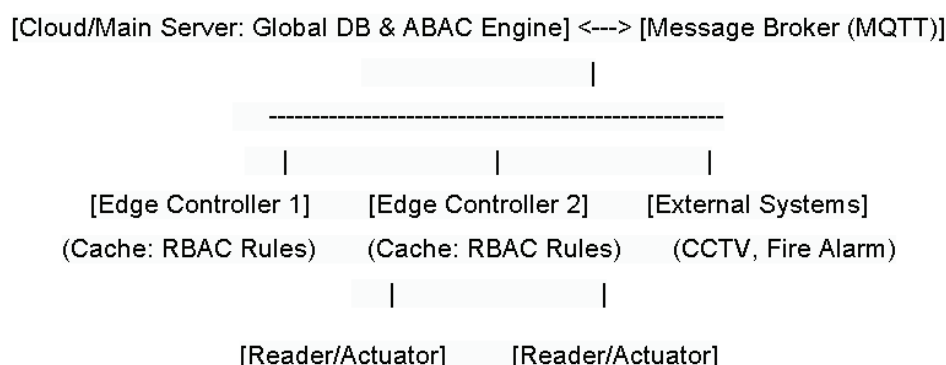


Fig. 1. Structural Diagram of Distributed ACMS with Edge Processing

55]. This layer dynamically calculates a risk score R_{total} for every access attempt based on weighted anomalous characteristics. The risk score is determined by the formula:

$$R_{\{total\}} = \sum_{i=1} w_i \cdot r_i$$

where w_i represents the weight of the specific anomaly and r_i is the boolean or normalized value of the anomaly trigger. Tracked anomalies include unusual access times ($w_1 = 0.3$), high frequency of sequential accesses indicating pass-back attempts ($w_2 = 0.5$), and spatial inconsistencies ($w_3 = 0.8$). If $R_{\{total\}}$ exceeds a

predefined threshold, the system alters the physical response—for instance, requiring a biometric secondary factor [9, p. 148].

4. Performance Evaluation and Simulation Results

The effectiveness of the proposed optimization was evaluated using a discrete-event simulation modeled on the traffic patterns of the «Aulie-Ata» Congress Hall. We compared a Baseline architecture (centralized, synchronous processing) against the Optimized architecture (distributed caching, event-driven asynchronous integration, hybrid logic).

Table 1. Simulation Results Comparison of ACMS Architectures

Scenario	Avg. Latency T (ms) — Base	Avg. Latency T (ms) — Opt.	Timeout Rate % (Base)	Timeout Rate % (Opt.)
Standard Load	180	125	2.1 %	0.6 %
Staff Peak (Morning)	420	290	11.4 %	4.0 %
Event Peak	510	340	16.8 %	6.2 %

The simulation subjected both systems to scenarios like the Event Peak. The data demonstrates that the optimized approach provides a significant reduction (25–35 %) in processing time and effectively prevents «timeout» failures during peak events, ensuring a smooth user experience.

5. Implementation Strategy

Deploying this architecture in large-scale facilities requires a meticulous, phased rollout. Phase one is the Auditing and Normalization stage. Administrators must consolidate existing roles, eliminate duplicate access zones, and establish a unified naming convention [10, p. 62].

Phase two focuses on Network Segmentation and Event Formatting. Standardized JSON payloads for access events are established to ensure seamless communication with the message broker. During this phase, integrations with external systems like CCTV and HR are rewritten to subscribe to these message queues rather than polling the ACMS database directly.

Phase three involves enabling Edge Autonomy. Local controllers are configured to download incremental rule

updates from the core server. Synchronization algorithms must be implemented to handle offline scenarios. The final phase activates the RAdAC scoring layer, which should initially run in a «shadow mode» to calibrate anomaly weights without falsely denying legitimate users.

6. Conclusion

The transition to an adaptive, event-driven control paradigm represents a necessary evolution for security infrastructures in high-occupancy public buildings. By implementing a hybrid RBAC+ABAC model and offloading the critical path of decision-making to edge devices, facilities can achieve high throughput without compromising strict security mandates. The isolation of heavy integration tasks through asynchronous message brokering effectively eradicates the database deadlocks that paralyze centralized systems during crowd surges.

Future research will explore the integration of Machine Learning (ML) to dynamically adjust the weights within the RAdAC formula based on real-time pedestrian flow analytics, ultimately moving toward the creation of a complete predictive «digital twin» of the facility’s security ecosystem.

References:

1.

V. A. Vorona and V. A. Tikhonov, Access Control and Management Systems. Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom, 2010. Available: <https://www.rgsec.ru/wp-content/uploads/download/skud-kniga.pdf> [Accessed: May 17, 2026].

2.

R. S. Sandhu, E. J. Coyne, H. L. Feinstein, and C. E. Youman, «Role-Based Access Control Models», IEEE Computer, vol. 29, no. 2, pp. 38–47, 1996. DOI: 10.1109/2.485845.

3.

V. C. Hu, D. Ferraiolo, and R. Kuhn, «Assessment of Access Control Systems», NIST Interagency Report 7316, 2006. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/ir/nistir7316.pdf> [Accessed: May 17, 2026].

4.

A. A. Klyucharev, Access Control and Management Systems: Textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2015. Available: <https://books.ifmo.ru/file/pdf/1709.pdf> [Accessed: May 17, 2026].

5.

Security Industry Association (SIA), «Open Supervised Device Protocol (OSDP) v2.2», 2020. Available: <https://www.securityindustry.org/industry-standards/open-supervised-device-protocol/> [Accessed: May 17, 2026].

6. S. M. Mousavi, «Real-Time Event-Driven Processing in Distributed Architectures», IEEE Access, vol. 9, pp. 45678–45692, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051123.
7. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhar, and M. Ayyash, «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications», IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
8. R. McGraw, «Risk-Adaptable Access Control (RAdAC)», NIST Privilege Management Workshop, 2009. Available: https://csrc.nist.gov/csrc/media/events/privilege-management-workshop/documents/presentations/bob_mcgraw.pdf [Accessed: May 17, 2026].
9. A. Al-Sabaawi, «Integration of Access Control Systems with Smart Video Surveillance», IEEE Access, vol. 10, pp. 34120–34135, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3162134.
10. B. S. Sarsenov and D. Zhamangarin, «Optimization of Control and Management Processes in the ACMS of the ‘Aulie-Ata’ Congress Hall», Bulletin of Shakarim University, no. 1, pp. 45–51, 2026.

Устройство запуска дизельного двигателя

Шилов Андрей Евгеньевич, студент магистратуры

Научный руководитель: Свердлов Ростислав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент

Арзамасский политехнический институт Нижегородского государственного политехнического университета имени Р. Е. Алексеева

Рассмотрен алгоритм автоматического запуска дизельного двигателя, принципиальная схема и имитационная модель устройства, реализующего автоматический запуск, проведён анализ функциональных блоков, сделан вывод о работоспособности разработанной модели и возможности её использования для создания макетного образца.

Ключевые слова: устройство запуска дизеля, алгоритм, свечи накаливания, имитационное моделирование, Proteus, функциональные блоки, микроконтроллер ATtiny13.

В современных условиях эксплуатации дизельной техники вопросы надёжного пуска двигателя, особенно в холодное время года, являются крайне актуальными. Дизельные двигатели, в отличие от бензиновых, требуют предварительного подогрева камеры сгорания для обеспечения уверенного запуска. Большинство систем управления запуском имеют ручное управление, что может приводить к ошибкам оператора, преждевременному износу стартера и аккумуляторной батареи, а также к затруднённому пуску в зимних условиях. Автоматизация процесса пуска позволяет исключить человеческий фактор, могущий привести к нарушениям процесса запуска двигателя и, соответственно, к поломкам оборудования; оптимизировать режимы предпускового накала свечей в зависимости от температуры двигателя; обеспечить своевременное включение и отключение стартера; обеспечить защиту аккумулятора, топливного оборудования и стартера при запуске. Это способствует увеличению ресурса как самого двигателя, так и элементов системы пуска. Следовательно, разработка электронного устройства автоматического управления запуском дизеля является актуальной задачей.

Рассмотрим алгоритм работы устройства, обеспечивающего автоматизацию запуска двигателя.

После подачи оператором сигнала на включение устройство должно проверить следующие факторы: наличие топлива в топливной магистрали, уровень заряда аккумулятора, температуру свеч накаливания, температуру окружающей среды. Необходимость определения

двух последних факторов связана с тем, что от температуры входящего воздуха зависит требуемая для запуска температура рабочей смеси. При неудовлетворительном состоянии первых двух факторов должен выдаваться соответствующий сигнал оператору. В зависимости от значений двух вторых факторов устройство должно определить температуру, до которой необходимо нагреть свечи. После этого подается ток на свечи, до достижения ими заданной на предыдущем шаге температуры. При ее достижении устройство ставит орган управления подачей топлива в необходимое для запуска положение и подает сигнал на включение стартера. Отключение питания стартера должно происходить по одной из причин:

- запуск двигателя, что определяется по повышению его оборотов или по повышению давления масла в системе смазки;
- отсутствие вращения двигателя, что возможно в случае поломки механической или электрической части и определяется по отсутствию повышения оборотов или давления масла;
- превышение времени безопасной работы стартера.

После успешного запуска устройство дает сигнал оператору и отключается, при отсутствии запуска — также дает соответствующий сигнал и отключается. Нужно также предусмотреть возможность отключения устройства для перевода в ручной режим, что в некоторых случаях необходимо.

Рассмотрим принципиальную электрическую схему разработанного устройства, представленную на рисунке 1.

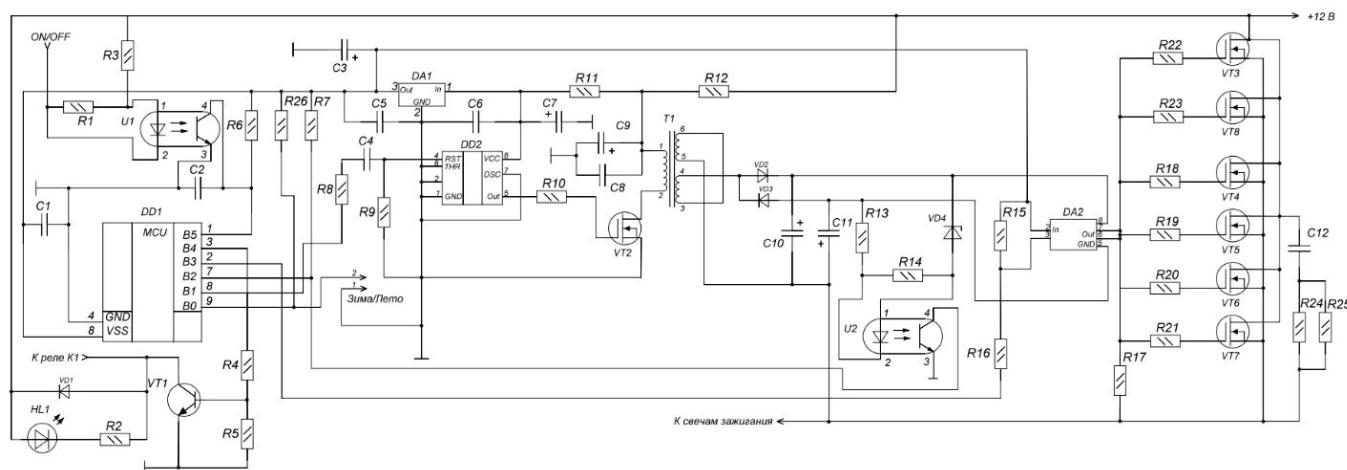


Рис. 1. Принципиальная схема устройства запуска дизельного двигателя

Питание устройства осуществляется от бортовой сети постоянного тока напряжением 12 В. Первым звеном устройства является защитный диод VD1 (1N4007), необходимый для защиты от переплюсовки питающего напряжения. Далее расположен интегральный стабилизатор напряжения DA1 типа 78M05, преобразующий бортовое напряжение 12 В в стабилизированные +5 В для питания микроконтроллера и логических микросхем. Фильтрующие конденсаторы C3, C4, C5, C6 обеспечивают сглаживание пульсаций по цепям питания +5 В.

Основным звеном устройства является микроконтроллер DD1 типа ATtiny13, выполняющий роль блока управления. Он анализирует внешние сигналы и формирует логику включения исполнительных механизмов. Для задания временных интервалов предпускового накала свечей в схеме предусмотрен таймер DD2 типа NE555D с времязадающей цепочкой R2, R3, C1, C2.

Управление мощной нагрузкой (свечи накала и стартер) осуществляется с помощью силовых MOSFET-транзисторов VT2–VT8 типа IRF3710, способных коммутировать токи до 50 А. Для управления затворами транзисторов используется драйвер DA2 типа HCPL3120, обеспечивающий гальваническую развязку и необходимый ток затвора. Для индикации режимов работы в схеме предусмотрен светодиод HL1 (AJ307BM) с токоограничивающим резистором R4. Цепи обратной связи и гальванической развязки реализованы на оптопарах U1, U2 типа PC817, позволяющих безопасно подключать внешние датчики (давления масла, температуры) к микроконтроллеру. Коммутация цепей стартера осуществляется электромагнитным реле (на схеме «К реле K1»), управляемым транзистором VT1 (BD139) с защитным диодом VD2.

Принцип действия устройства заключается в следующем: при подаче питания микроконтроллер DD1 опрашивает внешние датчики через оптопары, определяет температуру двигателя и выдает сигнал на включение свечей накала. Сигнал с вывода микроконтроллера поступает на драйвер DA2, который открывает силовые транзисторы

VT2–VT8, подавая напряжение на свечи. Время накала контролируется таймером DD2. После завершения цикла накала микроконтроллер подает сигнал на включение стартера через транзистор VT1 и реле K1. При запуске двигателя сигнал с датчика давления масла поступает на оптопару U2, и микроконтроллер отключает стартер.

Для отработки алгоритмов управления и проверки работоспособности схемы в программе ISIS Proteus была создана имитационная модель устройства, представленная на рис. 2. Модель полностью соответствует принципиальной схеме.

Рассмотрим функциональные блоки модели более подробно.

Для имитации автомобильного аккумулятора используем источник постоянного напряжения 12 В. Для учета реальных характеристик источника в цепь питания добавлено внутреннее сопротивление, моделирующее потери в проводах и конечную мощность батареи. Защитный диод VD1 предотвращает повреждение схемы при случайной смене полярности подключения. Напряжение поступает на интегральный стабилизатор DA1 (78M05), который понижает напряжение до +5 В, необходимого для питания микроконтроллера и таймера. На входе и выходе стабилизатора установлены конденсаторы для сглаживания пульсаций и обеспечения устойчивости работы линейного регулятора, что гарантирует стабильное питание цифровой части даже при значительных колебаниях бортового напряжения в моменты работы стартера.

Центральным элементом модели является микроконтроллер DD1 (ATtiny13). К его выводам подключены: цепь сброса с подтягивающим резистором R10, входы для приема сигналов от оптопар U1, U2, выходы для управления драйвером свечей накала и транзистором реле стартера. Его программное обеспечение реализует алгоритм пуска: после подачи питания он переходит в режим ожидания, затем при активном сигнале «зажигание» запускает цикл запуска. Программа учитывает сигнал от датчика температуры.

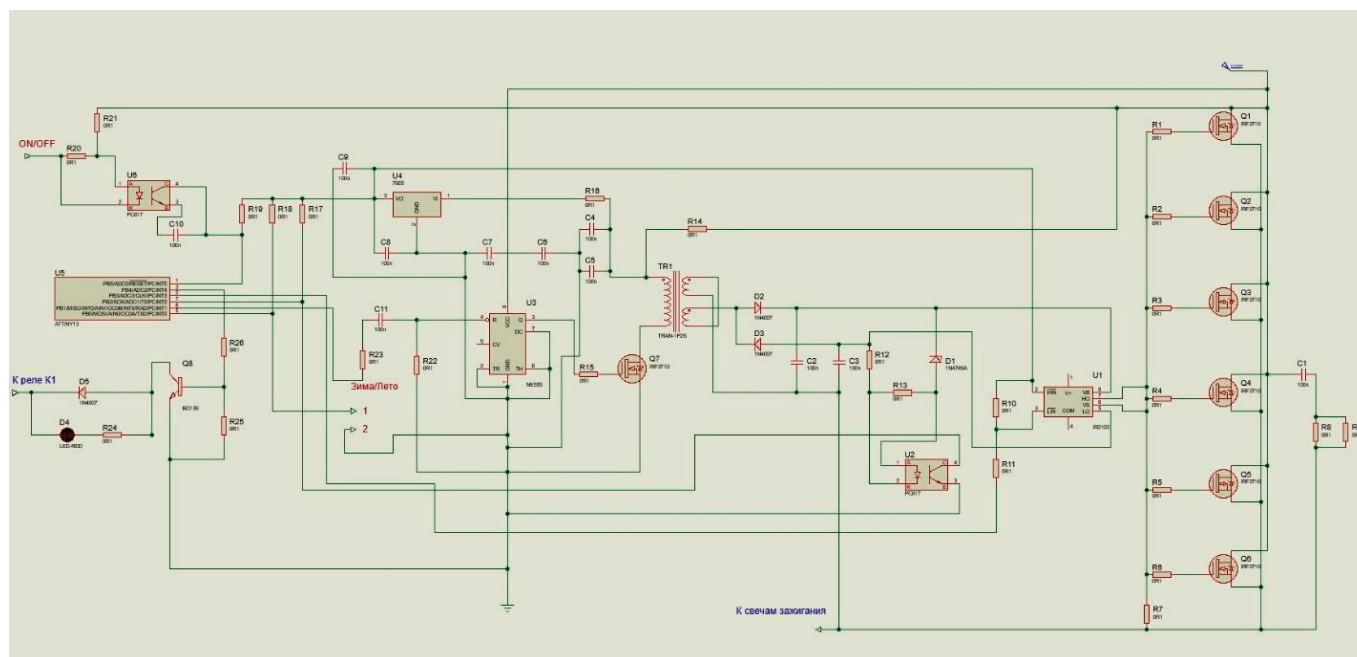


Рис. 2. Имитационная модель устройства запуска дизеля

Для формирования длительности импульса накала свечей служит микросхема DD2 (NE555D), включенная по схеме одновибратора. Время импульса определяется номиналами резисторов R2, R3 и конденсаторов C1, C2. Выбор номиналов произведен таким образом, чтобы при холодном двигателе длительность составляла около 10 секунд, что соответствует рекомендациям. Использование отдельного таймера разгружает контроллер и обеспечивает точность временных интервалов независимо от программных задержек.

Сигнал с выхода микроконтроллера (или с таймера) подается на вход драйвера DA2 (HCPL3120). Данный драйвер обеспечивает гальваническую развязку между управляющей логикой и силовой частью, что повышает безопасность и помехоустойчивость. Выход драйвера подключен к затворам полевых транзисторов VT2–VT8 (IRF3710), соединенных параллельно для увеличения коммутируемого тока. Каждый транзистор способен пропускать ток до 50 А, а их параллельное соединение позволяет коммутировать суммарный ток до 350 А, что с большим запасом перекрывает пиковые токи свечей накала. Резисторы в цепях затворов ограничивают ток, предотвращая перегрузку драйвера, а также служат для демпфирования паразитных колебаний. Сами свечи накала в модели представлены мощными резисторами соответствующего сопротивления.

Для коммутации цепи стартера используется электромагнитное реле K1, управляемое транзистором VT1 (BD139). Транзистор открывается сигналом микроконтроллера через резистор R5. Параллельно обмотке реле включен диод VD2, защищающий транзистор от выбросов напряжения при выключении. Контакты реле замыкают цепь питания стартера, который представлен низкоомной нагрузкой с последовательной индуктивно-

стью для имитации обмотки стартера. Это позволяет наблюдать броски тока в момент пуска и просадки напряжения на аккумуляторе.

Для контроля режимов работы в модель включен светодиод HL1 с токоограничивающим резистором R4. Светодиод подключен к выводу микроконтроллера и может мигать с разной частотой или гореть постоянно, сигнализируя о различных состояниях: включение зажигания, работа свечей, активный стартер. Обратная связь от двигателя реализована через оптопары U1 и U2 (PC817). Оптопара U1 может использоваться для подключения датчика температуры, а U2 — для датчика давления масла. Сигнал с оптопары поступает на вход микроконтроллера, который принимает решение об отключении стартера при успешном запуске. Гальваническая развязка защищает микроконтроллер от помех и наводок в бортовой сети.

В процессе моделирования в среде Proteus была проведена проверка взаимодействия всех блоков. С помощью виртуальных вольтметров и амперметров контролировались уровни напряжений в контрольных точках и токи через нагрузку. Логика работы микроконтроллера и таймера проверялась путем наблюдения за состоянием светодиода HL1. Модель показала устойчивую работу при различных комбинациях входных сигналов: при имитации холодного двигателя и при прогревом. Также была проверена реакция на сигнал «двигатель запущен» — стартер отключался досрочно.

Модель подтверждает, что схема корректно реализует требуемый алгоритм запуска дизеля: после включения зажигания происходит предпусковой накал свечей в течение заданного времени, затем автоматически включается стартер, который отключается либо по истечении максимального времени работы, либо

при поступлении сигнала с датчика давления масла. Все компоненты функционируют в соответствии с расчетными режимами.

Таким образом, разработанная имитационная модель устройства является работоспособной и может использо-

ваться как прототип для дальнейшего исследования и разработки схемы. В дальнейшем планируется оптимизировать программный код микроконтроллера, подобрать более точные номиналы времязадающих цепей и перейти к созданию макетного образца.

Литература:

1. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с.
2. Соснин Д. А. Автотроника. Электрооборудование и системы бортовой автоматики современных легковых автомобилей: Учебное пособие. — М.: СОЛОН-Пресс, 2016. — 448 с.
3. Марсов В. И., Гематудинов Р. А., Селезнёв В. С., Джабраилов Х. А. Моделирование в PROTEUS VSM: учебно-методическое пособие — Москва: МАДИ, 2019. — 44 с.
4. Туревский И. С. Электрооборудование автомобилей: Учебное пособие. – М.: Форум, 2012. — 368 с.

МЕДИЦИНА

Ингибиторы тирозинкиназы как перспективный терапевтический подход при рассеянном склерозе

Керимова Зарина Ериковна, студент

Научный руководитель: Азизходжаева Динара Шавкатовна, преподаватель
Международный казахско-турецкий университет имени Х. А. Ясави (г. Туркестан, Казахстан)

Рассеянный склероз (РС) — это длительное воспалительное заболевание центральной нервной системы, при котором иммунная система работает неправильно и повреждает миелин — защитную оболочку нервных волокон. Из-за этого постепенно нарушается работа нервной системы. Современные препараты помогают уменьшить активность иммунитета и снизить количество обострений, однако они не всегда способны полностью остановить постепенное ухудшение состояния пациента. В последние годы внимание ученых привлекают ингибиторы тирозин-киназы, особенно ингибиторы тирозин-киназы Брутона (БТК). Эти препараты считаются перспективными, потому что воздействуют как на иммунные клетки в крови, так и на иммунные клетки, находящиеся в центральной нервной системе. Исследования показывают, что блокировка БТК может уменьшать воспаление и снижать количество очагов поражения, выявляемых на МРТ. Однако информации об их долгосрочной эффективности и безопасности пока недостаточно. Ингибиторы тирозин-киназы Брутона считаются важной мишенью для лечения, так как они участвуют в процессах активации В-клеток, а также регулируют работу макрофагов и микроглии, которые играют важную роль в иммунном ответе.

Ключевые слова: рассеянный склероз, иммунная система, демиелинизация, ингибиторы БТК, воспаление, нейродегенерация.

Введение: Рассеянный склероз — это длительное заболевание центральной нервной системы, при котором иммунная система начинает повреждать нервные клетки и их защитную оболочку. Из-за этого возникает воспаление, постепенно ухудшается работа нервной системы и теряются нервные клетки. Со временем такие изменения могут приводить к стойким неврологическим нарушениям. Считается, что развитие болезни связано как с наследственностью, так и с внешними факторами, например вирусными инфекциями, нехваткой витамина D и образом жизни [1]. Несмотря на то что современные методы терапии помогают уменьшить количество обострений и подавляют избыточную активность иммунной системы, они не всегда способны остановить постепенное развитие инвалидности в будущем. Поэтому ученые продолжают искать новые способы лечения, которые смогут воздействовать не только на иммунитет в организме, но и на воспалительные процессы в центральной нервной системе. Одно из перспективных направлений связано с протеинтирозинкиназами — веществами, участвующими в передаче сигналов между иммунными клетками. Особый интерес вызывает тирозин-киназа Брутона (БТК), так как она играет важную роль в работе В-клеток и клеток врожденного иммунитета. Новые ис-

следования показывают, что БТК также может быть связана с поддержанием воспаления в центральной нервной системе при рассеянном склерозе [2]. Сегодня В-клетки считаются одними из главных участников развития рассеянного склероза. Эффективность препаратов, воздействующих на CD20, показала, что эти клетки действительно играют важную роль в контроле заболевания. Однако длительное снижение количества В-клеток может иметь и отрицательные стороны. Например, это способно ослаблять иммунную защиту организма, связанную с выработкой антител, а также нарушать нормальную работу иммунной системы. Поэтому длительное применение такой терапии вызывает вопросы, связанные с безопасностью и возможными нарушениями работы иммунитета [3]. Развитие рассеянного склероза связано с нарушением работы как врожденного, так и приобретенного иммунитета. В этом процессе участвуют Т-клетки, В-клетки и микроглия — иммунные клетки, находящиеся в центральной нервной системе [4]. Когда эти клетки активируются, в нервной ткани возникает хроническое воспаление. Это приводит к повреждению миелина, аксонов и нервных клеток, из-за чего постепенно развиваются стойкие неврологические нарушения и инвалидность [5].

Методы

Данная статья основана на анализе опубликованных научных данных. Для поиска информации использовались крупные биомедицинские базы данных, включая PubMed, Scopus, а также открытые реестры клинических исследований. В обзор были включены рандомизированные клинические исследования, систематические обзоры и метаанализы, посвященные изучению эффективности и безопасности ингибиторов тирозин-киназы при рассеянном склерозе. Основное внимание уделялось исследованиям ингибиторов тирозин-киназы Брутона (БТК), изменениям на МРТ, связанным с активностью очагов поражения, а также клинической оценке инвалидности пациентов по шкале EDSS. Полученные данные были проанализированы и объединены для оценки существующих результатов, понимания механизмов действия терапии и определения ограничений имеющихся исследований.

Результаты и обсуждение

Тирозин-киназа Брутона (БТК) представляет собой внутриклеточный белок, который участвует в передаче сигналов между иммунными клетками и регулирует воспалительные процессы. Этот белок содержится в В-лимфоцитах, а также в клетках миелоидного ряда — макрофагах и микроглии, расположенных в центральной нервной системе. Все эти клетки играют важную роль

в развитии рассеянного склероза [6, 7]. (Рис. 1.) При рассеянном склерозе активация БТК в В-клетках усиливает работу В-клеточного рецептора и способствует выработке провоспалительных веществ, таких как интерферон-гамма и фактор некроза опухоли-альфа [6, 8]. Эти вещества активируют CD4+ Т-клетки и поддерживают их превращение в формы, усиливающие воспаление и повреждение миелина и нервных волокон [9]. Кроме того, цитокины, выделяемые В-клетками, воздействуют на клетки врожденного иммунитета. Под их влиянием макрофаги переходят в провоспалительное состояние M1, при котором усиливается их способность разрушать миелин. Это также может приводить к появлению так называемых пенистых клеток, содержащих большое количество липидов, в активных очагах поражения [10]. В центральной нервной системе БТК в микроглии поддерживает воспаление и может способствовать тому, что очаги повреждения миелина со временем сохраняются и увеличиваются. В клетках иммунной системы БТК помогает вырабатывать воспалительные вещества и поддерживает длительную активность иммунитета. Если БТК блокировать с помощью лекарств, эти процессы снижаются: уменьшается активность В-клеток, вырабатывается меньше цитокинов, макрофаги реже переходят в «воспалительный» тип M1, а микроглия становится менее активной (рис. 2). В итоге воспаление в нервной системе уменьшается, а миелин лучше сохраняется. Поэтому этот метод считается перспективным способом лечения рассеянного склероза [11].

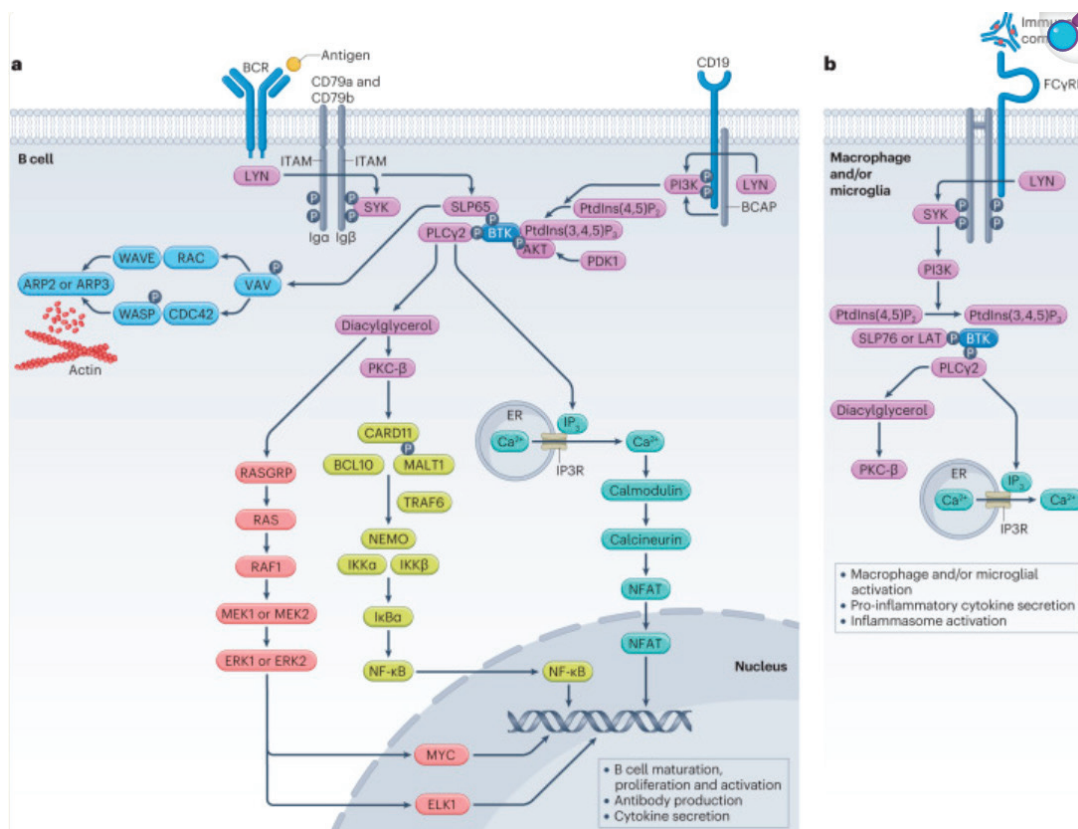


Рис. 1. Схема передачи сигналов БТК в В-лимфоцитах, макрофагах и клетках микроглии [2]

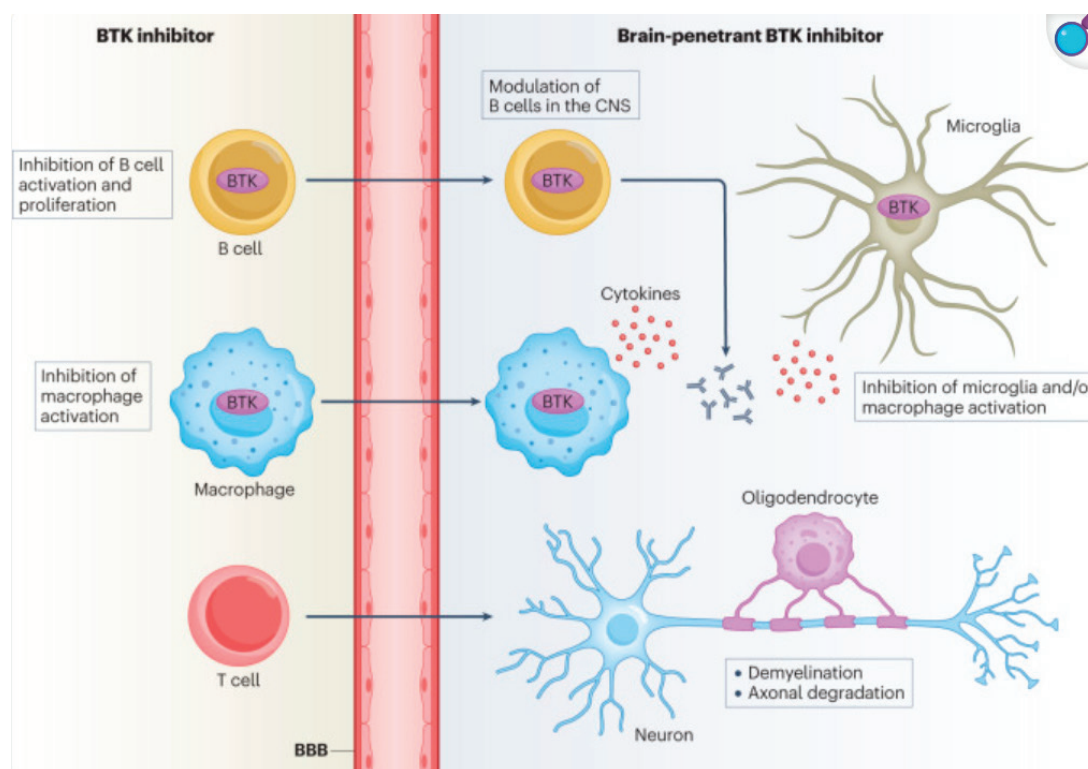


Рис. 2. Предполагаемый механизм действия препаратов, блокирующих BTK, при рассеянном склерозе [2]

Источник рисунков: рисунки адаптированы из [2]

В недавнем исследовании II фазы препарат эвобрутиниб показал снижение количества активных очагов на МРТ по сравнению с плацебо, особенно при более высоких дозах, например 75 мг один или два раза в сутки. Также у пациентов реже возникали обострения, а состояние по шкале EDSS оставалось более стабильным [12]. Другой препарат — фенебрутиниб, который является селективным и обратимым ингибитором BTK, также показал положительное влияние на показатели активности болезни по данным МРТ. Кроме того, у большинства пациентов не наблюдалось новых рецидивов, что говорит о достаточно устойчивом эффекте лечения [13]. Клинические данные показывают, что на МРТ (T1 и T2 режимы) становится меньше активных очагов. Это значит, что воспаление уменьшается и новых повреждений образуется меньше. При более длительном наблюдении у пациентов болезнь часто протекает более стабильно, а ухудшение состояния может замедляться, особенно при рецидивирующей форме РС. В некоторых исследованиях фенебрутиниб помогал удерживать низкую активность болезни примерно до 48 недель [14]. Есть данные и по более тяжелым формам заболевания. Ранние результаты исследований III фазы показывают, что фенебрутиниб может замедлять ухудшение состояния при первично-прогрессирующем рассеянном склерозе. Это говорит о том, что препарат может помогать не только при воспалении, но и при прогрессировании болезни [15]. Хотя изучались и другие похожие препараты (SYK и JAK ингибиторы), именно ингибиторы тирозин-киназы Брутона сейчас счи-

таются наиболее перспективными [16]. Это связано с тем, что они действуют и на иммунные клетки в крови, и на микроглию в мозге, которые участвуют в развитии воспаления и повреждении нервов [17]. В отличие от некоторых других методов лечения, которые работают только на иммунитет в крови, BTK ингибиторы влияют и на центральную нервную систему. Поэтому они могут быть полезны при разных формах рассеянного склероза [18]. В целом это новый способ лечения, который воздействует сразу на разные части иммунной системы. Ранние результаты выглядят обнадеживающе, но долгосрочные эффекты и безопасность еще продолжают изучаться [19].

Преимущества

Ингибиторы BTK представляют собой новый класс перорально принимаемых препаратов, которые модулируют множество иммунных путей, участвующих в патогенезе рассеянного склероза. В отличие от традиционных методов лечения, модифицирующих течение заболевания, которые в основном подавляют периферическую иммунную активность, эти препараты влияют как на адаптивный, так и на врожденный иммунитет, включая В-клетки, макрофаги и микроглию [17]. Важным преимуществом данных препаратов является их способность проникать через гематоэнцефалический барьер и воздействовать на иммунные процессы в центральной нервной системе. Это свойство особенно важно при прогрессирующем рассеянном склерозе, где воспаление внутри

центральной нервной системы продолжает повреждать ткани. Пероральный прием также обеспечивает практические преимущества с точки зрения приверженности лечению и удобства для пациента. Кроме того, их более целенаправленный иммуномодулирующий профиль может снизить широкое системное подавление иммунитета [19].

Ограничения

Несмотря на хорошие первые результаты, у этих препаратов есть ограничения. Большинство данных получено из ранних клинических исследований, поэтому информации о долгосрочной эффективности и безопасности пока мало. Среди возможных побочных эффектов отмечают повышенный риск инфекций и временное повышение печеночных ферментов, поэтому пациентам нужен контроль анализов. Также пока недостаточно данных о том, как эти препараты влияют на медленное прогрессирование инвалидности. Чтобы точно понять их эффективность и подобрать правильные дозы, нужны более длительные и крупные исследования [19]. В настоящее время для лечения рассеянного склероза одобрено более 20 препаратов, которые влияют на течение болезни. Такой прогресс во многом стал возможен благодаря использованию

МРТ: врачи оценивают активность болезни по очагам на T1-изображениях с контрастом, которые служат показателем воспаления в исследованиях [20, 21]. Сильнодействующие препараты, включая моноклональные антитела против CD20, значительно уменьшают острое воспаление и образование новых очагов в центральной нервной системе [22, 23]. В целом, несмотря на большое количество современных препаратов для лечения рассеянного склероза, болезнь до конца не контролируется. У многих пациентов инвалидность продолжает постепенно нарастать даже без новых обострений или активных очагов на МРТ. Этот процесс называется прогрессированием, независимым от обострений (PIRA) [23].

Заключение

Ингибиторы ВТК являются перспективным новым направлением в лечении рассеянного склероза. Они могут влиять на течение болезни и уменьшать воспаление, поэтому рассматриваются как препараты будущего. Однако, чтобы точно понять их эффективность и безопасность, а также определить их место в обычной клинической практике, нужны дополнительные крупные клинические исследования.

Литература:

1. Rodriguez, M. S. The immune response in multiple sclerosis / M. S. Rodriguez, M. F. Farez, F. J. Quintana. — Текст: непосредственный // *Annual Review of Pathology: Mechanisms of Disease*. — 2022. — № 17(1). — С. 121–139. <https://doi.org/10.1146/annurev-pathol-052920-040318>
2. Bruton tyrosine kinase inhibitors for multiple sclerosis / J. Krämer, A. Bar-Or, T. J. Turner, H. Wiendl. — Текст: непосредственный // *Nature Reviews Neurology*. — 2023. — № 5. — С. 289–304. <https://doi.org/10.1038/s41582-023-00800-7>
3. Torke, S. Inhibition of Bruton's tyrosine kinase as a novel therapeutic approach in multiple sclerosis / S. Torke, M. S. Weber. — Текст: непосредственный // *Expert Opinion on Investigational Drugs*. — 2020. — № 10. — С. 1143–1150. <https://doi.org/10.1080/13543784.2020.1807934>
4. Rodríguez, M. S. The immune response in multiple sclerosis / M. S. Rodríguez, M. F. Farez, F. J. Quintana. — Текст: непосредственный // *Annual Review of Pathology: Mechanisms of Disease*. — 2022. — № 17. — С. 121–139. <https://doi.org/10.1146/annurev-pathol-052920-040318>
5. Placebo-controlled trial of an oral BTK inhibitor in multiple sclerosis / S. L. Hauser, A. Bar-Or, J. A. Cohen, al et. — Текст: непосредственный // *New England Journal of Medicine*. — 2019. — № 380(25). — С. 2406–2417. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1901981>
6. Hemmer, B. Immunopathogenesis and immunotherapy of multiple sclerosis / B. Hemmer, al et. — Текст: непосредственный // *Nature Reviews Immunology*. — 2020. — № 20(9). — С. 545–558. <https://www.nature.com/articles/ncpneuro0154>
7. Multiple sclerosis / Reich, S. D, Lucchinetti [и др.]. — Текст: непосредственный // *New England Journal of Medicine*. — 2018. — № 378(2). — С. 169–180. <https://pure.johnshopkins.edu/en/publications/multiple-sclerosis-24/>
8. Rip, J. Bruton's tyrosine kinase inhibition in multiple sclerosis / J. Rip, al et. — Текст: непосредственный // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2021. — № 22(9). — С. 4492. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11910-022-01229-z>
9. Li, R. Reassessing B cell contributions in multiple sclerosis / R. Li, K. R. Patterson, A. Bar-Or. — Текст: непосредственный // *Nature Immunology*. — 2018. — № 7. — С. 696–707. https://www.nature.com/articles/s41590-018-0135-x?error=cookies_not_supported&code=f4b1e4af-a57d-400d-aa2e-2cb0dacb617e
10. Vogel, D Y S Macrophages in inflammatory multiple sclerosis lesions have an intermediate activation status / D Y S Vogel. — Текст: непосредственный // *Journal of Neuroinflammation*. — 2013. — № 10, 35. <https://link.springer.com/article/10.1186/1742-2094-10-35>
11. Haselmayer, P. Efficacy and pharmacodynamic modeling of the BTK inhibitor evobrutinib in autoimmune disease models / P. Haselmayer, al et. — Текст: непосредственный // *Journal of Immunology*. — 2019. — № 10. — С. 2888–2906. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30988116/>

12. Safety and efficacy of fenebrutinib in relapsing multiple sclerosis (FENopta): A multicentre, double-blind, randomised, placebo-controlled, phase 2 trial and open-label extension study / Bar-Or, A., Dufek [и др.]. — Текст: непосредственный // The Lancet Neurology. — 2025. — № 24(8). — С. 656–666. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(25\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(25)00174-7)
13. Roche provides update on multiple sclerosis research program / Roche. — Текст: электронный // roche.com: [сайт]. — URL: <https://www.roche.com/media/releases/med-cor-2023-05-17>
14. Reuters Roche's multiple sclerosis drug fenebrutinib meets goal in late-stage trial / Reuters. — Текст: электронный // Reuters: [сайт]. — URL: <https://www.reuters.com/business/healthcare-pharmaceuticals/roches-multiple-sclerosis-drug-fenebrutinib-meets-goal-late-stage-trial-2026-02-07/>
15. Kleinschnitz, C. Bruton's tyrosine kinase inhibition in multiple sclerosis: Current evidence and future perspectives / C. Kleinschnitz, H. Wiendl. — Текст: непосредственный // Frontiers in Immunology. — 2023. — № 14. — С. 10100639. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.10100639>
16. Reich, D. S. Safety and efficacy of tolebrutinib, an oral brain-penetrant Bruton's tyrosine kinase inhibitor, in relapsing multiple sclerosis: A phase 2b randomized clinical trial / D. S. Reich, et al. — Текст: непосредственный // The Lancet Neurology. — 2023. — № 22(9). — С. 729–738. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(21\)00237-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(21)00237-4)
17. Bruton tyrosine kinase inhibitors for multiple sclerosis / Krämer, J., Bar-Or [и др.]. — Текст: непосредственный // Nature Reviews Neurology. — 2023. — № 19(5). — С. 289–304. <https://doi.org/10.1038/s41582-023-00800-7>
18. Surrogate endpoints for EDSS worsening in multiple sclerosis / M. P. Sormani, L. Bonzano, L. Roccatagliata [и др.]. — Текст: непосредственный // Neurology. — 2010. — № 4. — С. 302–309. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181ea15aa>
19. A review of Bruton's tyrosine kinase inhibitors in multiple sclerosis / L. Airas, R. A. Bermel, T. Chitnis [и др.]. — Текст: непосредственный // CNS Neuroscience & Therapeutics. — 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38638671/>
20. Sormani, M. P. MRI lesions as a surrogate for relapses in multiple sclerosis: A meta-analysis of randomized trials / M. P. Sormani, P. Bruzzi. — Текст: непосредственный // The Lancet Neurology. — 2013. — № 12(7). — С. 669–676. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70103-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70103-0)
21. Clinical perspectives on the molecular and pharmacological attributes of anti-CD20 therapies for multiple sclerosis / Bar-Or, A., O'Brien [и др.]. — Текст: непосредственный // CNS Drugs. — 2021. — № 35(9). — С. 985–997. <https://doi.org/10.1007/s40263-021-00843-8>
22. Anti-CD20 therapies in multiple sclerosis: From pathology to the clinic / S. J. de, E. Maillart, A. Gueguen [и др.]. — Текст: непосредственный // Frontiers in Immunology. — 2023. — № 14. — С. 1004795. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1004795>
23. Contribution of relapse-independent progression vs relapse-associated worsening to overall confirmed disability accumulation in typical relapsing multiple sclerosis in a pooled analysis of 2 randomized clinical trials / L. Kappos, J. S. Wolinsky, G. Giovannoni [и др.]. — Текст: непосредственный // JAMA Neurology. — 2020. — № 77(9). — С. 1132–1140. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2020.1568>

Патофизиология изменений слизистой оболочки полости рта и слюнных желёз при паренхиматозных и обтурационных желтухах

Топчийн Диана Арташесовна, студент

Научный руководитель: Гребенникова Ирина Валерьевна, кандидат медицинских наук, доцент

Воронежский государственный медицинский университет имени Н. Н. Бурденко

В статье рассмотрены механизмы поражения слизистой оболочки полости рта и слюнных желёз у пациентов с печёночной (паренхиматозной) и подпечёночной (обтурационной) желтухами. Систематизированы данные отечественных и зарубежных исследований о роли гипербилирубинемии, холемии, цитокинового дисбаланса и холестатического зуда в формировании ксеростомии, сиаладенита и эрозивно-язвенных поражений. Приведены клинические и биохимические корреляции у больных холедохолитиазом, опухолями билиопанкреатодуоденальной зоны и хроническими вирусными гепатитами.

Ключевые слова: механическая желтуха, паренхиматозная желтуха, ксеростомия, сиаладенит, билирубин, слизистая оболочка полости рта.

Актуальность. Поражения слизистой оболочки полости рта (СОПР) и слюнных желёз при паренхиматозной и обтурационной желтухах относятся к числу закономерных, но систематически недооцениваемых клинических проявлений билиарной патологии. У 62–78 %

пациентов с заболеваниями гепатобилиарной системы регистрируются жалобы на парестезию, жжение и сухость полости рта [5]. Между тем сравнительная патофизиологическая характеристика двух форм желтухи применительно к изменениям СОПР и слюнных желёз

в отечественной литературе остаётся представленной недостаточно. Зарубежные нарративные обзоры подчёркивают, что ксеростомия, изъязвления слизистой и аномалии языка особенно часто встречаются именно при хронических болезнях печени, при этом их патогенез носит многофакторный характер [9].

Цель работы — обобщить патофизиологические механизмы поражения СОПР и слюнных желёз при паренхиматозной и обтурационной желтухах на основании данных современной отечественной и зарубежной литературы.

Желтушный синдром сопровождается избытком билирубина в крови и прокрашиванием кожи, склер и слизистых оболочек; при этом задняя треть языка и мягкое нёбо желтеют раньше прочих участков ротовой полости [7]. Обтурационная желтуха осложняет течение желчнокаменной болезни у 20–35 % госпитализированных и сопровождается летальностью 10–25 % при неопуховом генезе [4]. Частота осложнений при механической желтухе средней и тяжёлой степени варьирует в пределах 47–70 %, тогда как послеоперационная летальность в специализированных стационарах Российской Федерации в 2022–2023 гг. снижена до 3 % за счёт внедрения двухэтапной тактики лечения [3]. Стоматологические проявления билиарной патологии длительно оставались на периферии внимания хирургов, несмотря на их высокую клиническую значимость. Иктеричность уздечки языка появляется уже при уровне общего билирубина 34–43 мкмоль/л — раньше, чем окрашивание склер, что позволяет рассматривать осмотр полости рта как ранний диагностический ориентир [7].

При паренхиматозной желтухе гепатоциты утрачивают способность в полной мере захватывать, конъюгировать и экскретировать билирубин, что ведёт к смешанной гипербилирубинемии с преобладанием прямой фракции [1]. Хроническое внутрипечёночное депонирование желчи нарушает всасывание кальция и витамина D, а также снижает синтез альбумина и факторов свёртывания, что клинически выражается в кровоточивости дёсен и геморрагиях на СОПР [1]. Л. Ю. Ильченко и соавт. (2023) у 109 больных циррозом зафиксировали повышение концентрации фактора некроза опухоли (ФНО-α) в 80 раз и интерлейкина-2 (ИЛ-2) более чем в 60 раз при классе С по Чайлд — Пью [6]. Этот цитокиновый шторм запускает апоптоз базальных кератиноцитов СОПР, что проявляется атрофией нитевидных сосочков языка и характерным «лакированным» малиново-жёлтым видом его спинки [6]. У пациентов с хроническим гепатитом С (ХГС) и смешанной криоглобулинемией морфологическое исследование малых слюнных желёз выявляет воспалительную инфильтрацию и распространённый фиброз ацинарной ткани; при этом ксеростомия субклинически протекает у 73,8 % больных [2]. Параллельно возрастает концентрация иммуноглобулинов и калия в паротидной слюне при снижении натрия [2]. Кандидоз, угловой хейлит и оральный красный плоский лишай — наиболее частые патологии слизистой при данном заболевании; независимыми предикторами поражений СОПР оказались возраст старше

40 лет и генотип 1b вируса [10]. В основе подобных изменений лежат как прямые вирусные эффекты на ткани полости рта, так и иммуноопосредованные механизмы, ассоциированные с хроническим воспалением в печени [11].

Обтурационная (подпечёночная) желтуха возникает при нарушении желчеоттока вследствие холедохолитиаза, стриктур или опухолей головки поджелудочной железы и большого дуоденального сосочка [4]. В системном кровотоке накапливаются желчные кислоты, прямой билирубин и холестерин; холемия оказывает прямое цитотоксическое действие на эпителий протоков слюнных желёз [5]. Уровень общего билирубина у таких пациентов достигает 250–400 мкмоль/л, а активность аланинаминотрансферазы и аспартатаминотрансферазы (АЛТ/АСТ) превышает норму в 3–8 раз, что коррелирует с выраженностью ксеростомии [7]. При блокаде холедоха желчные кислоты проникают в слюну, изменяя её pH в щелочную сторону (до 7,6–7,9) и снижая буферную ёмкость, что создаёт условия для колонизации *Candida albicans* и развития кандидозного глоссита [5]. В ткани малых слюнных желёз при обтурационном холестазе обнаруживаются признаки реактивного паротита: у 34 из 78 обследованных больных с холедохолитиазом выявлено увеличение и болезненность околоушных желёз при пальпации [3]. Отёк слизистой подъязычной области и геморрагические петехии у данной категории пациентов являются следствием дефицита витамина К и снижения синтеза протромбина до 40–55 % от нормы [4]. В таких случаях необходим учёт внепечёночных проявлений холестаза, в том числе изменений слизистых оболочек, при ведении пациентов с генетическими и приобретёнными формами холестатических заболеваний [8].

Два типа желтухи различаются не только биохимически, но и по спектру оральных проявлений. При паренхиматозной форме доминируют иммуновоспалительные и фибротические процессы, тогда как обтурационная желтуха обуславливает более быстрое и грубое нарушение трофики слизистых. У 58 % пациентов с механической желтухой длительностью свыше 14 суток регистрируется эрозивный стоматит, тогда как при остром вирусном гепатите А аналогичная картина встречается лишь в 9–12 % наблюдений [7]. Оральный красный плоский лишай, ксеростомия, эрозии и изменения языка особенно часто встречаются при хронических болезнях печени и могут предшествовать системным проявлениям [9]. Это позволяет рассматривать стоматологический осмотр не только как элемент симптоматической помощи, но и как компонент ранней диагностики прогрессирования гепатобилиарной патологии.

Таким образом, поражение СОПР и слюнных желёз при желтухах является патогенетически закономерным следствием гипербилирубинемии, холемии и цитокинового дисбаланса. Паренхиматозная форма формирует преимущественно иммуновоспалительный и фибротический паттерн изменений, тогда как обтурационная — токсико-трофический с быстрой манифестацией ксеростомии

и эрозивно-язвенных поражений. Ранняя стоматологическая оценка пациентов с билиарной патологией целесообразна при уровне общего билирубина свыше 50 мкмоль/л и длительности желтухи более 7 суток [4, 8].

разна при уровне общего билирубина свыше 50 мкмоль/л и длительности желтухи более 7 суток [4, 8].

Литература:

1. Байкова Т. А., Лопаткина Т. Н. и др. Многообразие внепечёночных проявлений хронических вирусных гепатитов В и С: общие принципы лечения // Терапевтический архив. — 2013. — Т. 85, № 2. — С. 91–98.
2. Деркач Н. В. Состояние слюнных желёз и слизистой оболочки полости рта у больных хроническим активным гепатитом: дис.... канд. мед. наук. — М., 2020.
3. Корытцев В. К. и др. Хирургическое лечение больных с синдромом механической желтухи, вызванной холедохолитиазом // Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 112–119.
4. Механическая желтуха неопухолевого генеза: клинические рекомендации Российского общества хирургов. — М., 2023–2024. — 78 с.
5. Трухан Д. И., Сулимов А. Ф., Лебедев О. И., Трухан Л. Ю. Изменения кожи, слизистой полости рта и органа зрения при заболеваниях гепатобилиарной системы и поджелудочной железы // Справочник поликлинического врача. — 2018. — № 2. — С. 17–23.
6. Ильченко Л. Ю. и др. Цитокины при циррозе печени (их значение в оценке активности процесса) // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. — 2023. — № 9 (217). — С. 42–49.
7. Скуратов А. Г., Призенцов А. А., Осипов Б. Б. Механическая желтуха: учебно-методическое пособие. — Гомель: ГомГМУ, 2010. — 48 с.
8. European Association for the Study of the Liver. EASL Clinical Practice Guidelines on genetic cholestatic liver diseases // Journal of Hepatology. — 2024. — Vol. 81, № 2. — P. 303–325. — DOI: 10.1016/j.jhep.2024.04.006.
9. Åberg F, Helenius-Hietala J. Oral Health and Liver Disease: Bidirectional Associations — A Narrative Review // Dentistry Journal. — 2022. — Vol. 10, № 2. — P. 16. — DOI: 10.3390/dj10020016.
10. Brzdęk M., Gałuszka-Garnuszek J., Dobrowolska K. et al. Oral manifestations in patients with chronic hepatitis C // BMC Oral Health. — 2025. — Vol. 25. — Art. 944. — DOI: 10.1186/s12903-025-06307-5.
11. Di Stasio D., Guida A., Romano A. et al. Hepatitis C Virus (HCV) Infection: Pathogenesis, Oral Manifestations, and the Role of Direct-Acting Antiviral Therapy: A Narrative Review // Journal of Clinical Medicine. — 2024. — Vol. 13, № 14. — P. 4012. — DOI: 10.3390/jcm13144012.

Искусственный интеллект в микробиологии: новые горизонты исследований

Шаповалова Ясемин Исаевна, студент;

Харина Дарья Андреевна, студент

Научный руководитель: Заболотская Татьяна Григорьевна, кандидат биологических наук, старший преподаватель

Ижевский государственный медицинский университет

Современная микробиология переживает этап экспоненциального накопления данных, которые традиционные статистические методы обрабатывают с трудом. В настоящей работе представлен анализ применения искусственного интеллекта (ИИ) для прогнозирования устойчивости к антибиотикам, изучения микробиома человека и биоинформатического анализа. Особое внимание уделено разработке чат-бота «МикроБиоПомощник», предназначенного для повышения санитарной грамотности населения. Показано, что методы машинного обучения достигают точности до 92 % при оценке патологических состояний микробиоты, а интеллектуальные помощники трансформируют работу клинических микробиологов. Выявлен значительный разрыв между доступностью профессиональных ИИ-сервисов и проверенных источников для широкой публики; предложен путь его преодоления.

Ключевые слова: искусственный интеллект, микробиология, антибиотикорезистентность, машинное обучение, микробиом, чат-бот, санитарная грамотность.

Современная микробиология столкнулась с ситуацией, когда данных стало слишком много. Высокопроизводительные методы секвенирования, метагеномика, протеомика генерируют огромные массивы информации. Обычные статистические методы с такими объёмами справляются плохо [1, 2]. В этих условиях искусственный

интеллект становится не просто полезным дополнением, а необходимым инструментом. Он способен находить скрытые закономерности, предсказывать устойчивость бактерий к антибиотикам, выявлять редких возбудителей и моделировать взаимодействие микроорганизмов с организмом человека [3].

Данная работа посвящена анализу применения искусственного интеллекта в микробиологии, оценке существующих методов и программ, а также разработке чат-бота «МикроБиоПомощник» для повышения санитарной грамотности населения.

Актуальность

Актуальность работы определяется двумя причинами [4]. Первая — лавинообразный рост данных в микробиологии, который требует новых методов обработки. Вторая — необходимость быстро прогнозировать устойчивость бактерий к антибиотикам, особенно в условиях распространения опасных штаммов, когда традиционный анализ даёт слишком большое запаздывание.

Цель и задачи

Цель исследования — обзор технологий искусственного интеллекта в микробиологии и разработка чат-бота «МикроБиоПомощник». Для достижения цели решены следующие задачи: проведён анализ современных методов машинного обучения в микробиологии; исследована роль искусственного интеллекта в диагностике инфекционных заболеваний; определены перспективные направления; выполнена оценка существующих программных платформ; разработан чат-бот; сформулированы выводы.

Основная часть

1. Прогнозирование устойчивости к антибиотикам

Одной из самых серьёзных проблем современной медицины является распространение бактерий, устойчивых к антибиотикам. В 2025 году российские исследователи разработали систему, которая позволяет прогнозировать рост такой устойчивости на национальном уровне [5]. В исследовании использованы данные о потреблении антибиотиков в 82 регионах России за 14 лет, а также сведения об уровне устойчивости бактерий за тот же период. Среди нескольких методов машинного обучения наилучший результат показал так называемый метод градиентного бустинга (техника машинного обучения для задач классификации и регрессии, которая строит модель предсказания в форме ансамбля слабых предсказателей, обычно деревьев решений). Для пары «кишечная палочка — цефотаксим» точность прогноза достигла 66,6 %, а площадь под ROC-кривой (график, позволяющий оценить качество модели классификации; по оси ординат — частота истинно положительных результатов, по оси абсцисс — частота ложноположительных результатов) превысила 0,85 — это считается очень хорошим показателем [6].

Модель позволила установить, что ключевыми факторами роста устойчивости являются не только текущий объём потребления антибиотиков, но и данные за предыдущие годы (эффект накопления), а также тип инфекции (внебольничная или внутрибольничная). С помощью

компьютерного моделирования показано, что замена одних антибиотиков на другие позволяет снизить уровень устойчивости на 15–20 % в течение десяти лет [5].

Параллельно развиваются подходы к усилению действия уже существующих антибиотиков. Учёные Университета ИТМО создали платформу для предсказания эффективности комбинаций наночастиц и антибиотиков [7]. Платформа обучена на данных из более чем ста научных работ. Выявленное сочетание золотых наночастиц с хлорамфениколом позволило снизить необходимую дозу антибиотика для сальмонеллы в четыре раза, а серебряные наночастицы с амикацином вернули чувствительность к лекарству устойчивых штаммов клебсиеллы.

2. Анализ микробиома

Микробиом человека — это совокупность всех микроорганизмов, живущих в организме. Анализ этих данных сопряжён с большими сложностями: сотни видов бактерий, тысячи взаимодействий между ними, данные часто неполны и искажены. Обычные статистические методы в таких условиях часто ошибаются [8]. Публикация в авторитетном журнале *Gut* в 2025 году фиксирует смену подхода: искусственный интеллект становится основным методом анализа микробиома [9]. Нейронные сети позволяют рассматривать микробиом не как набор отдельных видов, а как единую сеть взаимосвязей.

Примером служит работа специалистов Курского государственного медицинского университета [10]. В отличие от большинства исследований, которые изучают микробы в полости кишки, курские учёные исследовали пристеночный слой — тот, который непосредственно контактирует со стенкой кишечника и играет ключевую роль в иммунитете. Используя методы секвенирования и масс-спектрометрии, они создали базу данных из более чем 500 образцов. На основе этих данных обучена модель, способная с точностью 92 % отличать нормальное состояние микробиоты от состояния стресса, вызванного антибиотиками, неправильным питанием или хроническим воспалением. Разработано веб-приложение, позволяющее врачу загрузить данные образца и быстро получить оценку состояния микробиоты [10].

Для более глубокого анализа структуры микробных сообществ создан инструмент *MiCoDe*, который строит карту взаимодействий между бактериями и автоматически определяет устойчивые группы [11]. Инструмент решает ключевые проблемы микробиомных данных: отсеивает ошибки секвенирования и корректно обрабатывает разреженные данные.

3. Развитие вычислительных ресурсов и интеллектуальных систем

Ресурс BV-BRC представляет собой единую платформу, объединяющую данные из множества источников [12]. Он содержит более 14 миллионов общедоступных ге-

номов бактерий, архей и вирусов и предлагает 33 сервиса для биоинформатического анализа. Ключевым нововведением 2024–2025 годов стал запуск интеллектуального помощника, с которым можно общаться на обычном языке. Исследователь может просто написать запрос, например: «Найти все геномы клебсиеллы с геном устойчивости NDM-1, выделенные в Европе в 2023 году», — и система выполнит этот запрос, объяснит результат и предложит дальнейшие действия. Это значительно упрощает работу для клинических микробиологов и эпидемиологов, которые не владеют навыками программирования [12].

Созданы также модели искусственного интеллекта для работы с белками. Одна из таких моделей (ESM-2, Meta) обучена на 50 миллионах белковых последовательностей [13]. Она позволила предсказать структуру более 617 миллионов белков из метагеномных данных — то есть белков микроорганизмов, которые вообще не растут в лабораторных условиях. Создан крупнейший в истории атлас белков. Другая модель (ProGen, Salesforce) способна не просто анализировать, а создавать новые последовательности ДНК, включая синтетические системы редактирования генома, не существующие в природе [14].

4. Разработка чат-бота «МикроБиоПомощник»

Анализ современных тенденций показывает, что инструменты искусственного интеллекта в микробиологии становятся всё более сложными и ориентированы исключительно на профессионалов [15]. При этом существует явный разрыв между наличием высокоточных профессиональных систем и отсутствием доступных, проверенных сервисов для широкой публики.

Для преодоления этого разрыва разработан чат-бот «МикроБиоПомощник». В отличие от универсальных чат-ботов, которые могут давать противоречивые или недостоверные ответы, данный бот работает только на основе проверенных источников: клинических рекомендаций Министерства здравоохранения, данных Всемирной организации здравоохранения, учебников по медицинской микробиологии и научных статей.

Технически бот устроен следующим образом. Все проверенные источники загружены в базу данных (векторное хранилище на основе эмбедингов). Когда пользователь задаёт вопрос, система находит наиболее подходящие фрагменты из этих источников и формулирует ответ строго на их основе, указывая, откуда взята информация. Это исключает выдумывание ответов — так называемые галлюцинации нейросетей [16].

Функциональные возможности бота включают четыре направления.

Литература:

1. Шривастава, А. Искусственный интеллект в микробиологии / А. Шривастава. — London: Academic Press, 2025.
2. Двибеди, В. Биоинформатика, искусственный интеллект и машинное обучение при разработке микробных лекарств / В. Двибеди. — London: Academic Press, 2024.

Первое — объяснение правил приёма антибиотиков: почему важно соблюдать интервалы, почему нельзя прерывать курс, как проверить совместимость с другими лекарствами.

Второе — санитарно-гигиеническое просвещение: как правильно обрабатывать раны, при какой температуре стирать бельё для уничтожения бактерий, как выбирать антисептики.

Третье — образование в области микробиома: разъяснение, что такое дисбактериоз на самом деле (этого диагноза в международной классификации нет), какие пробиотики имеют доказанную эффективность, как питание влияет на кишечную микрофлору.

Четвёртое — помощь в понимании результатов анализов: бот объясняет, что означают цифры и латинские названия в бланке, снижает излишнюю тревожность и подсказывает, какие вопросы задать лечащему врачу [17].

Бот работает в мессенджере Telegram, что не требует установки дополнительных приложений. Важное ограничение: бот не ставит диагнозы и не назначает лечение. Каждый ответ содержит предупреждение о необходимости личной консультации с врачом. Бот не требует ввода персональных данных.

Заключение

Проведённый анализ позволяет сделать следующие выводы.

Методы машинного обучения, в частности градиентный бустинг, эффективно решают задачи прогнозирования устойчивости к антибиотикам и анализа микробных данных, достигая точности до 92 % при выявлении патологических состояний [5, 10].

Современные вычислительные ресурсы (BV-BRC) и интеллектуальные помощники трансформируют биоинформатику, делая её доступной для клинических специалистов, не владеющих программированием. Модели для работы с белками открывают возможности для конструирования синтетических биологических систем [12–14].

Выявлен значительный разрыв в доступности проверенных микробиологических знаний для населения. Для его преодоления разработан чат-бот «МикроБиоПомощник» на основе технологии принудительного использования проверенных источников. Данное решение способствует сдерживанию устойчивости к антибиотикам за счёт повышения грамотности пациентов и снижению нагрузки на систему здравоохранения [17].

Перспективным направлением является добавление в бота прогностических модулей для индивидуальной оценки риска инфицирования устойчивыми штаммами.

3. Zhang, Y. Machine Learning in Bioinformatics / Y. Zhang, J. C. Rajapakse. — Hoboken: Wiley, 2009. — 468 p. — ISBN 978-0-470-11662-3.
4. Часовских, Н. Ю. Биоинформатика: учеб. пособие / Н. Ю. Часовских. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 104 с. — ISBN 978-5-7996-2355-5.
5. Bundschuh, R. Computational Biology: A Statistical Mechanics Perspective / R. Bundschuh. — 2nd ed. — Boca Raton: CRC Press, 2022. — 364 p. — ISBN 978-0-367-75801-7.
6. Миронов, А. А. Биоинформатика: гены и белки / А. А. Миронов. — 2-е изд., испр. — Москва: Лаборатория знаний, 2015. — 420 с. — ISBN 978-5-9963-2688-4.

ФАРМАЦИЯ И ФАРМАКОЛОГИЯ

Ингибиторы CaV3.2: новая надежда в лечении остеоартритной боли

Нух Бассам, студент;

Абдэльфаттах Мохамед Эльсайед Эльшахат, студент

Научный руководитель: Грачева Наталья Николаевна, кандидат фармацевтических наук, доцент;

Научный руководитель: Лебедев Александр Валерьевич, кандидат биологических наук, доцент, зав. кафедрой
Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева

Остеоартрит (ОА) является наиболее распространённым заболеванием опорно-двигательного аппарата, поражающим миллионы людей во всём мире. Боль при ОА остаётся основной причиной обращения за медицинской помощью, однако существующие методы лечения (нестероидные противовоспалительные препараты, опиоиды, внутрисуставные инъекции) характеризуются ограниченной эффективностью и/или выраженными побочными эффектами. В последние годы особое внимание исследователей привлекают низковольтажные Т-типы кальциевых каналов, в частности подтип CaV3.2, которые играют ключевую роль в регуляции возбудимости нейронов первичных афферентных путей. В данном обзоре рассматривается роль CaV3.2-каналов в патогенезе боли при ОА, анализируются доклинические данные об эффективности их ингибиторов (этосуксимид, ТТА-А2, ТТА-Р2, CaV3.2-ингибирующие пептидные аптамеры), а также обсуждаются перспективы использования CaV3.2-ингибиторов как нового класса анальгетиков для лечения хронической боли у пациентов с ОА.

Ключевые слова: остеоартрит, CaV3.2, Т-тип кальциевых каналов, хроническая боль, этосуксимид, таргетная терапия, дорсальные корешки, первичные сенсорные нейроны.

CaV3.2 inhibitors: a new hope in the treatment of osteoarthritic pain

Bassam Nuh Nuh, student;

Abdelfattah Mohamed Elsayed Elshahat, student

Scientific advisor: Gracheva Natalia Nikolaevna, ph.d. in pharmacy, associate professor;

Scientific advisor: Lebedev Alexander Valerievich, candidate of biological sciences, associate professor, head of department
Orel State University named after IS Turgenev (Eagle)

Osteoarthritis (OA) is the most common disease of the musculoskeletal system, affecting millions of people worldwide. Pain remains the primary reason patients seek medical help. However, existing treatments (non-steroidal anti-inflammatory drugs, opioids, intra-articular injections) are characterized by limited efficacy and/or severe side effects. Recently, low-voltage activated T-type calcium channels, specifically the CaV3.2 subtype, have emerged as key players in regulating the excitability of primary afferent neurons. This review examines the role of CaV3.2 channels in the pathogenesis of OA pain, analyzes preclinical data on the efficacy of their inhibitors (ethosuximide, TTA-A2, TTA-P2, CaV3.2-inhibiting peptide aptamers), and discusses the prospects of using CaV3.2 inhibitors as a new class of analgesics for treating chronic pain in OA patients.

Keywords: osteoarthritis, CaV3.2, T-type calcium channels, chronic pain, ethosuximide, targeted therapy, dorsal root ganglia, primary sensory neurons.

Введение

Остеоартрит представляет собой глобальную медико-социальную проблему. Согласно данным Global Burden of Disease Study, распространённость ОА в мире превышает 500 миллионов человек, причём наиболее часто поражаются коленные и тазобедренные суставы. В Российской Федерации, по данным официальной статистики, ОА диагностирован примерно у 10–12 % взрослого населения, однако реальные цифры могут быть значительно выше вследствие поздней обращаемости и недостаточной диагностики.

Боль является доминирующим симптомом ОА и основной причиной, по которой пациенты обращаются за медицинской помощью. По мере прогрессирования заболевания боль приобретает хронический характер, что приводит к снижению физической активности, нарушению сна, тревожно-депрессивным расстройствам и значительному ухудшению качества жизни [1].

Несмотря на высокую распространённость ОА-боли, существующие терапевтические подходы остаются далеко не идеальными. **Нестероидные противовоспалительные препараты (НПВП)** — основной класс средств для купирования ОА-боли — ассоциированы с риском желудочно-кишечных кровотечений, нефротоксичности и кардиоваскулярных осложнений. **Опиоидные анальгетики** эффективны лишь у части пациентов и сопряжены с риском развития зависимости, запоров, седации и угнетения дыхания. **Внутрисуставные инъекции кортикостероидов** дают лишь временный эффект и не рекомендуются для длительного применения. **Хирургическое лечение** (эндопротезирование) — крайняя мера, доступная не всем пациентам [1, 2].

Таким образом, существует **острая неудовлетворённая клиническая потребность** в разработке новых классов анальгетиков с принципиально иными механизмами действия, лишённых недостатков существующих препаратов. [9]

Основная часть

1. Патофизиология боли при остеоартрите: от сустава к нейрону

Долгое время считалось, что боль при ОА обусловлена исключительно механическими факторами — трением повреждённых суставных поверхностей и раздражением болевых рецепторов в синовиальной оболочке. Однако в последние десятилетия стало очевидно, что патогенез ОА-боли значительно сложнее и включает несколько взаимосвязанных компонентов [7, 8].

Периферическая сенситизация происходит в первичных афферентных нейронах, иннервирующих сустав. Воспалительные медиаторы (простагландины, цитокины, фактор некроза опухоли альфа, нервный фактор роста), выделяющиеся в повреждённом суставе, снижают порог возбуждения ноцицепторов, вследствие чего даже неболевые стимулы (например, обычное движение) начинают восприниматься как болевые.

Однако наиболее важным для понимания хронической боли при ОА является феномен **центральной сенситизации**. Постоянная ноцицептивная импульсация из повреждённого сустава приводит к стойким изменениям в нейронах задних рогов спинного мозга (так называемый «wind-up»-феномен) и вышележащих отделах центральной нервной системы. В результате формируется состояние генерализованной болевой гиперчувствительности, при котором болевые ощущения возникают не только в поражённом суставе, но и в отдалённых областях тела [7, 11].

Клинически это проявляется феноменом **«отражённой боли»** (referred pain): пациенты с гонартрозом (ОА коленного сустава) часто предъявляют жалобы на боли в пояснице, бедре или голени, причём интенсивность этих болей может не коррелировать со степенью суставных изменений по данным рентгенографии.

Именно на уровне центральной сенситизации важнейшую роль играют потенциалзависимые кальциевые каналы Т-типа [2, 5].

2. CaV3.2-каналы: структура, функция и роль в ноцицепции

2.1. Общая характеристика Т-типа кальциевых каналов

Потенциалзависимые кальциевые каналы подразделяются на высоковольтажные (L-, N-, P/Q- и R-типы), активирующиеся при значительной деполяризации мембраны, и **низковольтажные Т-типа** (CaV3.1, CaV3.2, CaV3.3), которые открываются уже при небольших изменениях мембранного потенциала, близких к потенциалу покоя [2].

Благодаря этой особенности Т-каналы играют уникальную роль в регуляции возбудимости нейронов:

- Они генерируют **пачечную активность** (burst firing) — характерный паттерн разрядов, при котором нейрон генерирует серию потенциалов действия с высокой частотой;
- Они усиливают **посттетаническую потенцию** — механизм, лежащий в основе синаптической пластичности и центральной сенситизации;
- Они облегчают вход кальция в пресинаптическое окончание, способствуя высвобождению нейротрансмиттеров (глутамата, субстанции Р) [5].

2.2. CaV3.2 — ключевой подтип для болевой чувствительности

Среди трёх изоформ Т-каналов именно **CaV3.2** наиболее широко представлен в ноцицептивных (болевых) нейронах — как в соматических клетках дорсальных корешков (ДК), так и на их периферических и центральных терминалях [5,11].

При хронической боли (в том числе при ОА) происходит:

Повышение экспрессии CaV3.2-каналов в нейронах ДК;

Увеличение Т-тока через эти каналы;

Снижение порога активации нейронов.

В исследовании Shin и соавторов (2020) было показано, что на модели МХУ (моноиодацетата натрия) — классической модели ОА-боли — Т-ток в нейронах ДК возрастал в 2–3 раза по сравнению с контролем, а уровень белка CaV3.2 был значительно повышен [11].

2.3. CaV3.2 и нейропатический компонент ОА-боли

Важнейшее открытие последних лет заключается в том, что ОА-боль имеет не только воспалительный, но и выраженный **нейропатический компонент**. Это означает, что помимо активации ноцицепторов воспалительными медиаторами происходит прямое повреждение нервных волокон, иннервирующих сустав [7, 11].

Маркером нейронального повреждения является белок **ATF-3** (activating transcription factor 3), который практически не экспрессируется в здоровых нейронах, но резко индуцируется при аксональном повреждении. В работе Shin и соавторов (2020) показано, что после введения МХУ в коленный сустав у крыс ATF-3 экспрессировался не только в нейронах, иннервирующих сустав, но и в соседних нейронах, что свидетельствует о распространённом повреждении нервной ткани [11].

Именно CaV3.2-каналы вносят ключевой вклад в формирование **нейропатической боли** при ОА, что открывает новые терапевтические возможности.

3. Ингибиторы CaV3.2: от лаборатории к клинике

3.1. Классификация ингибиторов CaV3.2

В настоящее время существует несколько классов соединений, способных блокировать CaV3.2-каналы.

Таблица 1. Соединения, способные блокировать CaV3.2-каналы

Класс	Примеры	Механизм действия	Стадия разработки
Противоэпилептические препараты	Этосуксимид (ЕТХ)	Неселективная блокада Т-каналов	Перепрофилирование (FDA approved)
Синтетические малые молекулы	ТТА-A2, ТТА-P2	Селективная блокада Т-каналов	Доклинические исследования
Пептидные аптамеры	CaV3.2iPA1, CaV3.2iPA2	Высокоселективное ингибирование	Доклинические исследования (AAV-доставка)

3.2. Этосуксимид (ЕТХ) — перспективное перепрофилирование

Этосуксимид — классический противоэпилептический препарат, применяемый для лечения абсансной эпилепсии (пик-волновые разряды на ЭЭГ). Его основной механизм действия — блокада Т-типа кальциевых каналов в таламических нейронах.

В работе Gousseau и соавторов (2024), представленной на Международном конгрессе IASP, было показано, что **этосуксимид эффективно купирует ОА-боль на модели ДММ** (дестабилизация медиального мениска) у мышей [1].

Ключевые результаты исследования:

— Однократная внутривентрикулярная инъекция этосуксимида снижала механическую гиперчувствительность (тест фон Фрея) у мышей с ОА;

— Хроническое введение этосуксимида (ежедневно, начиная с 14-го дня после ДММ) не только **облегчало уже развившуюся боль**, но и **предотвращало её развитие** при раннем начале терапии;

Авторы делают вывод, что этосуксимид — **многообещающий кандидат для клинических испытаний** при ОА-боли [1].

3.3. ТТА-P2: селективный блокатор с периневральной доставкой

ТТА-P2 — синтетическое соединение, разработанное как селективный блокатор Т-типа кальциевых каналов. Его преимущество перед этосуксимидом — более высокая селективность (меньше внецелевых эффектов) [11].

В исследовании Shin и соавторов (2020) ТТА-Р2 вводили периневрально (вокруг седалищного нерва) крысам с МХУ-индуцированным ОА. Результаты показали:

- Снижение механической гипералгезии;
- Восстановление симметричности распределения веса (показатель, коррелирующий со спонтанной болью);
- Отсутствие системных побочных эффектов благодаря локальному способу введения [11].

4. Генетическая терапия: CaV3.2-ингибирующие пептидные аптамеры

Наиболее инновационным подходом является использование **CaV3.2-ингибирующих пептидных аптамеров (CaV3.2iPA)** — коротких пептидов, которые связываются с CaV3.2-каналом и специфически блокируют его активность [3,12].

4.1. Технология AAV-доставки

Пептидные аптамеры сами по себе не могут проникнуть в клетку. Для их доставки в нейроны дорсальных корешков используется **аденоассоциированный вирус (AAV)** — вектор, который:

- Безопасен (не встраивается в геном, не вызывает онкогенеза);
- Обеспечивает длительную экспрессию (месяцы);
- Позволяет таргетную доставку в определённые популяции нейронов.

4.2. Результаты доклинических исследований

В работе Itson-Zoske и соавторов (2022) AAV, кодирующий CaV3.2iPA2, вводили непосредственно в поясничные дорсальные корешки (L4/L5) крысам с МХУ-индуцированным ОА [3,12].

Полученные результаты

Таблица 2. Результаты доклинических исследований

Показатель	Контроль (голый AAV)	Лечение (AAV-CaV3.2iPA2)
Механическая гипералгезия (порог, г)	2–4 г	10–12 г (нормализация)
Тепловая гипералгезия	Выраженная	Отсутствует
Спонтанная боль (условное предпочтение места)	Избегание болевого компартмента	Нет предпочтения
Асимметрия распределения веса	60–70 % на здоровую конечность	50–50 % (симметрично)

Кроме того, patch-clamp-запись показала, что экспрессия CaV3.2iPA2 **нормализует гипервозбудимость** первичных сенсорных нейронов, которая развилась на фоне ОА [3].

Вывод авторов: CaV3.2iPA представляет собой «перспективные анальгетические лидерные соединения» для лечения хронической ОА-боли, особенно у пациентов, резистентных к существующей терапии [12].

5. Перспективы и вызовы

5.1. Преимущества CaV3.2-ингибиторов

По сравнению с существующими анальгетиками, CaV3.2-ингибиторы обладают рядом потенциальных преимуществ:

Принципиально новый механизм действия — модуляция центральной сенситизации, а не просто периферического воспаления;

Эффективность при нейропатическом компоненте — который не купируется НПВП и опиоидами;

Отсутствие опиоидных побочных эффектов (зависимость, седация, угнетение дыхания);

Возможность локальной доставки — периневральное введение ТТА-Р2 или интратекальное введение AAV-векторов позволяет минимизировать системные эффекты [11].

5.2. Ограничения и нерешённые вопросы

Несмотря на многообещающие доклинические данные, существуют серьёзные вызовы на пути внедрения CaV3.2-ингибиторов в клинику:

Недостаток клинических данных — на сегодняшний день опубликованы только доклинические исследования на грызунах. Клинические испытания на людях ещё не проводились [3,12].

Селективность — Т-тип каналов экспрессируются не только в ноцицептивных нейронах, но и в кардиомиоцитах, гладкомышечных клетках и эндокринных клетках. Блокада этих каналов может вызывать нежелательные эффекты (например, аритмии).

Биодоступность — этосуксими́д хорошо проникает через ГЭБ, однако для новых соединений (ТТА-А2, ТТА-Р2) фармакокинетические свойства ещё недостаточно изучены [5].

5.3. Что дальше?

Ближайшие направления исследований включают:

- Проведение рандомизированных клинических испытаний этосуксимида (препарат уже одобрен FDA для эпилепсии, что ускорит перепрофилирование) [10]
- Разработка пероральных форм селективных CaV3.2-блокаторов с улучшенной биодоступностью;
- Оптимизация AAV-векторов для безопасной и эффективной генной терапии хронической боли.

Заключение

Подводя итог данному обзору, можно утверждать, что **ингибиторы CaV3.2-каналов представляют собой новую надежду в лечении остеоартритной боли** — состояния, при котором существующая терапевтическая оптика остаётся крайне ограниченной.

CaV3.2-каналы играют ключевую роль в регуляции возбудимости первичных сенсорных нейронов и центральной сенситизации, что делает их логичной мишенью для вмешательства.

На доклинических моделях ОА-боли убедительно продемонстрировано, что как фармакологическая (этосуксими́д, ТТА-Р2), так и генетическая (CaV3.2iPA) блокада CaV3.2 приводит к значительному облегчению как вызванной (механической, термической), так и спонтанной боли [1, 3].

Особый интерес представляет **перепрофилирование этосуксимида**, поскольку этот препарат уже одобрен для клинического применения и его профиль безопасности хорошо изучен.

Генная терапия с использованием AAV-векторов открывает захватывающие перспективы для пациентов с тяжёлой, рефрактерной к лечению ОА-болью, хотя до её клинического внедрения потребуются годы дополнительных исследований.

Таким образом, CaV3.2-ингибиторы могут стать тем самым «прорывом» (breakthrough therapy), которого так долго ждали врачи и пациенты с остеоартритом.

Литература:

1. Gousseau P., Ourties G., Jouffre B., et al. Cav3.2 Calcium Channels: a Novel Target to Treat Osteoarthritis Pain. IASP World Congress on Pain. 2024. Poster Presentation [1].
2. Patel R., Dickenson A. H. Voltage gated sodium and calcium channel blockers for the treatment of chronic inflammatory pain. Neuroscience Letters. 2013;557(Pt A):19–26 [2].
3. Itson-Zoske B., Shin S. M., Xu H., et al. Selective block of sensory neuronal T-type/Cav3.2 activity mitigates neuropathic pain behavior in a rat model of osteoarthritis pain. Arthritis Research & Therapy. 2022;24:168 [3].
4. Snutch T. P., Zamponi G. W. Recent advances in the development of T-type calcium channel blockers for pain intervention. British Journal of Pharmacology. 2018;175(12):2375–2383 [5].
5. Shin S. M., Itson-Zoske B., Fan F., et al. Enhanced T-type calcium channel 3.2 activity in sensory neurons contributes to neuropathic-like pain of monosodium iodoacetate-induced knee osteoarthritis. Molecular Pain. 2020;16:1–15 [9].
6. Tang Y. Cav3 Channel Blockers Can Reduce Cartilage Degeneration in Knee Osteoarthritis / Y. Tang, T. Yu // Advances in Clinical Medicine. — 2024. — Vol. 14, No. 8. — P. 110–116. — DOI: 10.12677/acm.2024.1482188. — URL: <https://www.oalib.com/paper/6833673>
7. Hunter D. J., McDougall J. J., Keefe F. J. The symptoms of osteoarthritis and the genesis of pain. Medical Clinics of North America. 2009;93(1):83–100 [8].
8. Fu K., Robbins S. R., McDougall J. J. Osteoarthritis: the genesis of pain. Rheumatology. 2018;57(suppl_4):iv43–iv50.
9. Грачева Н. Н., Самошенкова И. Ф., Кондратова Д. В., Гуцына А. А., Воротников Д. А. Правовое регулирование производства лекарственных средств в РФ: тенденции и перспективы «модернизационной» политики. Известия ГГТУ. Медицина, фармация. 2026. N- 1(25). С 96–101.

10. Грачева Н. Н., Кондратова Д. В., Сизова И. Ю., Самошенкова И. Ф., Пазен С. Н. Анализ обеспечения экономической безопасности фармацевтической промышленности в новых экономических условиях. Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технология. 2024. N- 5. С. 413–421.
11. Fu L. Application, Development History, and Current Status of T-Type Calcium Channel Inhibitors in Pain Treatment / L. Fu, W. Huang, C. Xu, Y. Zhou, H. Qin, Z. Xiao // Authorea. — 2025. — DOI: 10.22541/au.176615519.93545893/v1. — URL: <https://flame-challenge.authorea.com/doi/full/10.22541/au.176615519.93545893/v1>
12. Zhou R., Fu W., Vasylyev D., et al. Ion channels in osteoarthritis: emerging roles and potential targets. *Nature Reviews Rheumatology*. 2024;20:545–564.

ГЕОЛОГИЯ

Геологическое строение и нефтеносность Приобского нефтяного месторождения

Абзалилов Эдуард Рамилевич, студент
Уфимский университет науки и технологий

Приобское нефтяное месторождение относится к числу крупнейших уникальных объектов освоения углеводородного сырья в России. Геологическое строение месторождения характеризуется сложной структурой продуктивных горизонтов, приуроченных преимущественно к неокомским и среднеюрским отложениям. Промышленная нефтеносность установлена в пластах группы АС, где сосредоточено до 90 % разведанных запасов. Низкопроницаемые коллекторы с литологически экранированными залежами формируют особые условия разработки, требующие применения современных технологий интенсификации добычи — от гидроразрыва пласта до многостадийных горизонтальных скважин. Разработка запасов осложняется клиноформным строением пластов, неравномерным распределением фильтрационно-емкостных свойств и высокой обводненностью продукции.

Ключевые слова: Приобское месторождение, неокомский комплекс, клиноформы, продуктивные пласты АС, литологические ловушки, гидроразрыв пласта, низкопроницаемые коллекторы.

Тектоническая позиция и структурный план месторождения

Приобское нефтяное месторождение расположено в пределах Фроловской мегавпадины — зоны сочленения Ханты-Мансийской впадины, Ляминского мегапрогиба и Салымского мегавала.

Территория месторождения разделена рекой Обь на лево- и правобережную. Около 80 % площади находится в пойме, регулярно затопливаемой. [2]. Особенностью геологического строения мезозойского чехла является развитие валанжин-готеривских клиноформных линз, падающих на запад и восток.

Стратиграфия и литология продуктивных толщ

Нефтеносность месторождения связана с отложениями осадочного чехла от среднеюрского до аптского возраста, охватывающими толщину более 2,5 км. Продуктивные пласты залегают на глубине 2400–2600 м при пластовой температуре 88–90°C [3]. Основные объекты разработки сосредоточены в неокомских пластах группы АС, выделяемых между пимской и быстринской пачками глин.

В составе продуктивных отложений верхневартовской свиты выделено 9 объектов: — АС12₃; — АС12₂; — АС11₂₋₄; — АС11₁; — АС11₀; — АС10₁₋₂; — АС10₀; — АС9; — АС7. Залежи пластов АС7 и АС9 не представляют промышленного интереса из-за низких коллекторских свойств [4].

Коллекторы — песчаники кварц-полевошпатовые, мелкозернистые. Эффективные нефтенасыщенные толщины варьируют от 0,4 до 55,7 м, в среднем 13 м. Значительная доля разреза характеризуется низкой проницаемостью — от 0,1 до 8×10^{-3} мкм² [6].

Характер залежей и природа нефтеносности

Все залежи относятся к литологическим или структурно-литологическим типам и характеризуются как сложно-построенные. Отсутствие пластовой воды при испытаниях доказывает, что залежи представляют собой замкнутые линзовидные тела, полностью заполненные углеводородами.

Средняя плотность нефти составляет 0,863–0,868 г/см³, содержание парафинов умеренное (2,4–2,5 %), серы — 1,2–1,3 %. Вязкость пластовой нефти 1,4–1,6 мПа·с [3].

Фильтрационно-емкостные свойства коллекторов

Коллекторы Приобского месторождения характеризуются низкой проницаемостью, высоким уровнем глинизации. Проницаемость более 20×10^{-3} мкм² встречается редко — на левобережье занимают 11–13 % толщины, на правобережье практически отсутствует [5].

Присутствие порово-трещиноватых коллекторов отрицательно влияет на заводнение: вода движется по промытым каналам, минуя значительные объемы низкопроницаемой матрицы, что приводит к росту обводненности при низком КИН [4].

Технологии разработки и методы интенсификации добычи

Гидро разрыв пласта (ГРП) является наиболее эффективным в условиях низкопроницаемых коллекторов. В 2006 году на Приобском месторождении был проведен крупнейший в России гидро разрыв с закачкой 864 т пропанта.

Для месторождения характерна девятиточечная система разработки. Давление смыкания трещин ГРП варьируется: — по АС₁₀ в среднем 404–454 атм; — АС₁₁ — 398–441 атм; — АС₁₂ — 411–476 атм.

Запасы и ресурсный потенциал

Геологические запасы оцениваются в 5 млрд т. Балансовые запасы категории С₁ составляют 1827,8 млн т, извлекаемые — 565,0 млн т, КИН(0,309). С₂ составляют 524 млн т, извлекаемые — 49 млн т при коэффициенте 0,093 [1].

Литература:

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ в 2023 году ФГБУ «Росгеолфонд», 2024 г.
2. Бочкарев, В. С. Тектоника платформенного чехла Западно-Сибирской плиты / В. С. Бочкарев. — Тюмень: Тюменьгеология, 1992. — 78 с.
3. Методические указания по проектированию разработки нефтяных и газонефтяных месторождений: РД 153–39.0–109–01: утверждены Министерством энергетики РФ 05.02.2001. — Москва: ВНИИнефть, 2001. — 123 с.
4. Мищенко, И. Т. Скважинная добыча нефти: учебное пособие для вузов / И. Т. Мищенко. — Москва: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. — 816 с.
5. О механизме формирования разреза неокомских отложений Среднего Приобья / А. Л. Наумов, Т. М. Онищук, П. Н. Биншток // Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений. — 1977. — № 1. — С. 13–19.
6. Приобская нефтеносная зона Западной Сибири. Системно-литологический аспект/ Ю. Н. Кародин, С. В. Ершов, В. С. Сафонов и др. — Новосибирск: из-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. — 252 с.

Промышленная нефтеносность установлена в пластах группы АС, где сосредоточено 90 % разведанных запасов.

Заключение

Приобское нефтяное месторождение представляет собой уникальный объект с запасами категории С₁ свыше 1,8 млрд т. Геологическое строение характеризуется сложной структурой продуктивных горизонтов неокомского и среднеюрского возраста, приуроченных к клиноформным отложениям.

Низкопроницаемые коллекторы с литологически экранированными залежами формируют особые условия разработки. Эффективная выработка достигается применением ГРП, оптимизацией заводнения с учетом образования техногенных трещин. Перспективы освоения связаны с детальными геолого-геофизическими исследованиями, построением седиментационных моделей, внедрением избирательных технологий воздействия на пласт.

Геологическое строение и минеральный состав золото-сульфидно-вкрапленно-прожилковых руд месторождения Сухой Лог

Карамова Илина Азатовна, студент
Уфимский университет науки и технологий

Статья рассматривает особенности геологического строения, структурно-тектонической позиции и минерального состава золото-сульфидно-вкрапленно-прожилковых руд этого уникального объекта.

Ключевые слова: Сухой Лог, золото-сульфидные руды, вкрапленно-прожилковая минерализация, углеродистые сланцы, пирит, арсениопирит, Бодайбинский синклиниорий, хомолхинская свита.

Геологическое положение месторождения Сухой Лог в структуре Бодайбинского золоторудного района

Месторождение Сухой Лог расположено в центральной части Ленского золоторудного района, в 137 км от города

Бодайбо, в пределах Иркутской области. Это крупнейшее в России скопление золота с доказанными запасами 43,5 млн унций и выявленными ресурсами 81 млн унций. Оруденение приурочено к осевой зоне Маракано-Тунгусской синклинали [1].

Структурный контроль оруденения осуществляется сложной системой дислокаций. Месторождение локализовано в ядерной части асимметричной опрокинутой на юг антиклинальной складки субширотного простирания [2]. Северное крыло структуры падает на север под углами 15–20°, южное — более круто, под углами 30–45°. Осевая зона складки осложнена интенсивным расщеплением и зонами динамометаморфизма, которые служат главными структурными ловушками для рудоносных флюидов. Плоскости расщепления пересекают первичную слоистость пород под острым углом, что обеспечивает высокую проницаемость для гидротермальных растворов.

Важная особенность геологического строения — отсутствие крупных интрузивных тел непосредственно в пределах рудного поля. Ближайший Конкудеро-Мамаканский гранитоидный массив расположен на расстоянии нескольких километров. Впрочем, связь оруденения с магматическими процессами позднелеозойского возраста (около 320 млн лет) обосновывается геохимическими и изотопными данными, указывающими на участие глубинных флюидов в формировании рудных тел [3]. Эти флюиды, вероятно, были генерированы на этапе формирования палингенных гранитов и транспортировали контрастные геохимические ассоциации элементов.

Рудомещающие породы представлены метаморфизованными терригенно-карбонатными отложениями верхнего рифея — углеродистыми метаалевросланцами, филлитами и алевролитами хомолхинской свиты, возраст которых оценивается около 800 млн лет [4].

На месторождении выделены четыре участка различной степени разведанности: Сухоложский, Центральный, Северо-Западный и Западный. Основная часть запасов (88,6 %) сосредоточена в Сухоложском участке, который характеризуется максимальной мощностью рудной зоны — до 140 м в центральной части.

Минеральный состав руд и околорудные метасоматиты

Минеральный состав руд месторождения Сухой Лог характеризуется уникальным разнообразием. Установлено присутствие около 90 минеральных видов, включая самородные металлы, сульфиды, арсениды, теллуриды, сульфосоли, вольфраматы и фосфаты [5].

Основные рудные минералы представлены следующими фазами:

самородное золото — главный промышленный компонент руд;

пирит — наиболее распространенный сульфид;

арсенопирит — второй по значимости сульфид;

пирротин — встречается в подчиненных количествах;

халькопирит, сфалерит, галенит — акцессорные сульфиды.

Золото в рудах находится преимущественно в тонкодисперсном («невидимом») состоянии внутри кристаллической решетки пирита и арсенопирита. Размер золотинок варьирует от субмикронных до 50–100 мкм, средняя проба золота составляет 730–860‰ [6].

Заключение

Практическая значимость исследования геологического строения и минерального состава руд месторождения Сухой Лог определяется необходимостью разработки эффективных технологий извлечения золота из упорных сульфидных руд. Понимание форм нахождения золота, его распределения между минералами, особенностей структурного контроля оруденения позволяет оптимизировать процессы рудоподготовки и обогащения, что критически важно для экономической эффективности отработки этого крупнейшего месторождения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на детализацию минералогических и геохимических особенностей различных морфологических типов руд, изучение микро- и наноразмерных форм золота, уточнение геохронологии рудообразующих процессов.

Литература:

1. Буряк В. А., Хмелевская Н. М. Геологическое строение и золотоносность Светловского рудного поля, Бодайбинский рудный район // Науки о Земле и недропользование. 2018. № 41. С. 5–18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geologicheskoe-stroenie-i-zolotonosnost-svetlovskogo-rudnogo-polya-bodaybinskiy-rudnyy-rayon> (дата обращения: 22.04.2025).
2. Иванов А. И. Золоторудные месторождения Ленского района: геологическое строение и условия формирования // Отечественная геология. 2019. № 4. С. 32–45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mestorozhdenie-ozherelie-novyy-tip-korennyh-mestorozhdeniy-zolota-v-bodaybinskom-rudnom-rayone> (дата обращения: 22.04.2025).
3. Кузнецов В. А., Лишневицкий Э. Н. Глубинное строение и рудообразующие процессы месторождения Сухой Лог // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 2. С. 227–230. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-27946-6_234 (дата обращения: 22.04.2025).
4. Дистлер В. В., Митрофанов Г. Л., Юдовская М. А. и др. Геология, состав и генезис месторождения благородных металлов Сухой Лог, Россия // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 6. С. 519–542. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/petrologo-geohimicheskie-cherty-okolorudnogo-metasomatizma-v-zolotorudnom-mestorozhdenii-suhoy-log-lenskiy-rayon-ch-1-obzor-petrologo> (дата обращения: 22.04.2025).
5. Петровская Н. В., Сафонов Ю. Г. Минералогия золоторудных месторождений Сибири. М.: Наука, 1994. 285 с.

6. Савва Н. Е., Пальянова Г. А., Колесников А. В. Формы нахождения золота в рудах и минералах Наталкинского месторождения (Северо-Восток России) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 2. С. 234–249. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formy-nahozhdeniya-zolota-v-rudah-i-mineralah-natalkinskogo-mestorozhdeniya-severo-vostok-rossii> (дата обращения: 22.04.2025).

Обоснование ресурсосберегающей буровзрывной технологии при отработке сложноструктурных рудных блоков в условиях месторождения Коктасжал

Мукан Арайлым Саматкызы, студент магистратуры

Научный руководитель: Зейтинова Шолпан Бекжигитовна, PhD, ассоциированный профессор
Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова (Казахстан)

В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности буровзрывных работ при разработке сложноструктурных рудных блоков месторождения Коктасжал. Выполнен анализ геолого-структурных особенностей месторождения, определены основные причины разубоживания и потерь руды при открытой разработке. Предложена ресурсосберегающая технология буровзрывных работ, основанная на применении короткозамедленного взрывания и оптимизации параметров сетки скважин. Установлено, что внедрение предложенной технологии позволяет снизить уровень разубоживания с 18 % до 11 %, уменьшить удельный расход взрывчатых веществ на 8–10 % и повысить качество дробления горной массы. Приведены сравнительные показатели эффективности традиционной и предлагаемой технологии.

Ключевые слова: месторождение Коктасжал, буровзрывные работы, разубоживание, рудный массив, короткозамедленное взрывание, ресурсосбережение.

Введение

На современном этапе развития горнодобывающей промышленности Казахстана особую актуальность приобретает проблема эффективной разработки сложноструктурных месторождений полезных ископаемых [1]. В условиях открытых горных работ тектоническая нарушенность массива, блоковое строение рудных тел и неоднородность физико-механических свойств горных пород приводят к увеличению потерь полезного компонента и росту разубоживания руды.

Одним из наиболее сложных объектов Центрального Казахстана является медно-порфировое месторождение Коктасжал, характеризующееся высокой степенью трещиноватости, линзовидной формой рудных тел и сложным тектоническим строением [2]. Указанные особенности существенно влияют на эффективность буровзрывных работ и качество подготовки горной массы к последующей выемке.

Практика показывает, что применение традиционных параметров буровзрывных работ в условиях сложноструктурных рудных массивов не обеспечивает требуемого качества дробления и приводит к увеличению объемов переизмельчения, выхода негабаритной фракции и смешивания руды с пустыми породами [3].

В связи с этим разработка ресурсосберегающих технологий буровзрывных работ является одним из приоритетных направлений совершенствования открытых горных работ. Применение оптимизированных параметров взрывания позволяет снизить расход взрывчатых веществ, уменьшить разубоживание, повысить качество дробления и сократить общие производственные затраты.

Геолого-структурные особенности месторождения

Месторождение Коктасжал расположено в Карагандинской области и относится к медно-порфировому типу месторождений Центрального Казахстана [2]. Месторождение характеризуется сложным геологическим строением, интенсивной тектонической нарушенностью и высокой степенью трещиноватости пород.

Рудные тела имеют преимущественно линзовидную и пластообразную форму. Их мощность изменяется от 2–3 до 20–25 м [2]. Значительная изменчивость морфологии рудных тел осложняет ведение горных работ и требует применения селективной технологии добычи.

Горные породы представлены плагиогранит-порфирами, кварц-халькопиритовыми жилами, диабазовыми и диоритовыми порфиритами. В массиве широко развиты тектонические нарушения северо-западного и северо-восточного направлений [2].

Коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова изменяется в пределах $f = 10–14$ [4].

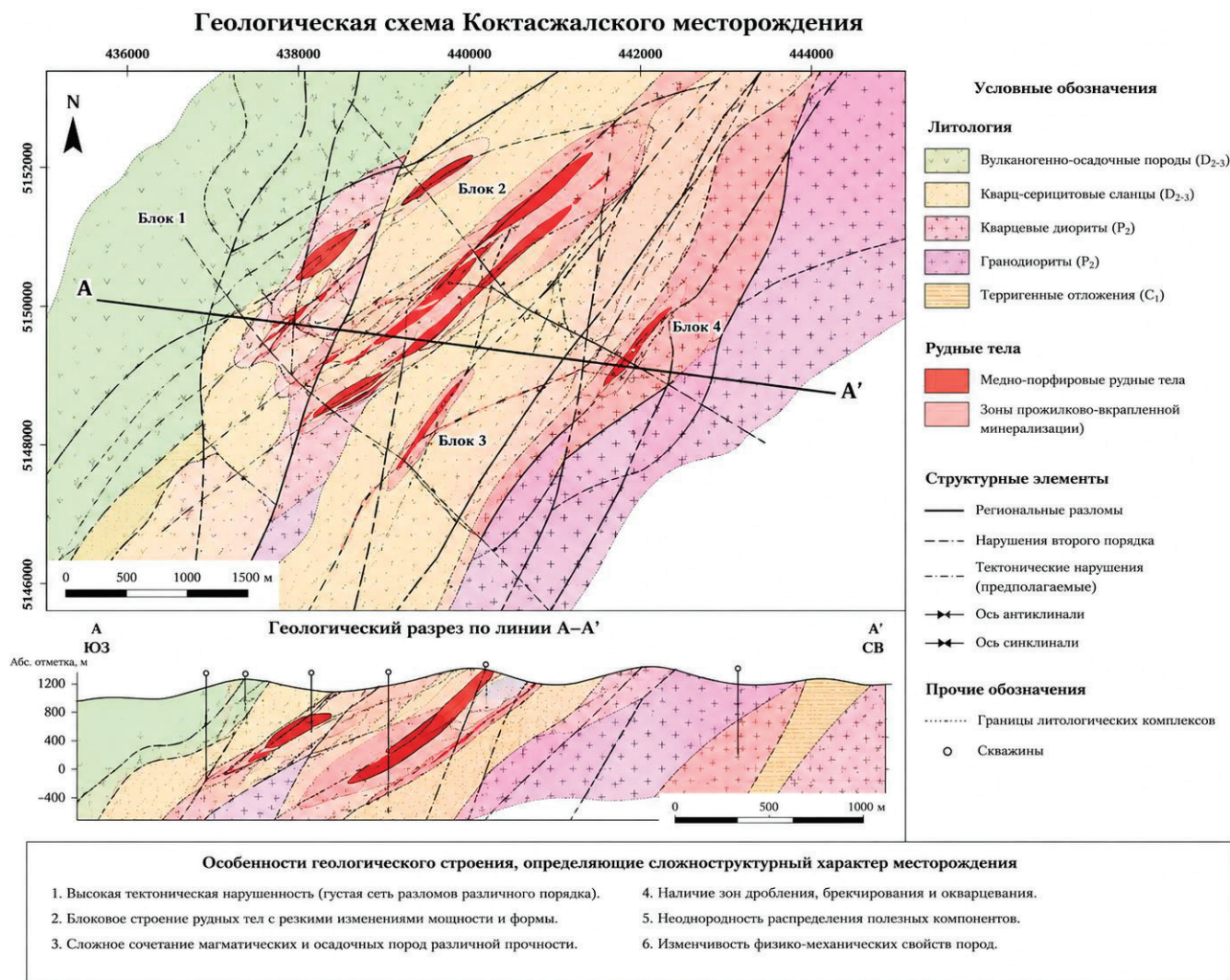


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Коктасжал

Высокая степень тектонической нарушенности существенно влияет на распространение энергии взрыва в массиве и приводит к неравномерному дроблению горной массы [5].

Методика исследования

Методика исследования основывалась на комплексном анализе геолого-структурных особенностей месторождения Коктасжал, параметров буровзрывных работ и показателей качества подготовки горной массы.

В процессе исследования были использованы:

- анализ геологической документации и технических отчетов месторождения;
- сравнительный анализ параметров буровзрывных работ;
- расчет коэффициента разубоживания;
- оценка качества дробления горной массы;
- анализ удельного расхода взрывчатых веществ;
- методы статистической обработки производственных данных.

Исследования проводились на рудных блоках с различной степенью тектонической нарушенности. При анализе эффективности буровзрывных работ учитывались:

- степень трещиноватости массива;
- морфология рудных тел;
- параметры сетки скважин;
- интервалы замедления;
- удельный расход взрывчатых веществ;
- выход негабаритной фракции.

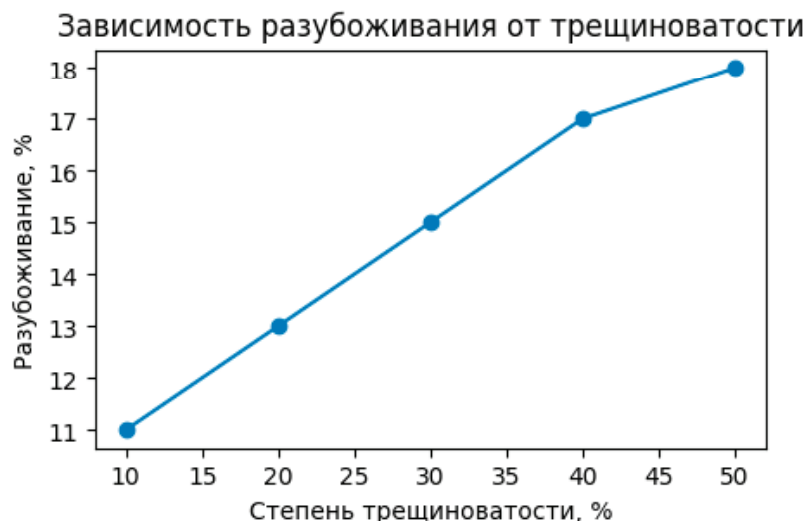


Рис. 2. Зависимость разубоживания от трещиноватости

Для определения уровня разубоживания использовалась следующая зависимость [бпр]:

$$R = B / (A + B) \times 100 \%$$

где:

- R — коэффициент разубоживания;
- A — объем руды;
- B — объем пустых пород.

При исследовании эффективности короткозамедленного взрывания применялись интервалы замедления от 25 до 65 мс [7]. Оценка качества дробления выполнялась по гранулометрическому составу взорванной горной массы.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного анализа установлено, что одним из основных факторов увеличения разубоживания на месторождении Коктасжал является высокая степень тектонической нарушенности массива. Наличие многочисленных трещин и разломов приводит к неравномерному распространению энергии взрыва и перемешиванию руды с пустыми породами [6].

Исследования показали, что применение традиционной технологии буровзрывных работ сопровождается повышенным выходом негабаритной фракции [3] и увеличением объема повторного дробления.

Одной из основных проблем при разработке сложноструктурных месторождений является разубоживание руды [6]. В условиях месторождения Коктасжал смешивание полезного компонента с пустыми породами происходит вследствие сложной морфологии рудных тел, высокой трещиноватости массива и недостаточной эффективности буровзрывных работ. На основе анализа геолого-структурных условий и производственных показателей были сформированы расчетные значения потерь и разубоживания по рудным блокам. Расчетная оценка показывает, что уровень разубоживания в условиях сложноструктурных рудных блоков может достигать 18 %.

Таблица 1. Показатели потерь и разубоживания по рудным блокам

Блок	Потери, %	Разубоживание, %
№ 1	4,5	12
№ 2	5,1	15
№ 3	6,3	18
№ 4	5,8	16
№ 5	4,9	13

Для повышения эффективности буровзрывных работ предложено применение короткозамедленного взрывания и оптимизированной сетки скважин. Применение короткозамедленного взрывания позволяет управлять направлением распространения взрывной волны [5,7] и снижать степень перемешивания руды с пустыми породами [7, 8].

Параметры буровзрывных работ определялись с учетом физико-механических свойств пород [2, 4] и степени тектонической нарушенности массива.

Удельный расход взрывчатых веществ определялся по формуле:

$$q = q_0 * k_f * k_t$$

где:

- q — расчетный расход ВВ;
- q_0 — базовый расход;
- k_f — коэффициент крепости пород;
- k_t — коэффициент трещиноватости.

Таблица 3. Сравнение параметров буровзрывных работ

Показатель	Традиционная технология	Предлагаемая технология
Диаметр скважин, мм	220	220
Сетка скважин, м	6×6	5×5
Интервал замедления, мс	90	40
Удельный расход ВВ, кг/м³	1.25	1.08
Разубоживание	18 %	11 %
Выход негабарита	32 %	19 %

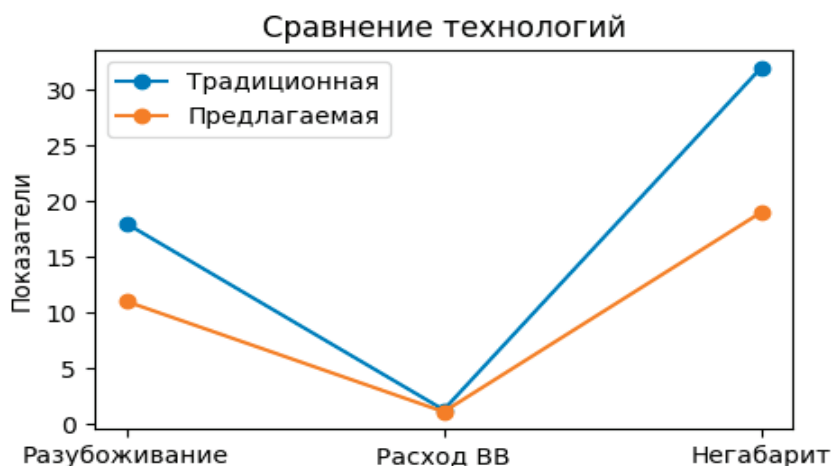


Рис. 3. Сравнение традиционной и ресурсосберегающей технологии

Внедрение предложенной технологии позволяет существенно снизить производственные и энергетические затраты за счет более эффективного использования взрывчатых веществ и уменьшения объема повторного дробления горной массы. Кроме того, применение оптимизированных параметров буровзрывных работ способствует повышению качества рудной массы и снижению потерь полезного компонента при добыче. В целом использование ресурсосберегающей технологии обеспечивает повышение общей эффективности открытых горных работ в условиях сложноструктурных месторождений.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что геолого-структурные особенности месторождения Кокташжал оказывают существенное влияние на эффективность буровзрывных работ и качество подготовки горной массы. Высокая степень тектонической нарушенности, блоковое строение рудных тел и значительная трещиноватость массива способствуют увеличению потерь полезного компонента и росту уровня разубоживания руды.

Проведенный анализ показал, что применение традиционных параметров буровзрывных работ в условиях сложноструктурных рудных блоков не обеспечивает требуемой эффективности разрушения массива и приводит к увеличению выхода негабаритной фракции, переизмельчению отдельных зон и дополнительным производственным затратам.

В ходе исследования была обоснована ресурсосберегающая буровзрывная технология, основанная на применении короткозамедленного взрывания и оптимизации параметров сетки скважин с учетом геомеханических особенностей

массива. Установлено, что использование предложенной технологии обеспечивает более равномерное распределение энергии взрыва, способствует улучшению качества дробления горной массы и снижению степени перемешивания руды с пустыми породами.

Результаты исследований показали, что внедрение предложенных технологических решений позволяет снизить уровень разубоживания с 18 % до 11 %, уменьшить удельный расход взрывчатых веществ на 8–10 %, а также сократить объем повторного дробления и повысить эффективность экскавационных работ. Экономическая оценка подтверждает целесообразность применения ресурсосберегающей технологии при разработке сложноструктурных месторождений открытым способом.

Таким образом, предложенная технология может быть рекомендована для внедрения на месторождении Коктасжал и на аналогичных сложноструктурных рудных объектах, характеризующихся высокой тектонической нарушенностью и неоднородностью строения массива.

Литература:

1. Абдулин А. А. Геология Казахстана. — Алматы: Гылым, 1994. — 368 с.
2. План горных работ меднопорфирового месторождения «Коктасжал» в Карагандинской области ТОО «Алтай Полиметаллы» (корректировка проекта промышленной разработки месторождения Коктасжал). — Караганда: ТОО НПК «АлГеоРитм», 2022. — 222 с.
3. Cunningham C. V. B. The Kuz-Ram fragmentation model — 20 years on // Brighton Conference Proceedings. — 2005. — P. 201–210.
4. Кузнецов В. М. Разрушение горных пород взрывом. — Москва: Недра, 1977. — 352 с.
5. Yi C., Johansson D., Greberg J. Numerical study of the influence of short delay times on rock fragmentation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2017. — Vol. 100. — P. 250–262.
6. Delentas A., Benardos A. Analyzing Stability Conditions and Ore Dilution in Open Stope Mining // Minerals. — 2021. — Vol. 11. — № 12. — Article 1404.
7. Qiu X., Shi X., Gou Y. Short-delay blasting with single free surface: results of experimental tests // Tunnelling and Underground Space Technology. — 2018. — Vol. 74. — P. 119–130.
8. Seccatore J., Segarra P., Fuentes R. The Role of Delays in the Performance of Blasting // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14. — № 11. — Article 4657.

Hybrid drilling systems: integrating rotary and percussive technologies for hard rock formations

Taufik Mokhamed Nazikh Mokhamed, master's student
Ufa State Oil Technical University

Hybrid drilling systems that combine rotary and percussive drilling mechanisms have emerged as a transformative solution for penetrating hard rock formations in geothermal, mining, and deep foundation applications. This article presents a comprehensive analysis of hybrid drilling technologies, examining their working principles, comparative advantages over conventional methods, optimization strategies, and future research trajectories. By integrating the shearing action of rotary drilling with the fracturing efficiency of percussive impact, these systems achieve superior rates of penetration (ROP), extended bit life, and reduced operational costs in formations with unconfined compressive strengths exceeding 150 MPa. Recent innovations including fluid-powered hammers, particle impact systems, and hydro-mechanical hybrid configurations demonstrate the potential to revolutionize drilling economics in challenging geological environments.

Introduction and Theoretical Background

1.1. The Challenge of Hard Rock Drilling

Drilling through hard rock formations represents one of the most significant technical and economic challenges in geotechnical engineering, mining, and energy exploration. Conventional rotary drilling methods, while effective in soft to medium formations, encounter substantial limitations when penetrating crystalline basement rocks, granites, basalts, and other high-compressive-strength materials.

- **Excessive weight-on-bit (WOB) requirements:** Hard rock necessitates increased downward force to achieve cutter penetration, leading to accelerated bit wear and mechanical dysfunction
- **Thermal degradation:** High frictional heat generation at the rock-bit interface causes premature failure of polycrystalline diamond compact (PDC)
- **Cutters Low penetration rates:** Conventional rotary methods achieve ROPs of less than 0.5 m/hr in ultra-hard formations, rendering projects economically unviable
- **Equipment fatigue:** Stick-slip vibrations, helical buckling, and torsional oscillations increase non-productive time and maintenance costs

1.2. Evolution of Hybrid Drilling Concepts

The integration of rotary and percussive drilling mechanisms represents a paradigm shift in rock penetration technology. Hybrid systems leverage the complementary mechanisms of rock failure: rotary drilling induces shear failure through continuous cutter engagement, while percussive drilling generates compressive failure through high-frequency impact loading. The synergistic combination reduces the effective rock strength ahead of the bit, enabling more efficient material removal.

Historical development traces from early top-hammer pneumatic drills through modern down-the-hole (DTH) hammers to sophisticated mud-powered percussion enhancers. Contemporary hybrid systems include:

- 1 **Rotary-percussive DTH systems:** Combining rotation with pneumatic or hydraulic hammer action at the bit
- 2 **Percussion-enhanced rotary drilling:** Axial impulse generators positioned **behind PDC bits**
- 3 **Hydro-mechanical systems:** Integrating high-pressure waterjets with percussive hammers
- 3 **Particle impact drilling:** Steel shot injection to pre-fracture rock formations



Fig. 1. Rotary-percussive drilling rig configuration showing the integration of rotational and percussive mechanisms (Source: Energies Media)

2. System Classification and Working Mechanisms

2.1. Down-the-Hole (DTH) Hammer Systems

DTH drilling represents the most established hybrid technology, positioning the hammer mechanism immediately behind the drill bit at the bottom of the borehole. The operational sequence involves:

Energy transmission: Compressed air or water travels through the drill string to actuate a reciprocating piston

Impact generation: The piston strikes an anvil connected to the bit, delivering high-frequency blows (typically 1,000 2,000 blows per minute)

Rotation: Surface rotation (10 30 RPM) indexes the bit cutters to fresh rock between impacts

Cuttings removal: Exhaust fluid carries fragmented material up the annulus

DTH systems achieve nearly 100 % energy transfer efficiency compared to approximately 84 % for top-hammer configurations, as energy losses through drill string attenuation are eliminated. Modern water-powered DTH hammers demonstrate particular advantages in geothermal applications, operating effectively at depths exceeding 3,500 meters while maintaining borehole straightness and minimizing formation damage.



Fig. 2. Down-the-hole hammer assembly showing piston, bit, and flushing channels (Source: Made-in-China)

2.2. Percussion-Enhanced Rotary Systems

Novel percussion-enhanced systems, such as HydroVolve's HYPERDRIVE and GeoVolve technologies, represent a significant advancement in hybrid drilling. These systems utilize drilling mud hydraulics to power axial impulse generators positioned in the bottom-hole assembly (BHA) behind conventional PDC bits. Key characteristics include:

1 Pre-fracturing mechanism: Cyclic axial impulses (20 30 Hz) pre-condition the rock, reducing unconfined compressive strength by 30 50 %

2 Reduced WOB requirements: Pre-fracturing enables effective depth-of-cut at 40 60 % lower weight-on-bit

3 Thermal management: Intermittent bit-rock contact reduces frictional heating, extending PDC cutter life by 200 300 %

4 High-temperature tolerance: All-metal construction eliminates elastomeric seals, enabling operation at 300°C

Field trials demonstrate ROP improvements of 100 % compared to conventional rotary drilling, with bit life extension from 122 ft to 990 ft in granite formations

2.3. Hydro-Mechanical Hybrid Systems

The EU Horizon 2020 ORCHYD project developed an innovative hybrid combining high-pressure waterjet kerfing with percussive hammer action. The system operates through:

1 Stress relief: High-pressure waterjets (600 L/min) groove the rock face, reducing confining stresses

2 Fracture propagation: Unloading promotes micro-crack networks, weakening the rock matrix

3 Percussive removal: A diamond-reinforced kerf-shaped bit impacts the pre-conditioned rock

4 Energy conservation: Axial vibrations pressurize the waterjet, creating a self-sustaining energy loop

Laboratory testing achieved 80 % ROP increases over conventional methods, with target performance of 20 25 m/hr in hard rock



Fig. 3. Various PDC and hybrid drill bit configurations for hard rock applications (Source: Trenchless Technology)

3. Comparative Performance Analysis

3.1. Penetration Rate Optimization

Comparative field studies reveal significant performance differentials between drilling methodologies in hard rock formations:

Table 1. Comparative performance metrics for drilling technologies in hard rock formations (Compiled from)

Drilling Method	Typical ROP (m/hr)	UCS Range (MPa)	Energy Efficiency	Deviation Control
Conventional Rotary	0.3–0.8	<100	Moderate	5–10 %
Top-Hammer	1.0–2.0	100–200	Good	3–5 %
DTH Hammer	1.5–3.0	150–300	Excellent	1–2 %
Percussion-Enhanced	2.0–4.0	200–400	Superior	2–3 %
Hydro-Mechanical	4.0–10.0	150–250	High	1–2 %

3.2. Economic and Operational Advantages

Hybrid drilling systems deliver multifaceted benefits beyond penetration rate improvements:

Cost Reduction: Strada Global’s fluid hammer system achieved 70 % cost reduction in Australian geothermal projects, drilling 6,000m depths at 20 m/hr in 200 MPa granite. The reduction stems from:

- Decreased bit consumption (3× life extension)
- Reduced tripping time (fewer bit changes)
- Lower fuel consumption (optimized energy transfer)

Operational Flexibility: Hybrid systems adapt to varying geological conditions without equipment changes. The Terelion Rotary Percussion System (RPS) operates effectively across soft soils to hard bedrock through adjustable percussive energy.

Environmental Benefits: Water-powered systems eliminate dust generation and reduce noise emissions by 30 % compared to air-powered alternatives, enabling urban construction applications

3.3. Limitations and Constraints

Despite advantages, hybrid systems present specific limitations:

- **Hydraulic complexity:** Mud-powered hammers require precise pressure management to avoid equivalent circulating density (ECD) issues
- **Directional control:** Particle impact drilling currently lacks compatible measurement-while-drilling (MWD) telemetry due to erosion risks
- **Depth limitations:** Air-powered DTH systems experience efficiency degradation below 1,000m due to compressibility effects
- **Initial capital cost:** Hybrid BHA components command 40 60 % premium over conventional rotary assemblies



Fig. 4. Geothermal drilling rig deploying hybrid rotary-percussive technology (Source: Massena Drilling Rigs)

4. Engineering Design and Optimization Parameters

4.1 Drill Bit Design Considerations Hybrid drilling necessitates specialized bit configurations optimized for combined loading conditions:

Bit Face Geometry:

Concave profiles: Enhance deviation control and cuttings removal in homogeneous hard rock

Convex profiles: Maximize penetration rates in soft to medium formations **Flat-face designs:** Provide versatility across mixed geological conditions

Cutter Configuration:

Spherical inserts: Maximum impact resistance for percussion-dominated drilling

Semi-ballistic inserts: Balance between penetration rate and durability

Conical diamond elements (CDE): Schlumberger's hybrid design combining PDC cutters with conical precrushing elements achieves 4.0 8.0 m/hr in geothermal applications

Material Selection

Tungsten carbide with cobalt binder for impact resistance

Thermally stable polycrystalline (TSP) diamond for high-temperature environments

Diamond-impregnated matrices for extreme abrasion resistance

4.2. Operating Parameter Optimization

Effective hybrid drilling requires systematic parameter adjustment based on rock mass characteristics:

Weight-on-Bit (WOB):

- Hard rock: High thrust (20 40 kN) to ensure cutter penetration
- Soft formations: Reduced thrust (5 15 kN) to prevent bit balling
- Percussion-enhanced systems: 40 60 % lower WOB than conventional rotary

Rotation Speed:

- Hard abrasive rock: 20 40 RPM to minimize cutter heating
- Medium rock: 50 80 RPM for optimal cuttings evacuation
- Soft rock: 80 120 RPM for maximum penetration

Percussive Frequency:

- Standard DTH: 1,000 2,000 BPM (blows per minute)
- Enhanced rotary: 20 30 Hz (1,200 1,800 BPM)
- High-frequency systems: Up to 3,000 BPM for micro-fracturing

Flushing Media:

- Air: Standard for DTH, limited to <1,000m depth
- Water: Superior for deep drilling, dust suppression, and temperature control Foam: Extends depth capability by 30 % and improves cuttings transport



Fig. 5. Hard rock PDC diamond drill bit with reinforced cutters (Source: Made-in-China)

5. Applications in Specialized Environments

5.1. Geothermal Energy Development

Superhot rock (SHR) geothermal resources, characterized by temperatures exceeding 300°C and crystalline basement formations, represent the primary application domain for hybrid drilling. The GeoVolve HYPERDRIVE system has demonstrated:

- Sustained operation at 220°C in Hungarian field trials
- Penetration of 5,800m in Ukrainian sedimentary sequences at 2 m/hr average ROP
- Compatibility with conventional rotary infrastructure

The U. S. Department of Energy’s FORGE project in Utah serves as a critical testbed for hybrid technologies, with particle impact drilling achieving 45 ft/hr in 45,000 50,000 psi granite.

5.2. Deep Foundation and Mining Applications

Hybrid systems excel in urban foundation drilling where noise and vibration restrictions apply:

- **Micropile installation:** DTH hammers achieve 1 2 % deviation tolerance in anchor holes up to 50m depth
- **Blast hole drilling:** Top-hammer systems deliver 30 % productivity improvements in quarrying operations
- **Tunneling:** Rotary-percussive methods reduce overbreak and improve profile accuracy in hard rock tunnel boring

5.3. Mineral Exploration

Reverse circulation (RC) drilling utilizing hybrid DTH systems provides high-quality samples with minimal contamination. The dual-wall pipe configuration enables rapid penetration (2 3 m/hr) in weathered bedrock while maintaining sample integrity



Fig. 6. DHD350 DTH bit designed specifically for hard rock drilling applications (Source: Leanoms Drill)

6. Conclusions and Recommendations

6.1. Summary of Findings

Hybrid drilling systems combining rotary and percussive mechanisms have demonstrated transformative potential for hard rock penetration:

- 1 **Performance Enhancement:** ROP improvements of 100 300 % over conventional rotary drilling, with bit life extensions exceeding 200 % in field trials
- 2 **Economic Viability:** Cost reductions of 50 70 % in deep geothermal projects through reduced tripping time and bit consumption
- 3 **Technical Versatility:** Successful operation across diverse geological environments from soft sediments to ultra-hard crystalline basement
- 4 **Environmental Compatibility:** Water-powered systems enable sustainable drilling with minimal dust, noise, and vibration

6.2. Strategic Recommendations

For academic researchers and industry practitioners:

Immediate Implementation:

- Adopt percussion-enhanced rotary systems for geothermal wells targeting crystalline basement
- Implement DTH hammer technology for foundation drilling in hard rock urban environments
- Optimize drilling parameters using real-time monitoring systems

Research Priorities:

- Develop high-temperature (>300°C) compatible hybrid systems for supercritical geothermal resources
- Investigate directional control mechanisms for particle impact drilling
- Validate plasma-assisted drilling through extended field trials

Technology Development:

Integrate artificial intelligence for autonomous parameter optimization

Advance materials science for cutter durability in abrasive formations Standardize hybrid system interfaces for interoperability across rig fleets

6.3. Future Outlook

The convergence of hybrid drilling technologies with renewable energy development, particularly deep geothermal and green hydrogen storage in rock caverns, positions these systems as critical infrastructure for the energy transition. Continued innovation in materials, automation, and energy efficiency will likely establish hybrid rotary-percussive drilling as the standard methodology for hard rock penetration within the next decade.

References:

1. Kelly Way Group. (2026). Rotary Drilling vs. Percussive Drilling: Which Method is Best for Your Pile Project? Retrieved from <https://www.kellywaygroup.com>
2. Terelion. (2024). Rotary Percussion System™ (RPS) Gen 2. Product Documentation.
3. Moyes, P., Airnes, J., Anderson, M., Keshiyev, S., & Zbaraskiy, V. (2023). Percussion-Enhanced Drilling Technology Supercharges Drilling Performance. HydroVolve & Zerdalab Technical Paper.
4. Sino Drills. (2025). What is Rock Drilling: The Ultimate Guide. Technical Resources.
5. CA Drillers. (2024). Two Primary Drilling Techniques: Percussive Drilling and Rotary Drilling. Industry Guide.
6. Morath GmbH. (2024). Rotary percussive drilling (down-the-hole hammer). Technical Documentation.
7. Encyclopedia of Engineering. (2021). Rotary-Percussion Drilling. <https://encyclopedia.pub/entry/10212>
8. Rooklin Enterprises. (2024). A Guide to Different Rock Drilling Techniques. Construction Resources.
9. Drill Master Group. (2024). Rotary drilling versus percussive drilling techniques. Technical Comparison.
10. Pile Buck Magazine. (2024). Mastering the Hard Rock: Effective Drilling Techniques and Technologies.
11. NETL. (2024). Fundamental Research on Percussion Drilling. U. S. Department of Energy.
12. O-K Bit. (2025). Mastering DTH Drilling: Tools, Tips, and Techniques. [13] Sino Drills. (2025). How Does a DTH Hammer Drill Work? Technical Guide.
13. WonTech Drill. (2025). The Advantages of DTH Drilling in Hard Rock Formations.
14. Kelleg Drill. (2025). How to Set Drilling Parameters for Down-the-Hole Hammers.
15. Reld Drill. (2025). DTH Drilling: Complete Guide to Boost Your Productivity.
16. Drill King. (2025). Choosing the right DTH Hammer for efficient Water Well Drilling.
17. Terra Roc Drilling. (2023). Down the hole hammers: a guide for drillers and engineers.
18. Cascade Institute. (2025). Drilling for Superhot Geothermal Energy: A Technology Gap Analysis.
19. ScienceDirect. (2025). Advances in geothermal drilling: A comparative study with oil and gas techniques.
20. Stanford University. (2025). Drilling for Superhot Geothermal Energy: A Technology Gap Assessment.

Optimization of hydraulic fracturing design for enhanced reservoir development

Taufik Mokhamed Nazikh Mokhamed, master's student
Ufa State Oil Technical University

Introduction

Background Hydraulic fracturing (HF) has evolved from conventional stimulation methods to sophisticated, data-driven optimization processes essential for unconventional reservoir development. First industrialized in 1949, HF became transformative when combined with horizontal drilling and multi-stage completion technologies in the late 1990s.

Key Evolutionary Milestones:

- 1947: First experimental HF treatment
- 1968: Introduction of high-volume fracturing
- 1997: Slick water fracturing implementation
- 2000s: Multi-well pad development and micro seismic monitoring
- 2020s: Machine learning integration and real-time optimization

Modern HF operations in unconventional reservoirs (tight sands, shale formations, coalbed methane) require precise engineering to create complex fracture networks that maximize stimulated reservoir volume (SRV) while minimizing environmental impact and operational costs.

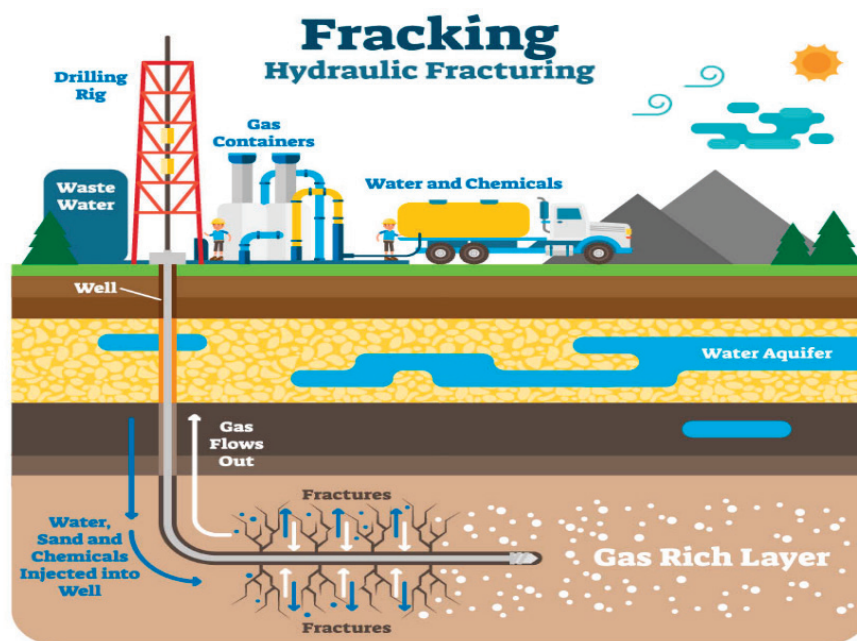


Fig. 1. Hydraulic fracturing process schematic showing surface equipment, wellbore architecture, and subsurface fracture propagation

Critical Challenge: Each reservoir exhibits unique geological and geomechanically characteristics, necessitating customized fracture designs rather than standardized approaches.

Fundamental Mechanisms and Fracture Propagation

Understanding fracture propagation mechanics is essential for optimal design. Recent advances in numerical simulation have revealed complex interactions between hydraulic fractures and reservoir heterogeneity.

Fracture Propagation Modes:

Tensile Failure: Primary mechanism where fluid pressure exceeds minimum principal stress plus rock tensile strength

Shear Slip: Activation of pre-existing natural fractures

Mixed-Mode Propagation: Combination of tensile and shear mechanisms in heterogeneous formations

Phase-Field Method Advances

The phase-field fracture method has emerged as a transformative approach, combining Griffith’s energy principles with diffusive crack representation. This method naturally captures complex behaviors like crack branching without predefined fracture criteria

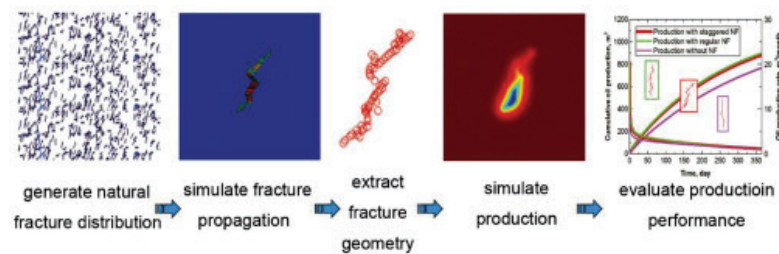


Fig. 2. Integrated workflow for fracture propagation and reservoir simulation showing (a) natural fracture network generation, (b) hydraulic fracture propagation, (c) stimulated fracture geometry, and (d) production performance prediction

Key Insight: Reservoirs with >80 % brittle minerals demonstrate 20.6 % larger damage areas and 8.3 % lower initiation pressures compared to ductile formations, emphasizing the importance of brittleness index evaluation

Optimization Strategies and Design Parameters

Effective HF design requires systematic optimization of multiple interdependent parameters. Recent studies demonstrate that optimization must balance fracture complexity with economic constraints.

Table 1. Critical Design Parameters

Parameter	Optimization Range	Impact on Performance
Fracturing Fluid Volume	1000–2200 m³	Diminishing returns beyond 1800 m³
Pumping Displacement	≥18 m³/min	Controls fracture complexity
Proppant Concentration	Variable by stage	Affects fracture conductivity
Perforation Design	36–48 holes/stage	Influences initiation uniformity

Advanced Techniques

- Zipper Fracturing:** Simultaneous stimulation of parallel horizontal wells to enhance stress interference and fracture complexity
- Hydra-jet Fracturing:** Combines hydra jetting with HF for precise fracture initiation
- Temporary Plugging:** Diverting agents to create complex fracture networks

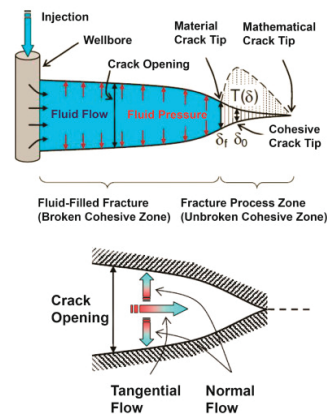


Fig. 3. Cohesive zone model for fracture propagation showing fluid flow, crack opening, and process zone mechanics in horizontal well multi-stage fracturing

Machine Learning and AI Integration

The integration of machine learning (ML) represents a paradigm shift in HF optimization, enabling real-time decision-making and predictive analytics from large operational datasets

ML Applications in HF:

Artificial Neural Networks (ANN)

- Khouly et al. (2024) achieved 0.93 correlation coefficient using ANN for fracture geometry prediction in the Western Desert of Egypt
- Data split: 70 % training, 15 % validation, 15 % testing

Transfer Learning with Physics-Based Data

- Khan et al. (2024) developed physics-based datasets with 62 parameters
- Improved predictive performance by 15.12 % RMSE and 15.88 % MAPE

Particle Swarm Optimization (PSO)

- Achieved 14.2 % production increase over initial predictions
- Optimized values aligned with real data in 88 % of cases

Deep Reinforcement Learning

- Real-time production optimization during fracturing operations

Advantages of ML Approaches:

- Processing of complex, nonlinear relationships in operational data
- Pattern recognition across multiple geological and operational scenarios
- Reduction of computational time compared to conventional numerical simulation

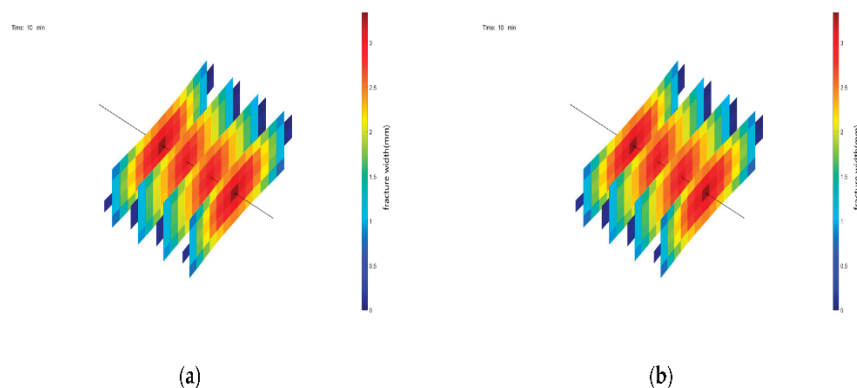


Fig. 4. Machine learning framework for fracture parameter prediction incorporating XGBoost and Bayesian optimization for enhanced forecasting accuracy

Proppant Transport and Placement Optimization

Proppant placement critically determines long-term fracture conductivity and well productivity. Recent research focuses on optimizing proppant transport in complex fracture geometries.

Proppant Transport Mechanisms:

- **Vertical Fractures:** Gravity settling dominates; requires high fluid viscosity or
- **Velocity Inclined Fractures:** Balance between gravity and drag forces
- **Horizontal Fractures:** Buoyancy effects and proppant banking

Innovations in Proppant Technology:

- **Micro-proppants:** Enhanced placement in secondary fractures and micro-fractures

- **Buoyant Proppants:** Carbon fullerenes and lightweight materials for improved transport in low-viscosity fluids
 - **Resin-Coated Proppants:** Enhanced crush resistance and reduced flowback
- Optimization Strategies:**
- StageOpt Tool Implementation:** Physics-based wellbore dynamics simulator for perforation design optimization
- Tapered Perforating:** Variable shot diameter to balance fluid distribution
- Real-time Monitoring:** Distributed acoustic sensing (DAS) for proppant placement verification

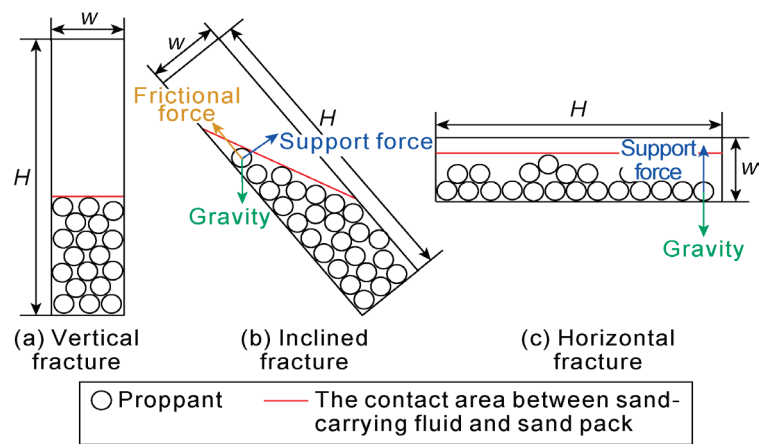


Fig. 5. Proppant transport laws in multi-branched fractures showing

- (a) vertical, (b) inclined, and (c) horizontal fracture configurations with gravity and drag force interactions
- Numerical Simulation and Case Studies**
- Modern HF design relies heavily on numerical simulation to predict fracture behaviour before field implementation. Coupled hydro-mechanical models provide essential insights into fracture network development.

Table 2. Simulation Methodologies

Method	Advantages	Limitations
Discrete Element Method (DEM)	Captures natural fracture interaction	High computational cost
Extended Finite Element Method (XFEM)	Handles crack propagation without remeshing	Predefined fracture criteria required
Phase-Field Method	Natural crack branching and coalescence	Mesh refinement requirements
Cohesive Zone Model	Accurate fracture tip mechanics	Complex parameter calibration

- Case Study: Southwestern Iran**
- **Objective:** Optimize HF design for low-permeability carbonate reservoir
 - **Methodology:** FracCADE simulation with iterative parameter refinement
 - **Optimal Design:** 12 pumping stages including pad, 10 particle-plugging stages, and flush
 - **Result:** Simulation 16 selected based on theoretical alignment and software outputs
- Key Findings from Numerical Studies:**
- Horizontal stress difference >10 MPa limits fracture complexity
 - Natural fracture density ($\rho_a \geq 0.05$) enhances network complexity by 30–40 %
 - Fracture initiation pressure correlates strongly with stress difference ($R^2 = 0.92$)

Future Directions and Conclusions

The optimization of hydraulic fracturing design continues to evolve toward intelligent, automated systems that integrate multi-disciplinary data for real-time decision-making.

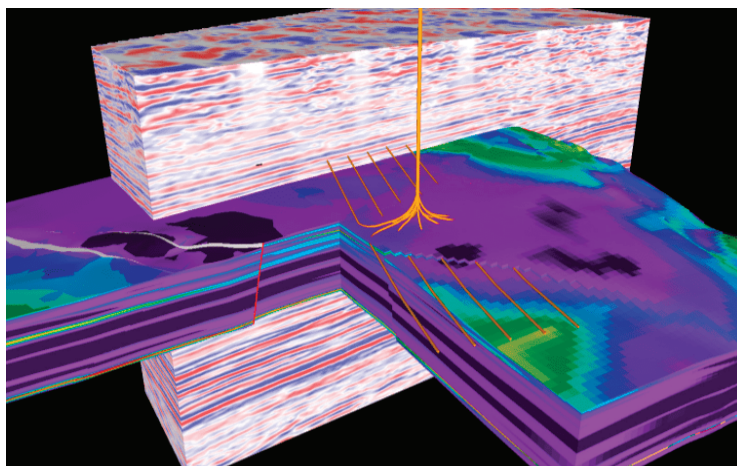


Fig. 6. 3D visualization of geologic and petrophysical data for unconventional reservoir characterization and risk management

Emerging Technologies:

Real-time Fracture Monitoring: Fiber optic distributed sensing for immediate geometry verification

Automated Pumping Control: AI-driven adjustment of rates and pressures based on microseismic feedback

Alternative Fracturing Fluids:

- LPG (liquefied petroleum gas) gel systems for reduced water usage
- CO₂-based fracturing for thermal stress creation
- Nanoparticle-enhanced fluids for improved proppant transport

Enhanced Geothermal Systems (EGS): Application of HF techniques to renewable energy extraction

Conclusions:

- **Integration is Critical:** Successful HF optimization requires coupling geological, geomechanical, and operational data
- **Machine Learning Enhancement:** AI/ML methods provide 15–20 % improvement in prediction accuracy compared to conventional approaches
- **Economic Balance:** Optimal designs consider both technical performance and cost constraints larger fracturing volumes do not always yield proportional production increases
- **Environmental Considerations:** Development of waterless or reduced-water fracturing technologies addresses sustainability concerns

References:

1. ScienceDirect. (2019). «An integrated workflow for fracture propagation and reservoir simulation in tight oil». Journal of Petroleum Science and Engineering
2. Dynamic Graphics, Inc. (2021). «Managing Risk in Unconventional Reservoir Development Through Visualization of Geologic and Petrophysical Data».
3. MDPI Energies. (2023). «A Powerful Prediction Framework of Fracture Parameters for Hydraulic Fracturing Incorporating Extreme Gradient Boosting and Bayesian Optimization». Energies, 16(23), 7890.
4. ScienceDirect. (2021). «Micro-proppant placement in hydraulic and natural fracture stimulation in unconventional reservoirs: A review». Greenery Science and Engineering.
5. Dynamix Agitators Inc. (2020). «Fracking and Mixer Use».
6. Petroleum Exploration and Development. (2023). «Proppant transport law in multi-branched fractures induced by volume fracturing». Petroleum Exploration and Development, 50(4).
7. Scientific Reports. (2024). «Optimization of fracturing technology for unconventional dense oil reservoirs based on rock brittleness index». Scientific Reports.
8. Journal of Chemical and Petroleum Engineering. «Design and Optimize Hydraulic Fracturing Operation». University of Tehran.
9. Energies (MDPI). (2026). «Numerical Simulation Study on Fracture Propagation Mechanisms in Terrestrial Shale Reservoirs». Energies, 19(4), 922.
10. Texas A&M University. (2025). «Hydraulic Fracturing, Well Stimulation and Profile Modification». Harold Vance Department of Petroleum Engineering.

11. Scientific Reports. (2025). «Evaluation of hydraulic fracturing using machine learning». Scientific Reports.
12. Advances in Geo-Energy Research. (2024). «Experimental and numerical simulation technique for hydraulic fracturing of shale formations». Advances in Geo-Energy Research, 8(2).
13. European Commission Joint Research Centre. (2013). «An overview of hydraulic fracturing and other formation stimulation technologies for shale gas production». EUR 26347.
14. ResFrac. (2024). «Notable Papers from the 2024 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference.

Высоковязкая нефть сеноманских отложений Западной Сибири: сопоставление свойств и условий залегания на примере Русского и Северо-Комсомольского месторождений

Фаезов Рафаэль Раилевич, студент магистратуры

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

В статье автор исследует геолого-промысловые характеристики и свойства нефти двух крупнейших месторождений высоковязкой нефти Западной Сибири — Русского и Северо-Комсомольского, продуктивные отложения которых приурочены к пласту ПК1 покурской свиты.

Ключевые слова: высоковязкая нефть, сеноманские отложения, пласт ПК1, Русское месторождение, Северо-Комсомольское месторождение, покурская свита.

В условиях истощения традиционных запасов легкой нефти в Западной Сибири закономерно возрастает интерес к трудноизвлекаемым ресурсам, сосредоточенным в сеноманских отложениях и сложнопостроенных залежах покурской свиты. Русское и Северо-Комсомольское месторождения выбраны в качестве объектов сравнительного анализа не случайно: оба они характеризуются колоссальными геологическими запасами высоковязкой нефти.

Северо-Комсомольское месторождение открыто в 1969 г., введено в промышленную эксплуатацию в 1995 г. Разрабатывается по лицензии СЛХ № 16469 НЭ от 17.08.2018 г., выданы ООО «СевКомНефтегаз» сроком до 31.12.2112 г. За период освоения района создана вся необходимая промышленная инфраструктура [6]. По плотности запасов в сеноманском пласте ПК1 оно находится на второй позиции, уступая только уникальному Русскому месторождению-гиганту.

Русское месторождение гигантское месторождение высоковязкой нефти, расположенное за полярным кругом, на территории Западной Сибири. Месторождение открыто в 1968 году и характеризуется огромными геологическими запасами, оцениваемыми более чем в 1,3 млрд. тонн высоковязкой нефти. Месторождение сильно расчленено, крайне неоднородное (залежь разделена на 14 тектонических зон).

Терригенный коллектор слабо сцементирован; присутствует газовая шапка; разработка осложняется зоной вечной мерзлоты, вязкость нефти очень высокая (более 250–300 СП в пластовых условиях). Для успешной разработки запасов нефти, находящихся в сложных геологических и географических условиях, особое внимание уделяется испытанию новых технологий [5].

Оба упомянутых объекта характеризуются полной геологической аналогией: их промышленные скопления углеводородов связаны с одним и тем же стратиграфическим горизонтом — продуктивной толщей покурской свиты (пласт ПК1). Эти резервуары рассматриваются как прямые стратиграфические и литологические двойники, демонстрирующие принципиально схожую архитектуру залежей и близкие фильтрационно-емкостные свойства.

Для изучаемого пласта типично чрезвычайно сложное геологическое устройство, проявляющееся в тонком линзовидно-слоистом чередовании рыхлых песков, алевролитов и глин с высокой структурно-текстурной неоднородностью по площади и разрезу. Главные литологические особенности данных отложений — это низкая степень цементации, рыхлая упаковка обломочного материала и резко выраженная слоистая неоднородность практически по всему разрезу.

Коллекторы пласта — это преимущественно мелкозернистые песчаники, реже крупно-среднезернистые разности и песчаные алевролиты полимиктового состава. Породы слабосцементированные или рыхлые, со сложной структурой пустотного пространства и крайне неоднородны по текстуре, количеству обломочного материала, глинистого и карбонатного цемента, а также интенсивности вторичных изменений.

Песчаники светло-серые, в нефтенасыщенном состоянии — желтые и светло-коричневые, преимущественно слабосцементированные, часто рассыпающиеся при прикосновении. Алевролиты светло-серые и серые, крупно- и разномзернистые, слабосцементированные, ме-

стами известковистые, тонко чередуются с мелкозернистыми песчаниками и темно-серыми глинами. Нефтенасыщенные разности алевролитов также имеют желтоватый и светло-коричневый цвет [1, 2, 3].

Северо-Комсомольское месторождение находится в пределах Губкинского нефтегазоносного района Надым-Пурпейской нефтегазоносной области, геологический разрез которой характеризуется достаточно широким диапазоном (более 2000 м) промышленной нефтегазоносности, включающим отложения от верхнего мела до средней юры.

Вязкость и плотность пластовой нефти составляет 66,17 мПа·с и 0,906 г/см³, коэффициент сжимаемости $5,43 \cdot 10^{-4}$ 1/МПа. По результатам стандартного разгазирования газосодержание нефти составляет 34,3 м³/т, объемный коэффициент 1,070, плотность нефти в стандартных условиях 0,947 г/см³, плотность нефтяного газа 0,680 кг/м³. Подсчетные параметры, принятые по результатам дифференциального разгазирования, следующие: газосодержание 34,3 м³/т, объемный коэффициент 1,070, пересчетный коэффициент 0,935, плотность сепарированной нефти 0,947 г/см³. По плотности в стандартных условиях нефть классифицируется как битуминозная. Плотность нефтяного газа 0,677 кг/м³ [4].

Русское месторождение расположена на юго-востоке Тазовского нефтегазоносного района (НГР) Пур-Тазовской нефтегазоносной области (НГО) в пределах земель с весьма высокими плотностями потенциальных запасов

углеводородов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП).

Плотность нефти варьирует в пределах 0,924–0,950 г/см³, среднее значение — 0,940 г/см³. По этому показателю нефть относится к наиболее тяжёлым в Западной Сибири. Вязкость при 20 °С (практически пластовая температура) составляет 179–996 сП, средняя — 545,7 сП, что в 5–6 и более раз превышает вязкость нефтей разрабатываемых месторождений. Содержание серы — 0,13–0,84 %, среднее — 0,31 %. Нефть классифицируется как малосернистая и сопоставима с наиболее качественными нефтями Шаимской группы. Парафины — 0,14–2,49 %, среднее — 1,09 %. Нефть относится к наименее парафинистым в регионе. Асфальтены — 0,18–2,28 %, среднее — 0,93 %, что типично для нефтей Западной Сибири. Силикагелевые 6,95–19,6 %, среднее — 10,11 % [1].

Подводя итоги, можно сказать, что оба месторождения являются стратиграфическими и литологическими аналогами со схожей архитектурой залежей, однако существенно различаются по физико-химическим свойствам пластовых флюидов: нефть Русского месторождения характеризуется экстремально высокой вязкостью (до 996 сП) и плотностью (до 0,950 г/см³), тогда как на Северо-Комсомольском эти показатели ниже. Показано, что коллекторы обоих объектов представлены слабосцементированными мелкозернистыми песчаниками и алевролитами с высокой структурно-текстурной неоднородностью, что требует применения специальных технологий разработки.

Литература:

1. Жданов М. Д. Скважинная добыча сверхвязких нефтей на примере Русского месторождения. — Красноярск: СФУ, 2021.
2. Исследование нефти Северо-Комсомольского месторождения, скважина 450 (Западная Сибирь). ВНИИ НП, М, 1988.
3. Карогодин Ю. Н., Казаненков В. А., Рыльков С. А. Северное Приобье Западной Сибири. Геология и нефтегазоносность неокома. Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», Новосибирск, 2000.
4. Оперативный подсчет запасов УВ пластов ПК1, БП3/2 Северо-Комсомольского месторождения. Лицензия СЛХ №16459НЭ от 17.08.2018. Договор №19/ГРП-2018СК. Уфа, 2018г. — С. 34.
5. Телков В., Лачугин Д. С. Русское месторождение — Партнер проект разработки месторождения высоковязкой нефти на севере России: трудности и проблемы разработки, пути их решения // XII Международная конференция «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». Москва-Занджан. 2013.
6. Фаезов, Р. Р. Геолого-тектоническое строение и характеристика продуктивного пласта ПК1 Северо-Комсомольского нефтегазового месторождения / Р. Р. Фаезов. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2026. — № 13 (616). — С. 336–339. — URL: <https://moluch.ru/archive/616/134760>.

ЭКОЛОГИЯ

Озеленение городов: нормативная база и учет климатических последствий принимаемых градостроительных решений

Сванидзе Зураб Зурабиевич, студент

Научный руководитель: Плотникова Юлия Анатольевна, кандидат юридических наук, доцент
Саратовская государственная юридическая академия

В статье анализируется нормативная база в области регулирования градостроительной и природоохранной деятельности РФ применительно к проблеме городских «островов тепла». Выявлены пробелы в законодательстве: отсутствие требований к климатической адаптации материалов и недостаточность нормативов озеленения. Предложены правовые механизмы снижения эффекта: использование материалов с высоким альбедо, зелёные крыши, повышение норм озеленения и законодательное закрепление практики искусственных осадков над парками.

Ключевые слова: городской остров тепла, градостроительное законодательство, климатическая адаптация, зелёные насаждения, экологическая безопасность.

Landscaping of cities

Svanidze Zurab Zurabievich, student

Scientific advisor: Plotnikova Yulia Anatolievna, phd in law, associate professor
Saratov State Law Academy

The article analyzes the regulatory framework for urban planning and environmental protection in the Russian Federation in relation to the problem of urban heat islands. The article identifies gaps in the legislation, such as the lack of requirements for climate adaptation of materials and insufficient standards for landscaping. The article proposes legal mechanisms to reduce the effect, including the use of materials with high albedo, green roofs, increased landscaping standards, and the legalization of artificial precipitation over parks.

Keywords: urban heat island, urban planning legislation, climate adaptation, green spaces, environmental safety.

Эффект городского острова тепла — локальное накопление тепловой энергии в районах мегаполисов, вызванное особенностями застройки и интенсивной деятельностью промышленности, транспорта и энергетики. Это явление определяет основные черты городского климата: рост температуры напрямую влияет на энергетический баланс экосистем, формируя уникальные микроклиматические условия. В исследовании рассмотрены причины возникновения ГОТ в крупных городах, последствия для экосистем и пути снижения его воздействия.

На экологическое состояние мегаполиса влияют факторы разного рода — от природно-географических и климатических до социально-экономических, техногенных и градостроительных. Атмосфера оказывается загрязнённой разными веществами: пылью, дымом, паром, газами. Согласно исследованиям, США отвечают примерно за 30 % глобальных атмосферных выбросов, Россия же

обеспечивает около одной седьмой части этих выбросов [Глушкова, 2003]. Более 90 % массы техногенных выбросов приходится на углекислый газ и водяной пар: основной источник — транспорт (60 %), далее энергетика на ископаемом топливе (14 %) и промышленность (17 %) [Игнатов, Кокин, 2003]. Дальнейшее сохранение нынешних темпов антропогенного воздействия чревато необратимыми изменениями в биосфере.

Городской микроклимат отличается образованием «островов тепла», где техногенное тепло достигает половин солнечной радиации. Устойчивые «острова» представляют собой купола тёплого воздуха над мегаполисами площадью от 100 км². Средняя температура внутри таких зон превышает прилегающие территории на 4 °С, а при слабом ветре ночью разница достигает 6–8 °С и более.

Над районами с плотной застройкой формируется зона повышенной температуры. К середине 1980-х годов

выявлены основные физические процессы, порождающие этот эффект. Городская территория создаёт плато тёплого воздуха, где температура растёт к центру, прерываясь холодными впадинами — парками, водоёмами, и очагами тепловыделения: промышленными комплексами, энергоблоками, транспортными магистралями и жилой застройкой.

На стыке городской зоны и пригородной или между промышленными и жилыми кварталами возникает резкий вертикальный градиент температуры — «уступ» изолированного теплового острова, достигающий нескольких градусов. Загрязнение атмосферы затрудняет проникновение солнечного излучения, включая ультрафиолет. В Балтиморе (США) потеря ультрафиолета достигает 50 %, в Москве — 25–30 %, в Санкт-Петербурге — 17–24.

Температура в мегаполисе резко подскакивает — на 7–15 °C выше природных уровней. Причина — накопление тепла от промышленных объектов, автомобилей, парниковых газов и прочих антропогенных источников. Промышленные и бытовые выбросы усугубляют ситуацию. Зелёные зоны сокращаются, стоки перехватываются дренажными системами — испарение падает. Высокие здания создают естественные каналы для застоя тёплого воздуха, а материалы облицовки и фасадов накапливают тепло, отдавая его ночью.

Асфальт, бетон, каменные сооружения — главные аккумуляторы жары. Летом температура покрытий в Москве достигает 52 °C, в Ереване — 65–70 °C, а в Ташкенте она поднимается до 80 °C. Воздушный поток уносит горячую массу на 30–50 км по направлению ветра. В Европе разница между центром города и окраиной летом может составлять 5–7 °C, зимой — до 2–8 °C при отдельных случаях пика в 15 °C.

Перепады температур запускают устойчивые конвекционные потоки — «городские бризы», проявляющиеся при отсутствии ветра. В безветренную погоду над центром формируется «тепловой купол» из загрязнённого воздуха, приносящегося с окраин. Явление прослеживается на высоте до нескольких сотен метров. При диаметре «острова» 10 км и скорости ветра 1 м/с вертикальные потоки в слое до 500 м достигают 10 м/с. Низкое давление над «островом» снижает облачность по сравнению с окружающими районами.

Размещение промышленных объектов требует учёта розы ветров — ключевой климатической особенности региона. В Москве каждый район характеризуется собственным ветровым режимом, который прямо влияет на проектирование предприятий. Градосфера — зона антропогенного воздействия города, охватывающая территории в 40–50 кратных размерам населённого пункта и достигающая высоты до 5 км — в агломерациях США и Западной Европы объединяет множество поселений, что усиливает общий эффект.

Микроклимат строительной площадки определяет траекторию переноса и рассеивания загрязнителей. ГОТ накапливает вредные выбросы, которые оседают дождями

на удалении от источника — в направлении господствующих ветров. Чтобы снизить токсичность таких осадков, авторы предлагают инициировать искусственные дожди над парками или водоёмами при прохождении ГОТ. Современные технологии делают такой подход реальным.

Сравнительный анализ текущего законодательства Российской Федерации в сфере охраны природной среды и градостроительства выявляет наличие правовых инструментов, способных содействовать смягчению проявлений эффекта «островов тепла». Так, согласно Лесному кодексу РФ [Федеральный закон от 04.12.2006 № 200-ФЗ], зелёные и лесопарковые зоны относятся к категории защитных лесов [ст. 102]. Установленный для этих территорий правовой режим, включающий запрет на строительство капитальных объектов и применение токсичных химических веществ [ст. 114], создаёт условия для сохранения естественного микроклимата и формирования «холодных впадин», способных разрушать устойчивые массы тёплого воздуха в условиях мегаполиса. Дополнительно Закон «Об охране окружающей среды» [от 10.01.2002 № 7-ФЗ] предусматривает создание лесопарковых зелёных поясов [ст. 62.1] — территорий с ограниченным режимом использования, выступающих современной правовой основой для построения экологической инфраструктуры городов.

Тем не менее, несмотря на наличие нормативных рамок, действующее регулирование в основном носит охранительный (запретительный) характер и не содержит прямых требований к субъектам градостроительной деятельности по активной адаптации к климатическим изменениям, включая эффект городского теплового острова. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть возможные направления улучшения правового обеспечения в данной области.

Отдельного внимания заслуживает правовой режим землепользования и застройки как фактор, непосредственно влияющий на формирование городских «островов тепла». Действующие правила землепользования и застройки муниципальных образований, как правило, содержат лишь общие требования к коэффициенту застройки и проценту озеленения, но не учитывают климатические последствия принимаемых градостроительных решений.

В соответствии со ст. 35 Градостроительного кодекса РФ, в состав жилых зон могут включаться зоны застройки индивидуальными жилыми домами, малоэтажными, среднеэтажными и многоэтажными жилыми домами, а также зоны жилой застройки иных видов. Однако параметры застройки в настоящее время ориентированы преимущественно на прочность и износостойкость, не учитывая влияние асфальтобетонных и каменных поверхностей на накопление тепла в условиях климатических изменений.

Существенным пробелом является также отсутствие в ст. 11 Земельного кодекса РФ принципа климатически ответственного землепользования. Существующий пере-

чень принципов земельного законодательства [ст. 1 ЗК РФ] включает приоритет охраны земли как важнейшего компонента окружающей среды, однако не содержит требований к учёту теплового баланса территории при предоставлении земельных участков под застройку.

В связи с этим предлагаю следующие изменения в законодательство:

Дополнить ст. 35 Градостроительного кодекса РФ нормой, обязывающей при разработке правил землепользования и застройки учитывать розу ветров и тепловой баланс территории, устанавливая предельные параметры высотности и плотности застройки с учётом естественной вентиляции (аэрации) кварталов.

Ввести в ст. 1 Земельного кодекса РФ новый принцип — климатически ответственного землепользования, согласно которому при предоставлении земельных участков под жилую и общественную застройку необходимо предусматривать создание «холодных коридоров» (незастроенных проветриваемых полос) и сохранение естественных водоёмов как элементов природной терморегуляции.

Закрепить в ст. 7.1 СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» [утверждён Приказом Минстроя России от 30.12.2016 № 1034/пр, действует с 01.07.2017] минимальные расстояния между высотными зданиями с учётом их геометрии для обеспечения беспрепятственного движения воздушных масс и предотвращения застоя нагретого воздуха в «дворах-колодцах». Данный свод правил в соответствии с п. 4.13 устанавливает ограничения на градостроительную деятельность в зависимости от природных и техногенных факторов, однако прямо не регулирует параметры аэрации застройки в целях снижения теплового эффекта.

Требуется внести поправки в Свод правил «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» [СП 42.13330.2016]. Рекомендуется до-

полнить разделы, касающиеся дорожных покрытий и фасадных материалов, положением о обязательном применении в новых проектах строительства и реконструкции материалов с высоким альбедо — способных отражать солнечное излучение, а также устройстве эксплуатируемых «зелёных крыш». Нынешние требования ориентированы преимущественно на прочность и износостойкость, не учитывая влияние асфальтобетонных и каменных поверхностей на накопление тепла в условиях климатических изменений.

Целесообразно закрепить на федеральном уровне минимальные нормативы озеленения общественных территорий с учётом климатических зон. Для компенсации антропогенного теплового воздействия со стороны промышленных предприятий и транспортных магистралей (вносящих до 77 % выбросов) предлагается повысить действующие нормы озеленения (например, для мегаполисов — с 19–25 м² на человека до 30–35 м²), включив в методику расчёта поправочный коэффициент, учитывающий риск перегрева в зависимости от климатической зоны.

Сохраняя идею усиления выпадения осадков над парками и водоёмами как механизма естественного охлаждения, необходимо придать ей правовую форму. Рекомендуется дополнить Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» положением, обязывающим региональные органы власти при прогнозировании экстремально высоких температур (формирование стабильного «теплового купола») заключать соглашения с МЧС и Росгидромет центром. Целью таких договорённостей должно стать направление искусственного осадкообразования преимущественно над зелёными зонами и водными объектами, что позволит реализовать конституционное право граждан на благоприятную среду обитания [ст. 42 Конституции РФ] в условиях резких погодных аномалий.

Литература:

1. Голицын, А. Н. Основы промышленной экологии: учебник / А. Н. Голицын. — Москва: Академия, 2002. — 240 с.
2. Глушкова, В. Г. Экологоэкономические проблемы России и её регионов: учебное пособие / под ред. В. Г. Глушковой. — Москва: Московский Лицей, 2003. — 303 с.
3. Игнатов, В. Г. Экология и экономика природопользования / В. Г. Игнатов, А. В. Кокин. — РостовнаДону: Феникс, 2003. — 508 с.
4. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 25.12.2023), ст. 35.
5. Земельный кодекс Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 22.06.2024), ст. 1, ст. 11.
6. Лесной кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 200-ФЗ: [принят Государственной Думой 8 ноября 2006 года: одобрен Советом Федерации 24 ноября 2006 года]. — Москва: Проспект, 2025. — 223 с.
7. Закон Об охране окружающей среды: Федеральный закон № 7-ФЗ: [принят Государственной Думой 20 декабря 2001 года: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года]. — Москва: Эксмо, 2025. — 94 с.
8. Конституция (1993). Конституция Российской Федерации: [принята всенародным голосованием 12 декабря 1993 г. с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 1 июля 2020 г.]. — Москва: Проспект, 2025. — 63 с.
9. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений: Свод правил: утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2016 г. № 1034/пр: дата введения 2017–07–01. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 135 с.

Молодой ученый

Международный научный журнал

№ 20 (623) / 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.

Номер подписан в печать 27.05.2026. Дата выхода в свет: 03.06.2026.

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.

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

Отпечатано в типографии издательства «Молодой ученый», 420029, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.