Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

ТЕХНОСФЕРА

Материалы
III Всероссийской научной конференции
с международным участием

(**29–30 сентября 2026 г.**)

Краснодар
2026

УДК 621.3+62-4/-9/622+553+66+377/378
ББК 39.53+33.36+31.15/31.2+35.50/35.61+26.30/26.34+74.4
Т38

Т38 **ТЕХНОСФЕРА** : материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием «Техносфера» (29–30 сентября 2026 г.) / ФГБОУ ВО «КубГТУ». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2026. – 332 с.

ISBN 978-5-91718-815-7

Сборник содержит материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием «Техносфера», проведенной в г. Краснодаре 29–30 сентября 2026 года на базе факультета нефти, газа и энергетики Кубанского государственного технологического университета.

В настоящем издании представлены результаты исследований в области энергетики, химических технологий, геологии, поиска, разработки, эксплуатации месторождений полезных ископаемых, их транспортировки и переработки сотрудников научно-исследовательских, учебных, проектно-внедренческих и эксплуатационных организаций Российской Федерации и зарубежных стран, а также публикации в области гуманитарных наук.

ББК 39.53+33.36+31.15/31.2+35.50/35.61+26.30/26.34+74.4
УДК 621.3+62-4/-9/622+553+66+377/378

ISBN 978-5-91718-815-7

© Коллектив авторов, 2026
© ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2026
© Оформление: ООО «Издательский Дом – Юг», 2026

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Нековаль Светлана Николаевна – кандидат биологических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия.

Заместитель председателя:

Кашин Яков Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин ФНГЭ ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия.

Члены оргкомитета:

Поляков Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, и.о. декана факультета нефти, газа и энергетики ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия;

Григораш Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», г. Краснодар, Россия;

Копелевич Лев Ефимович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электрических машин ФНГЭ ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия;

Кочарян Евгений Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики и теплотехники ФНГЭ ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия;

Середа Полина Витальевна – кандидат филологических наук, доцент, заведующая кафедрой иностранных языков №1 ФФН ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет» г. Краснодар, Россия.

Секретариат:

Ким Владислав Анатольевич – старший преподаватель кафедры электротехники и электрических машин ФНГЭ ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА. АВТОМАТИКА
ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЭКОЛОГИЯ. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

ЭНЕРГЕТИКА. АВТОМАТИКА

Алексеев Д.А., Дьяченко Р.А.
Анализ методов взаимодействия групп автономных роботов
с учетом ограничений информационного обмена 10

Алексеев Д.А., Дьяченко Р.А.
Сравнительный анализ алгоритмов координации взаимодействия автономных
мобильных роботов в мультиагентных системах 14

Антипова А.А., Лазарев Д.С., Коновалов Д.Н., Истомина М.А.
Перспективы развития электробаромембранных аппаратов трубчатого типа 18

Безбородов Е.С., Малинкина Ю.И., Гордеева А.С.
Учёт потерь в двумерной тепловой модели асинхронного двигателя
с фазным ротором 21

Городушкин Р.В.
Экспериментальное определение термонапряжений при сварке
фрагментов поплавка указателя уровня 24

Долгова О.В., Малин П.М., Истомина М.А.
Анализ влияния электрического поля различной напряженности
на поверхностную структуру нанофильтрационной мембраны ОПМН-П 29

Епифанов А.В., Скоробогатов М.Э.
Оценка энергозатрат на перевод стрелки при использовании
двигателей постоянного тока 32

Кашин Я.М., Гимбицкий В.А., Яресько Н.Е.
Анализ и расчёт ветросолнечной генераторной установки
для автономного электроснабжения объектов малой мощности 35

Кашин Я.М., Климов В.В., Попович Е.И.
Устройства для обнаружения металлических предметов 40

Кашин Я.М., Морозов В.В., Ченцов М.А.
Перспективные устройства для определения мест повреждения кабеля
с использованием импульсно-радиационного метода диагностики 45

Кашин Я.М., Тулиев К.А., Вах П.И., Аджигириев А.М.
Импульсно-радиационный метод диагностики кабельных линий электропередачи 49

Обухова Н.А., Мотыко А.А., Поздеев А.А.
Метод обнаружения объектов интереса в видеосистеме
орнитологической безопасности аэропортов 52

Попрядухин П.И.
Методология проектирования гибридных систем солнечного освещения
для помещений с ограниченным доступом естественного света 59

Рахматуллина Э.Ф., Питецкий Е.А.
Проблема ложных срабатываний извещателей пламени
на объектах нефтегазового комплекса и пути ее решения 63

Савич Е.К., Кленовский С.А.
Разработка автоматизированной системы метрологического контроля
на основе технологий машинного зрения 67

Терехов В.В., Выскубов Е.В., Терехов В.В.
Статическая модель инерционного устройства очистки 69

Толкач М.Д., Богомазова Н.В.
Особенности получения микро- и наноразмерных пленок сульфидных
полупроводников методом ионного наслаивания 73

Тутаев Г.М., Безбородов Е.С., Малинкина Ю.И.
Обработка результатов температурных испытаний асинхронного двигателя
с фазным ротором 77

Хренов С.И., Мирзабекян Г.З., Турчанинова Ю.С.
Гелиоэнергетика в авиации 81

Шелехов И.Ю., Шелехова А.И.
Новые технологии электрообогрева для птицефабрик 85

Юровская М.А., Лебедев А.Е., Гуданов И.С.
Исследование влияния размера частиц дисперсной фазы на процесс сепарации
пылегазового потока в инерционно-центробежном пылеуловителе 88

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЭКОЛОГИЯ. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Алексеев Ф.С.
Анализ текстурных характеристик алюмосиликатных носителей катализаторов
с использованием коллоидного кремнезема 93

Баклаженко К.В., Глебова Е.В.
Анализ влияния социально-биографических характеристик на итоговую
оценку уровня культуры производственной безопасности работника 96

Барановская Е.И., Полховская А.О.
Высокотемпературные керамические пигменты шпинельной структуры 99

Бобоев Х.Б., Назруллоева А.А.
Анализ технического состояния канализационных очистных
сооружений (КОС) г. Душанбе 103

Вертепа А.В., Терещенко К.А., Улитин Н.В.
Анализ спектров констант затухания λ_j как инструмент диагностики катализаторов
и оптимизации режима синтеза Фишера-Тропша 106

Вертепа А.В., Терещенко К.А., Улитин Н.В.
Спектральный анализ молекулярно-массовых распределений продуктов синтеза
Фишера-Тропша как метод идентификации полицентровости катализатора 110

Гужель Ю.А.
Моделирование установки адсорбционной осушки и очистки природного газа 113

Долматов Б.Б., Нигматуллин В.Р.
Экстрактивная ректификация лёгкой масляной фракции под вакуумом 117

Дутова В.С., Валеева А.Р., Готлиб Е.М., Галимов Э.Р.
Исследование влияния цеолитов на процесс отверждения эпоксидных полимеров методом дифференциально-сканирующей калориметрии 121

Замилов Э.Р., Глебова Е.В.
Риск: вычисление, анализ, представление 124

Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Михалев С.С., Коновалов Д.Д.
Модернизация рулонного электрохимического мембранного аппарата для очистки и концентрирования технологических растворов 128

Кудрявцев А.С., Охапкин К.А.
Сравнительный анализ стабильности структуры в процессе длительного термического старения аустенитной стали хромоникелевой композиции при легировании углеродом и азотом 130

Николаева Е.Б., Игумнова М.М., Артемьева А.М., Кулуев Б.Р.
Содержание каучука в отдельных органах растений *Lactuca L.* коллекции ВИР, выращенных в условиях Башкирии 135

Петров В.Н.
Комплексная оценка технического состояния насосных агрегатов типа ЦНС как основа критерия вывода в капитальный ремонт 138

Пискунов И.В., Антонов А.С.
Возможности и ограничения прогнозирования реологических свойств дорожных битумов по стандартным показателям 144

Попова Е.В., Файзуллин А.Р.
Перспективы использования мобильных роботизированных средств при тушении турбинных отделений теплоэлектроцентралей 147

Рукавицин С.Н., Бутылкин Ю.П., Конькова Т.В.
Концентрирование метаболического CO_2 в замкнутых обитаемых объектах техносферы 150

Смирнов Е.А., Михайлова А.А.
Рециклинг отходов пенопласта в производстве полимерных композитов 153

Смородин К.А., Савельева Д.О., Казарина О.В.
Исследование газотранспортных характеристик половолоконных газоразделительных мембран для задачи выделения водорода из газовых смесей 157

Субхонов Д.К.
Исследование влияния дисперсности золы угля на свойства гипсо-зольного вяжущего 160

Шугаева А.Р., Мельников Н.О.
Термический анализ и огнезащитная эффективность антипиренов и их смесей при химической защите древесины 164

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Гончаренко В.И., Лукашенко И.Е., Резниченко В.И.
Особенности ремонта пробоин сотовых конструкций из композиционных материалов летательных аппаратов 167

НАУКИ О ЗЕМЛЕ. СТРОИТЕЛЬСТВО. ТРАНСПОРТ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Борисова С.Д., Губаев Э.А.
Донные отложения как фактор формирования видового разнообразия и биомассы макрофитов карстовых озер на примере озера Глубокое г. Казани 176

Воробьев А.Е., Мадаева М.З., Джамалуева А.А.
Научные исследования в области воздействия горнодобывающие предприятия 178

Говоркова Л.К., Нассер М.Г.
Исследование микрофлоры озера Средний Кабан в районе казанской ТЭЦ-1 181

Гордеева М.Э., Жаров Д.Н.
Суммарная антиоксидантная активность почвенных вытяжек как потенциальный индикатор антропогенной нагрузки на городские территории 183

Гуляев В.Н., Каримов Р.Р.
Технологические методы повышения качества заканчивания скважин 186

Гуляев В.Н., Каримов Р.Р.
Геологическая неопределенность и заканчивание скважин. Проблематика упущенных возможностей 189

Гутник В.Ф., Бойко В.А.
Сравнение буровзрывных способов проходки выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты 194

Дьяченко Р.А., Ярутин С.А., Афонин Д.Г.
Пространственно-геометрическая неоднородность LiDAR-облаков промышленных объектов 202

Каграманов К.Н., Бабаева М.Т., Гюнай Вагиф кызы
Оценка и анализ остаточных извлекаемых запасов нефти на длительных разрабатываемых месторождениях Апшерона 204

Каграманов К.Н., Бабаева М.Т., Гюнай Вагиф кызы
Литологические изучения разреза продуктивной толщи Южно-Каспийской впадины секвенс-стратиграфическим методом 209

Колесова С.Б., Мирсаетов О.М.
Развитие технологии одновременно-раздельной эксплуатации подключаемых объектов боковыми стволами реликвидируемой скважины в многоствольном исполнении 214

Колыбельский Д.С.
Влияние типа кальциевого детергента на условия структурообразования пластичных смазок 218

Макаров А.Б., Талалай А.Г., Хасанова Г.Г.
Литотехногенез и условия формирования техногенно-минеральных месторождений в Уральском регионе 221

Макаров А.Б., Хасанова Г.Г.
Техногенные источники меди в Уральском регионе 224

Мовсумова У.А.
Региональная дифференциация олигоцен-нижнемиоценовых и средне-верхнемиоценовых нефтематеринских толщ Альпийско-Кавказской области 226

Паничкин И.О.
Метод геометрической типизации трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы 232

Петрушин Е.О.
Алгоритм выбора способа восстановления производительности скважин 235

Полетаев А.В., Полетаева Е.В.
Исследование газогидратов Южного Каспия по сейсмическим данным 243

Полетаева Е.В., Полетаев А.В.
Газогидраты глубоководной части Южного Каспия: температура и давление 247

Радомская В.И.
Распределение тяжелых металлов во взвешенном веществе малых водотоков в районе золоторудного месторождения 251

Солодовников А.Ю.
О вкладе Ханты-Мансийского автономного округа-Югры в добычу нефти и газа в России в начале XXI в. 254

Степанов Р.И., Прокатень Е.В.
Микробиологические методы увеличения нефтеотдачи рифейской залежи Юрубчено-Тохомского месторождения 256

Стетюха В.А.
Трансформация экосистем в криолитозоне в условиях глобального потепления 258

Тагаев Е.А.
Обоснование адаптивного шага сети опережающего опробования углей сложноструктурного пласта по результатам пространственной кроссвалидации 261

Тихонов Е.В.
Применение акриловых полимеров «Praestol» при бурении скважин 265

Хамза Х.А., Величко Е.И., Мягкий Я.Б., Гилаев Г.Г., Аль-Кадхи К.Ф.А.
Технологии улавливания, использования и хранения углерода в выработанных нефтяных пластах в условиях месторождений Центральной Африки 271

Чукаева М.А.
Фиторемедиация урбоэкосистемы Шуваловского карьера 274

СТРОИТЕЛЬСТВО. ТРАНСПОРТ

Аникеева А.А.
Применение отработанного моторного масла для отопления помещений (сервисных центров) как способ его переработки 277

Ишков А.М., Бояршинов А.Л., Антонов Г.А.
Анализ аварийности в г. Якутске за период 2020–2025 гг. 279

Кербс Я.П., Медовикова А.А., Римшин В.И.
Организационно-технологические решения при усилении фундаментов объектов культурного наследия в стеснённых условиях городской застройки 284

Манастырный Д.Н.
Озеленение кровель и фасадов многоэтажных жилых комплексов 287

Манастырный Д.Н.
Цифровое управление зеленой инфраструктурой жилых комплексов 290

Савич Е.К., Арзамасцев А.А., Фролова А.С.
Значение предиктивной аналитики в управлении эффективностью технического обслуживания грузового автотранспорта 293

Ситдикова Э.Р.
Перспективные методы утилизации изношенных автомобильных шин в России 296

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Вьюнова Е.К., Павленко Е.А.
Прагматический потенциал фразеологических единиц в политическом дискурсе 299

Миклина О.А.
К вопросу об изучении определений профессиональных понятий нефтегазовой тематики на начальном этапе обучения 302

Питкин В.А., Белоусова А.С.
Диагностика, лечебная физическая культура гипертрофии тел Гоффа коленных суставов 307

Питкин В.А., Бобровник В.О.
Сидячий образ жизни: эволюционный конфликт и современная эпидемия 310

Питкин В.А., Назаренко С.И.
Формирование индивидуальной образовательной траектории по физической культуре средствами цифровой аналитики 313

Погорельская Е.Ю., Чернов Л.С.
Некоторые добавления к вопросу о технической реальности 316

Руденко А.Е., Питкин В.А.
Проектирование информационной системы персонального трекинга и анализа прогресса в силовых видах спорта 319

Хронин Е.Д., Питкин В.А.
Виртуальная реальность в адаптивной физической культуре для детей с ограниченными возможностями здоровья 324

Чепелюк А.М., Питкин В.А.
Искусственный интеллект в профессиональном футболе: системы компьютерного зрения для оценки командных взаимодействий 328

ЭНЕРГЕТИКА. АВТОМАТИКА. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЭКОЛОГИЯ. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

ЭНЕРГЕТИКА. АВТОМАТИКА

УДК 007.52

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУПП АВТОНОМНЫХ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

Алексеев Дмитрий Александрович
Кубанский государственный технологический университет
ассистент кафедры информатики и вычислительной техники, факультет информационных технологий и кибербезопасности
1qazwsxedc2001@gmail.com

Дьяченко Роман Александрович
Кубанский государственный технологический университет
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информатики и вычислительной техники, Факультет информационных технологий и кибербезопасности
djachenko.roman@kubstu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены основные методы взаимодействия групп автономных роботов: централизованные, децентрализованные, консенсусные, рыночные, поведенческие и роевые. Показано, что эффективность многороботной системы определяется не только алгоритмом распределения задач, но и объемом доступной информации, характеристиками коммуникационной сети и способностью роботов адаптироваться к изменению внешней среды. Выполнено сравнительное обобщение существующих подходов по критериям автономности, масштабируемости, устойчивости к отказам, зависимости от связи и адаптивности. Предложен показатель устойчивости взаимодействия, позволяющий оценивать снижение эффективности системы при ухудшении информационного обмена. Сформулирован принцип двухуровневой координации, объединяющий распределение задач с локальным взаимодействием роботов.

Ключевые слова: многороботная система, группа роботов, взаимодействие роботов, координация, распределение задач, децентрализованное управление, консенсус, информационный обмен, коммуникационная сеть, автономные роботы.

Современное развитие робототехники характеризуется переходом от применения отдельных автономных устройств к использованию групп роботов, способных совместно решать задачи мониторинга, поиска, транспортировки, обследования и управления объектами. Использование нескольких роботов позволяет одновременно работать в различных участках пространства, распределять вычислительную и физическую нагрузку и повышать устойчивость системы при отказе отдельных элементов [1]. Вместе с тем увеличение количества роботов приводит к росту числа потенциальных информационных связей и усложнению координации. Поэтому одной из ключевых задач становится организация такого взаимодействия, при котором локальные решения отдельных роботов обеспечивают достижение общей цели.

В классической постановке задача взаимодействия часто сводится к распределению заданий между роботами. Пусть

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}; \quad (1)$$

– множество роботов, а

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}; \quad (2)$$

– множество задач. Тогда требуется определить соответствие между элементами (R) и (T) с учетом ограничений системы и выбранного критерия эффективности [2]. Однако практическое взаимодействие не ограничивается моментом назначения задания. В процессе его выполнения роботам необходимо обмениваться информацией о текущем состоянии, корректировать действия, учитывать изменение среды и перераспределять задачи при возникновении отказов.

Наиболее простым является централизованный подход, при котором вся информация поступает в единый управляющий узел. Он формирует глобальный план и распределяет задачи между роботами. Преимуществом такой архитектуры является возможность использования полной информации о состоянии группы и применения оптимизационных алгоритмов. Недостатками становятся зависимость от центрального узла, рост вычислительной нагрузки и снижение устойчивости при нарушении связи.

При децентрализованном подходе решение принимает непосредственно робот на основе локальных данных и информации от соседей. Это повышает автономность и устойчивость группы, поскольку отказ одного элемента не приводит к полной потере управления. Для описания такой системы удобно использовать граф взаимодействия

$$G = (V, E), \quad (3)$$

где (V) – множество роботов, (E) – множество информационных связей между ними.

Изменение структуры (E) влияет на распространение информации и, следовательно, на согласованность действий роботов.

Одним из распространенных механизмов распределенного взаимодействия являются алгоритмы консенсуса. При их использовании каждый робот корректирует свое состояние на основании данных соседних элементов. В общем виде процесс может быть представлен выражением

$$x_{i(k+1)} = x_{i(k)} + \alpha \backslash \mathrm{sum}_{\{j \in N_i\}(x_{j(k)} - x_{i(k)})}, \quad (4)$$

где $(x_{i(k)})$ – состояние (i)-го робота; (N_i) – множество его информационных соседей, (α) – коэффициент обновления.

Подобные алгоритмы применяются для согласования скорости, направления движения, положения и других параметров группы [3]. Их эффективность непосредственно зависит от связности коммуникационной сети и доступности актуальной информации.

Для распределения задач получили распространение рыночные и аукционные методы. В них роботы оценивают стоимость выполнения задания с учетом расстояния, времени, энергетических затрат и собственной загрузки, после чего выбирается исполнитель [4]. Преимущество таких методов заключается в возможности оперативного перераспределения задач. Однако увеличение количества переговоров повышает требования к коммуникации, а при неполной информации решение может отличаться от оптимального.

Поведенческие и роевые подходы строятся на использовании относительно простых локальных правил. Робот одновременно реагирует на окружающую среду и действия соседей, а коллективное поведение формируется как результат совокупности локальных взаимодействий [5]. Такие системы отличаются масштабируемостью и устойчивостью к изменению состава группы, однако их глобальное поведение сложнее прогнозировать, особенно при выполнении взаимосвязанных задач.

Сравнительная оценка основных подходов показывает, что каждый из них обладает собственным набором преимуществ и ограничений.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов взаимодействия групп роботов

Метод	Автономность	Масштабируемость	Устойчивость к отказам	Зависимость от связи	Адаптивность
Централизованный	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая	Средняя
Децентрализованный	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Консенсусный	Высокая	Высокая	Средняя–высокая	Средняя–высокая	Высокая
Рыночный	Высокая	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая
Поведенческий	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Роевой	Очень высокая	Очень высокая	Высокая	Средняя	Высокая

Важным недостатком большинства традиционных методов является предположение о наличии стабильного информационного обмена. В реальной системе возможны задержки сообщений, потеря пакетов, уменьшение радиуса взаимодействия и временное разделение группы. В результате даже алгоритм, показывающий высокую эффективность при штатных условиях, способен значительно ухудшить характеристики при снижении качества связи [6].

Для учета данного фактора предлагается использовать коэффициент устойчивости взаимодействия

$$K_{\text{уст}(\rho)} = \frac{\eta(\rho)}{\eta(1)}, \quad (5)$$

где $(\eta(1))$ – эффективность работы группы при штатном информационном обмене, а $(\eta(\rho))$ – эффективность при его ограничении до уровня (ρ), $(0 < \rho \leq 1)$.

В качестве базовой характеристики эффективности может применяться доля выполненных заданий

$$\eta = \frac{M_{\text{вып}}}{M_{\text{общ}}}, \quad (6)$$

где $(M_{\text{вып}})$ – количество выполненных задач, $(M_{\text{общ}})$ – их общее количество.

Предлагаемый показатель позволяет сравнивать алгоритмы не только по результату в штатном режиме, но и по скорости деградации при ухудшении коммуникационных условий. Например, два метода могут обеспечивать одинаковую долю выполненных задач при полном обмене данными, но при снижении доступности связи один из них может сохранять большую часть производительности благодаря локальному принятию решений. В этом случае различия между методами становятся заметны именно при анализе $(K_{\text{уст}})$.

Результаты рассмотрения существующих методов позволяют сформулировать перспективную двухуровневую организацию взаимодействия. На первом уровне выполняется распределение и перераспределение задач, определяются приоритеты и состав роботов, участвующих в операции. На втором уровне реализуется локальная координация – согласование движения, обмен сенсорной информацией, предотвращение конфликтов и реагирование на изменения среды. При этом стратегический уровень может обновляться значительно реже локального, что потенциально снижает объем передаваемой информации.

Особый интерес представляет принцип избирательного обмена данными. Не каждое изменение состояния робота требует немедленной передачи всей группе. Передаваться должна прежде всего информация, способная повлиять на коллективное решение. Такой принцип позволяет рассматривать коммуникацию не как вспомогательный канал, а как управляемый ресурс многороботной системы. Исследования коммуникационно-ограниченных многороботных систем подтверждают значимость данной проблемы при распределении задач и координации поведения [7].

Таким образом, анализ показывает, что развитие методов взаимодействия групп роботов целесообразно осуществлять не только путем совершенствования алго-

ритмов распределения заданий, но и посредством учета структуры коммуникационной сети. Централизованные методы обеспечивают глобальную согласованность, децентрализованные и консенсусные повышают автономность, рыночные обеспечивают гибкое перераспределение задач, а поведенческие и роевые методы позволяют реализовать устойчивое коллективное поведение.

В качестве перспективного направления предлагается рассматривать совмещение децентрализованного принятия решений, динамического перераспределения задач и адаптивного информационного обмена. Предложенный коэффициент ($K_{\text{уст}}$) может использоваться как дополнительный критерий экспериментального сравнения алгоритмов. Для его проверки целесообразно исследовать работу группы при штатной связи, увеличенной задержке передачи, ограниченном радиусе взаимодействия и временном выходе отдельных роботов из состава системы. Такой подход позволит перейти от общего анализа существующих методов к количественному исследованию их устойчивости и сформировать основу для разработки новых методов взаимодействия групп автономных роботов.

Список литературы:

1. Cao Y.U., Fukunaga A.S., Kahng A.B. Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions // Autonomous Robots. – 1997. – Vol. 4. – № 1. – P. 7–27.

2. Gerkey B.P., Matarić M.J. A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems // The International Journal of Robotics Research. – 2004. – Vol. 23. – № 9. – P. 939–954.

3. К вопросу разработки алгоритма передачи закрытых данных по открытым сетям между мобильным устройством и распределенными серверами / В.А. Атрощенко, Р.А. Дьяченко, М.В. Руденко [и др.] // III Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 52-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос : сборник научных статей, Краснодар, 12 апреля 2013 года / Филиал Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2013. – С. 327–331.

4. Olfati-Saber R., Fax J.A., Murray R.M. Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems // Proceedings of the IEEE. – 2007. – Vol. 95. – № 1. – P. 215–233.

5. Quinton F., Grand C., Lesire C. Market Approaches to the Multi-Robot Task Allocation Problem: A Survey // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2023. – Vol. 107. – Art. 29.

6. Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M. Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective // Swarm Intelligence. – 2013. – Vol. 7. – No. 1. – P. 1–41.

7. Алексеев Д.А., Дьяченко Р.А. Современные подходы к организации взаимодействия групп мобильных роботов в мультиагентных системах управления // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2026. – № 2. – С. 19–21.

УДК 007.52:004.75

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КООРДИНАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АВТОНОМНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

Алексеев Дмитрий Александрович
Кубанский государственный технологический университет
ассистент кафедры информатики и вычислительной техники, факультет информационных технологий и кибербезопасности
1qazwsxedc2001@gmail.com

Дьяченко Роман Александрович
Кубанский государственный технологический университет
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информатики и вычислительной техники, Факультет информационных технологий и кибербезопасности
djachenko.roman@kubstu.ru

Аннотация. В работе представлен сравнительный анализ существующих методов координации взаимодействия групп автономных мобильных роботов в мультиагентных робототехнических системах. Рассмотрены шесть основных классов алгоритмов: централизованные, децентрализованные, рыночные, основанные на роевом интеллекте, алгоритмы консенсуса и методы обучения с подкреплением. Для каждого класса выделены ключевые принципы, преимущества и ограничения. На основе проведённого анализа предложена сводная сравнительная таблица по критериям масштабируемости, отказоустойчивости, вычислительной сложности и области применимости. Показано, что выбор метода зависит от условий задачи, требований к масштабируемости и доступности коммуникации.

Ключевые слова: мультиагентные робототехнические системы, координация роботов, распределённое управление, роевой интеллект, алгоритмы консенсуса, распределение задач, автономные мобильные роботы.

Развитие робототехники характеризуется переходом от использования отдельных роботов к созданию мультиагентных робототехнических систем (МРС), объединяющих группы автономных мобильных роботов для совместного решения задач [1]. Такие системы находят применение в области исследования неизвестных сред, коллективного транспортирования объектов, патрулирования, поиска и спасания, а также в промышленных и логистических сценариях. Ключевым фактором эффективности МРС является способность роботов координировать свои действия, что требует разработки специализированных алгоритмов взаимодействия. Проблема координации охватывает задачи распределения задач между агентами, планирования бесконфликтных траекторий, поддержания формаций, синхронизации действий и обеспечения связи. Существующие подходы существенно различаются по архитектуре управления, требованиям к коммуникации, масштабируемости и вычислительной сложности.

В современной литературе предложено несколько таксономий методов координации МРС. Одна из наиболее известных классификаций, предложенная в работе, разделяет системы по уровню кооперации, знания, координации и организации. По типу архитектуры управления выделяют централизованные, децентрализованные и слабо централизованные подходы. В работе [2] предложена расширенная таксономия по шести измерениям: механизм коммуникации, стратегия планирования, архитектура управления, масштабируемость, процесс принятия решений и область применения. На основе анализа существующих таксономий в настоящей работе выделены шесть основных классов алгоритмов координации, которые рассматриваются ниже.

Централизованные методы координации предполагают наличие единого планировщика (контроллера), который получает информацию от всех агентов, вычисляет оптимальный план действий и передаёт команды каждому роботу [3]. Преимуществами данного подхода являются простота реализации, возможность получения глобально

оптимального решения и эффективное распределение ресурсов. Однако централизованная архитектура обладает существенными недостатками: низкой отказоустойчивостью из-за наличия единой точки отказа, ограниченной масштабируемостью при увеличении числа агентов и высокими требованиями к вычислительным ресурсам центрального узла [4]. Кроме того, в условиях ограниченной или ненадёжной связи централизованные схемы становятся неприменимыми.

Децентрализованные (распределённые) методы позволяют каждому агенту автономно принимать решения на основе локальной информации, обмениваясь данными с соседними роботами. Ключевыми механизмами децентрализованной координации являются сетевые протоколы обмена состояниями и алгоритмы аукционного типа. В распределённых системах отсутствует единая точка отказа, что обеспечивает высокую надёжность и масштабируемость. Однако такие методы требуют интенсивного обмена информацией между агентами для достижения согласованности, что может снижать производительность при ограниченной пропускной способности каналов связи. Децентрализованный подход особенно эффективен в задачах исследования неизвестных сред, где агенты коллективно корректируют свои маршруты.

Рыночные (аукционные) методы координации основаны на принципах экономического взаимодействия, где задачи выставляются на «аукцион», а агенты подают «ставки» на их выполнение на основе оценки собственных затрат. Наиболее известным протоколом данного класса является Contract Net Protocol (CNP), предложенный в работе [4], в котором инициатор задачи рассылает предложения участникам, получает ставки и заключает контракты с наиболее подходящими агентами. Развитием данного подхода является парадигма TraderBots, обеспечивающая устойчивую координацию в динамических средах. Выбор оптимального исполнителя задачи в аукционе сводится к поиску агента с минимальной ставкой:

$$i^* = \arg\min b_i(t_k), \quad (1)$$

где i^* – индекс робота-победителя; $b_i(t_k)$ – ставка i-го робота на задачу в момент времени t_k.

Рыночные методы обладают высокой адаптивностью и применимы в гетерогенных группах роботов, однако их эффективность зависит от качества оценки затрат агентами и может снижаться при ограниченной коммуникации.

Методы на основе роевого интеллекта заимствуют принципы коллективного поведения биологических систем – муравьиных колоний, пчелиных роев, стай рыб – и применяют их для координации робототехнических группировок. Ключевым механизмом является стигмергия – косвенное взаимодействие через изменение среды, при котором агенты оставляют «феромонные» следы, направляющие других участников. Обновление уровня феромона на маршруте между точками i и j описывается соотношением:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (2)$$

где $\tau_{ij}(t$ – уровень феромона; ρ – коэффициент испарения; $\Delta\tau_{ij}(t)$ – приращение феромона.

Достоинствами роевого интеллекта являются высокая адаптивность, отказоустойчивость и масштабируемость. Алгоритмы оптимизации роем частиц (PSO) и муравьиные алгоритмы успешно применяются для планирования путей и распределения задач. Однако биоинспирированные методы часто не гарантируют оптимальности решения и могут страдать от преждевременной сходимости [5].

Алгоритмы консенсуса обеспечивают достижение согласия между агентами по значению определённой переменной состояния через итеративный обмен информацией с соседями по сети связи. Фундаментальный вклад в теорию консенсуса внесла работа, установившая условия сходимости для сетей с фиксированной и переключающейся топологией. Базовое правило обновления состояния i-го агента имеет вид:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \Sigma\, a_{ij}\,(x_j(t) - x_i(t)), \quad (3)$$

где $x_i(t)$ – состояние i-го агента; a_{ij} – вес связи между агентами i и j; N_i – множество соседей.

Алгоритмы консенсуса широко применяются для управления формациями роботов, распределённой фильтрации и синхронизации действий [5]. Различают консенсус с лидером (leader-following), где один или несколько агентов задают целевое состояние, и консенсус без лидера, при котором все агенты равноправны.

Методы обучения с подкреплением (reinforcement learning, RL) позволяют агентам самостоятельно обучаться оптимальным стратегиям координации на основе взаимодействия со средой, получая вознаграждение или наказание за свои действия. В последние годы глубокое обучение с подкреплением демонстрирует значительные результаты в задачах мультироботной координации. Достоинством RL-методов является способность адаптироваться к изменяющимся условиям без явного программирования стратегий. Однако эти методы требуют значительных вычислительных ресурсов, длительного периода обучения и не всегда гарантируют безопасность в реальных условиях. Объединение методов обучения с другими подходами позволяет компенсировать недостатки каждого из них.

На основе проведённого обзора составлена сводная сравнительная таблица (таблица 1), отражающая ключевые характеристики каждого класса методов по критериям масштабируемости, отказоустойчивости, вычислительной сложности и типичных областей применения.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики методов координации групп роботов

Метод	масштабируемость	отказоустойчивость	Вычислительная сложность	Область применения
Централизованный	Низкая	Низкая	Высокая	Пром. инспекция, логистика
Децентрализованный	Высокая	Средняя	Низкая	Исследование сред, патрулирование
Рыночный (аукционный)	Высокая	Средняя	Средняя	Распределение задач, логистика
Роевой интеллект	Высокая	Средняя	Средняя	Поиск, покрытие, кластеризация
Консенсус	Высокая	Высокая	Низкая	Управление формациями
Обучение с подкреплением	Средняя	Высокая	Высокая	Транспортирование, навигация

Как видно из таблицы 1, централизованные методы обеспечивают глобальную оптимальность, но имеют низкую масштабируемость и отказоустойчивость. Децентрализованные подходы лучше масштабируются и устойчивее к отказам, однако требуют интенсивного обмена информацией. Рыночные методы занимают промежуточное положение. Методы роевого интеллекта демонстрируют высокую масштабируемость, но не гарантируют оптимальности. Алгоритмы консенсуса выделяются высокой отказоустойчивостью при низкой вычислительной сложности. Методы обучения с подкреплением показывают способность к адаптации, однако требуют значительных вычислительных ресурсов. Важной тенденцией является разработка комбинированных подходов, объединяющих преимущества различных классов алгоритмов, а также создание методов, способных динамически переключаться между стратегиями координации в зависимости от текущих условий среды.

Таким образом, в работе проведён сравнительный анализ шести основных классов алгоритмов координации взаимодействия групп автономных мобильных роботов. Каждый класс обладает своими преимуществами и ограничениями, что определяет область его применимости. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка гибридных архитектур координации и методов, обеспечивающих динамическое переключение между стратегиями в зависимости от условий среды и характеристик группы роботов, а также обеспечение безопасности и надёжности мультиагентных систем при их работе в реальных условиях.

Список литературы:

1. К вопросу разработки алгоритма передачи закрытых данных по открытым сетям между мобильным устройством и распределенными серверами / В.А. Атрощен-

ко, Р.А. Дьяченко, М.В. Руденко [и др.] // III Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 52-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос : сборник научных статей, Краснодар, 12 апреля 2013 года / Филиал Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2013. – С. 327–331.

2. Swarm Robotics: A Review from the Swarm Engineering Perspective / M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari [et al.] // Swarm Intelligence. – 2013. – Vol. 7. – № 1. – P. 1–41.

3. Dorigo M., Bonabeau E., Theraulaz G. Ant Colony Optimization and Stigmergy in Multi-Robot Systems // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2000. – Vol. 4. – № 4. – P. 317–332.

4. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948.

5. Алексеев Д.А., Дьяченко Р.А. Современные подходы к организации взаимодействия групп мобильных роботов в мультиагентных системах управления // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2026. – № 2. – С. 19–21.

УДК 66.081.6

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫХ АППАРАТОВ ТРУБЧАТОГО ТИПА

Антипова Анна Анатольевна
Тамбовский государственный технический университет
аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»
ainolgon@yandex.ru

Лазарев Дмитрий Сергеевич
Тамбовский государственный технический университет
аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»
dimamt2017@mail.ru

Коновалов Дмитрий Николаевич
Тамбовский государственный технический университет
д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта»
kdn1979dom@mail.ru

Истомина Марина Александровна
Тамбовский государственный технический университет
аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»
hrebtova1997@gmail.com

Аннотация. В работе проведен анализ электробаромембранных аппаратов различных типов. Определена перспективная конструкция электробаромембранного аппарата трубчатого типа для разделения, концентрирования и очистки растворов. Представлены основные элементы аппарата и сформулирован технический результат, достигающийся за счет внедрения новых технических решений.

Ключевые слова: электромембранные технологии, конструкция, аппарат, раствор, мембрана.

Промышленные водные растворы являются многокомпонентными и содержат в своем составе как органические, так и неорганические вещества. Это поднимает вопросы, связанные с мембранным разделением растворов, что в нынешнее время является одним из наиболее динамично развивающихся направлений в технологии очистки и концентрирования жидких сред. Электромембранные технологии позволяют восстанавливать рабочие растворы на промежуточных и финальных стадиях очистки (концентрирования) без изменения агрегатного состояния, что способствует уменьшению энергозатрат по сравнению с классическими методами (выпарка, включая многокорпусные системы, ректификация и другие).

Анализ литературных и патентных данных показывает, что в настоящее время сформировались четыре основных класса электробаромембранных аппаратов: плоскорамного (плоскокамерного), трубчатого, рулонного и комбинированного типа. Преимущества и недостатки присущи каждому из этих классов: плоскокамерные аппараты обеспечивают высокую производительность и простоту замены мембран, но требования относительно материальных затрат несколько выше аналогов; рулонные – высокую плотность упаковки мембран, но при необходимости ремонтных работ сложны в обслуживании; трубчатые – компактны и эффективны при концентрировании растворов с механическими включениями и коллоидными частицами, но уступают по плотности упаковки мембран и требуют более сложной сборки элементов. Однако стоит обратить внимание на последний тип аппарата (трубчатый), т.к. он перспективен для серийного производства благодаря относительной простоте замены элементов. Рассмотренный патент на электробаромембранный аппарат трубчатого типа [1] лежит именно в русле этих тенденций и позволяет сформулировать ряд перспективных направлений дальнейшего совершенствования конструкций.

Электробаромембранный аппарат трубчатого типа (рисунок 1) состоит из цилиндрического корпуса 1 с трапециевидными ребрами жесткости, служащими, как для повышения прочности, так и для отвода тепла, и пазами в форме полуокружности, патрубка 2 для ввода разделяемой жидкости, устройства 3 для подвода электрического напряжения, продольных каналов 4, прианодной дренажной сетки 5, микропористой

подложки 6, служащей одновременно электродом-анодом, прианодной мембраны 7, стаканообразных решеток 8, концентричных фильтрующих элементов 9 с пазами в форме полуокружности и переточными каналами 10, последовательно соединенных камер разделения 11, центральной трубы 12 с пазами в форме полуокружности и отверстием 13, патрубка 14 с раструбом, прикатодной дренажной сетки 15, внешней поверхности микропористой подложки 16, служащей электродом-катодом, прикатодной мембраны 17, стаканообразных торцевых крышек 18, имеющих штуцеры 19 и 20 для кислого и щелочного пермеата соответственно, газоотводчиков 21, охлаждающей трубки-турбулизатора 22 с расположенными в шахматном порядке на равном расстоянии по всей ее ширине и в местах пазов в форме полуокружности по всей длине коническими переточными отверстиями 23 для циркуляции разделяемого раствора, позволяющими равномерно распределять и направлять поток к пазам в форме полуокружности, штуцеров 24 и 25 для ввода и вывода охлаждающей жидкости соответственно, плоских прижимных решеток 26.

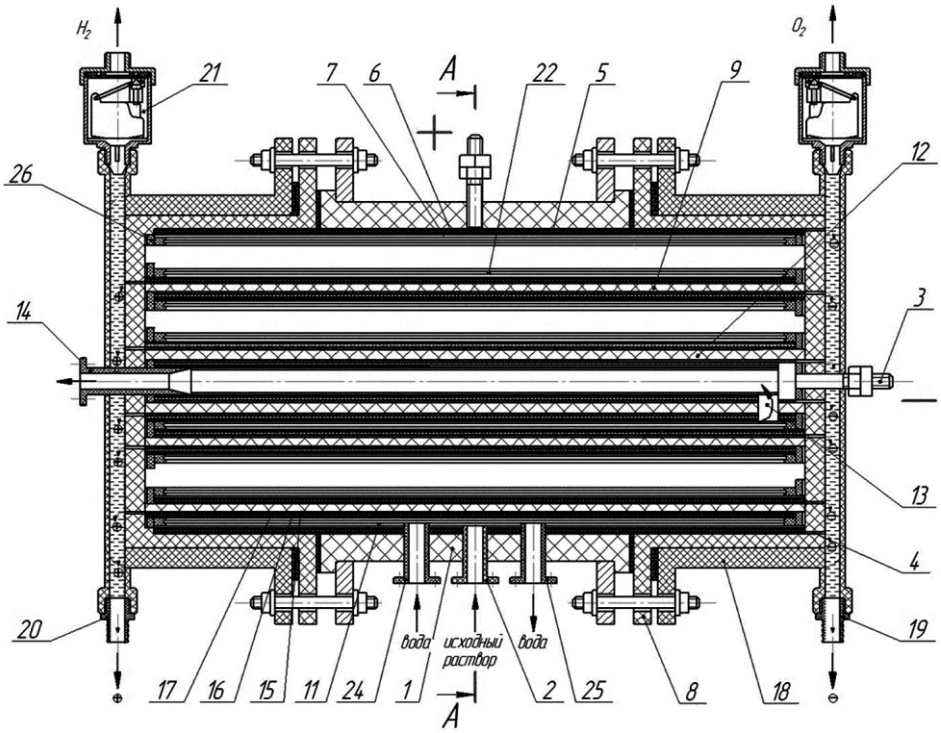


Рисунок 1 – Электробаромембранный аппарат трубчатого типа

Стоит рассмотреть путь развития трубчатых мембранных аппаратов исходя из следующей цепочки «аналог – прототип – заявленное изобретение». *Базовая конструкция* [2] решала задачу разделения растворов в чисто баромембранном режиме, т.е. без электрического поля, без охлаждения и без управляемой турбулизации потока. Низкая производительность и плохое качество разделения объяснялись отсутствием необходимых условий. Ламинарный характер потока жидкости вызывал неравномерное распределение веществ на поверхности мембран, а тепловой режим не регулировался.

Далее идет *прототип* [3], было введено в конструкцию электрическое поле, система охлаждения (трубка-турбулизатор) и газоотведение. Это превратило аппарат из пассивного баромембранного фильтра в активное электробаромембранное устройство. Однако прототип сохранил ряд конструктивных ограничений: малую удельную площадь разделения, недостаточно эффективное охлаждение, высокую материалоёмкость и сложность изготовления.

Заявленный аппарат преодолевает эти ограничения за счёт четырёх ключевых решений, каждое из которых открывает самостоятельное направление для дальнейшего развития.

В представленной конструкции можно выделить ключевые направления развития:

1. Увеличение удельной площади разделения. Приравнивание длины активных элементов к сумме длины корпуса и глубины торцевых крышек, это позволит использо-

вать всю полезную поверхность мембран. Дальнейшее развитие включает увеличение числа камер, уменьшение зазоров и внедрение многослойных мембранных пакетов.

2. Интеграция охлаждения и турбулизации. Шахматное расположение конических переточных отверстий в охлаждающей трубке-турбулизаторе выполняет две функции: отвод тепла и управление потоком. Коническая форма направляет раствор к пазам, предотвращая застой и снижая поляризацию. В перспективе трубка-турбулизатор может стать активным модулем с датчиками температуры и концентрации, адаптивной геометрией, регулируемой механически или термочувствительными материалами.

3. Снижение материалоёмкости и упрощение изготовления. Стаканообразная форма решёток, крышек и трапециевидные рёбра корпуса повышают технологичность и прочность, упрощая охлаждение и снижая требования к материалу. Упрощенная геометрия может обеспечить возможность 3D-печати, это снизит стоимость малосерийных аппаратов в пищевой и аграрной отраслях.

4. Универсальность режимов работы. Конструкция универсальна: работает с электрическим полем (электрофильтрация, электроосмос) и без него (обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация, микрофильтрация). Это делает аппарат многофункциональной платформой.

Выше перечисленные пункты повысят перспективность аппарата с точки зрения рыночной адаптации. Аппарат, который может быть перенастроен сменой режима (подача/отключение электрического поля, смена мембран, регулировка давления) под разные задачи, существенно снижает порог входа для потребителей. Дальнейшее развитие может включать модульную архитектуру: взаимозаменяемые мембранные пакеты разной селективности, сменные охлаждающие трубки с разной геометрией переточных отверстий, а также электронные блоки управления, которые автоматически подбирают плотность тока, давление и скорость потока под заданный состав раствора.

Конструкция, представленная в данной работе, дает возможность для развития электробаромембранных аппаратов, предлагая увеличение удельной площади разделения, интеграцию охлаждения с турбулизацией, технологичные формы элементов и универсальность режимов.

Дальнейшее развитие мембранных аппаратов трубчатого типа, опираясь на данное решение, будет, вероятно, идти по пути интеллектуализации (датчики, адаптивное управление), модульности (сменные мембранные пакеты и гидродинамические вставки) и технологичности производства (аддитивные технологии, унификация типоразмеров). Это делает рассмотренную конструкцию перспективной базой как для прикладных разработок, так и для дальнейших исследований в области электробаромембранного разделения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

Список литературы:

1. Пат. 2838235 Российская Федерация, МПК B01D 63/06, B01D 61/46. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа / С. И. Лазарев, Д. Н. Коновалов, А. А. Антипова, Т. А. Пудовкина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбов. гос. техн. ун-т». – № 2024128992; заявл. 30.09.2024; опубл. 14.04.2025, Бюл. № 11.

2. А. с. 799779 СССР, МПК B01D 13/00. Мембранный аппарат с трубчатыми фильтрующими элементами / С. Д. Асташкин, В. Р.Кулинченко, В. М. Гуцалюк, С. И. Косань, Е. Е. Каталевский, В. И. Руденко; заявитель Киев. технол. ин-т пищевой пром-сти. – № 2760655/23-26; заявл. 10.04.1979; опубл. 30.01.1981, Бюл. № 4.

3. Пат. 2826557 Российская Федерация, МПК B01D 61/42, B01D 63/06. Электробаромембранный аппарат трубчатого типа / Д. Н. Коновалов, С. И. Лазарев, О. В. Долгова, М. А. Истомина, Д. Д. Коновалов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбов. гос. техн. ун-т». – № 2024102805; заявл. 05.02.2024; опубл. 12.09.2024, Бюл. № 26.

УДК 621.313.333.1

УЧЁТ ПОТЕРЬ В ДВУМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Безбородов Егор Сергеевич
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
аспирант кафедры электроники и электротехники,
egor.bez-off@yandex.ru

Малинкина Юлия Игоревна
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
студентка кафедры электроники и электротехники
malinkinau@gmail.com

Гордеева Арина Сергеевна
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
студентка кафедры электроники и электротехники
gs.s.sa@mail.ru

Аннотация. Рассмотрено задание источников теплоты в двумерной модели асинхронного двигателя с фазным ротором. Описаны учёт активной длины двигателя, распределение потерь по расчётным областям и представление потерь в лобовых частях обмоток. На примере двигателя МТН011-06 приведены мощности потерь, используемые в тепловом расчёте. Показано, какие проверки необходимы при передаче результатов электромагнитного расчёта в тепловую модель.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, тепловая модель, электромагнитные потери, источники теплоты, метод конечных элементов.

При расчёте нагрева электрической машины необходимо задать мощности потерь и области, в которых эти потери выделяются. В связанной электромагнитно-тепловой модели источники теплоты определяют по результатам электромагнитного расчёта. Затем с учётом свойств материалов и условий охлаждения рассчитывают распределение температуры.

Выбор способа представления источников теплоты зависит от принятой тепловой модели [1]. В модели, построенной методом конечных элементов, можно учитывать распределение потерь внутри отдельных частей двигателя. Совместное применение электромагнитного расчёта и тепловой модели используется при исследовании асинхронных машин [2]. Метод конечных элементов также позволяет подробно представить проводники и изоляцию в пазах статора [3].

Для двумерной модели необходимо дополнительно учитывать, что расчётная область представляет поперечное сечение двигателя. Поэтому при определении мощности источника теплоты следует правильно задать длину машины в направлении, перпендикулярном этому сечению [4].

Цель работы – описать порядок задания потерь в двумерной тепловой модели асинхронного двигателя с фазным ротором и проверки их переноса из электромагнитной модели.

В модели рассматриваются четыре группы потерь: в меди статора, меди ротора, стали статора и стали ротора. Каждой группе соответствует своя расчётная область. Потери в обмотке статора задаются в областях статорной меди, потери в обмотке ротора – в областях роторной меди. Потери в стали относятся к соответствующим сердечникам.

Расчётное поперечное сечение двигателя представлено на рисунке 1.

Такое разделение необходимо, поскольку одинаковая суммарная мощность потерь может приводить к разному распределению температуры. Нагрев зависит от места выделения теплоты, теплопроводности окружающих материалов и условий теплоотвода. Поэтому проверки только общей суммы потерь недостаточно.

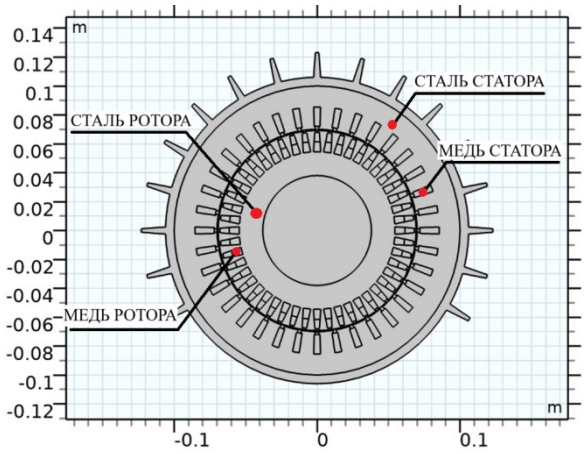


Рисунок 1 – Расчётное поперечное сечение двигателя MTH011-06 с обозначением областей задания источников теплоты

Если источник теплоты задан объёмной плотностью потерь, его мощность определяют интегрированием по соответствующей области с учётом активной длины двигателя:

$$P_i = L \int_{S_i} Q_i(x, y)\, dS. \quad (1)$$

Здесь P_i – мощность потерь в рассматриваемой части двигателя, Вт; L – активная длина двигателя, м; S_i – область поперечного сечения рассматриваемой части двигателя, м²; Q_i – объёмная плотность потерь, Вт/м³.

При использовании выражения (1) необходимо проверить размерность данных, полученных из электромагнитной модели. Объёмная плотность потерь, мощность на единицу длины и полная мощность являются разными величинами. Если длина двигателя уже учтена при вычислении мощности, повторное умножение на неё приведёт к ошибке.

После задания источников теплоты проверяют мощность потерь в каждой части двигателя: меди и стали статора и ротора. Для этого используют выражение (1). Результаты сравнивают с потерями, полученными при электромагнитном расчёте того же режима, сначала по отдельным составляющим, затем по их сумме. При сравнении учитывают погрешность численного интегрирования.

В таблице 1 приведены потери двигателя MTH011-06 для четырёх частот вращения при моменте нагрузки 15 Н·м. Во всех режимах амплитуду тока статора поддерживали неизменной; так же задавали амплитуду тока ротора. Полученные потери использованы для задания источников теплоты.

Таблица 1 – Расчётные потери двигателя MTH011-06

Частота вращения, об/мин	В меди статора, Вт	В меди ротора, Вт	В стали статора, Вт	В стали ротора, Вт	Сумма учитываемых потерь, Вт
860	44.44	143.31	38.90	24.59	251.25
645	44.44	143.31	27.35	15.55	230.65
430	44.44	143.31	17.16	9.68	214.60
215	44.44	143.31	7.68	4.17	199.61

Во всех четырёх режимах потери в меди одинаковы, поскольку токи и сопротивления обмоток в расчёте не изменялись. Потери в стали определяются частотой перемагничивания и магнитной индукцией [5]. В приведённых режимах они уменьшаются со снижением частот токов, поэтому сумма учитываемых потерь снижается с 251.25 до 199.61 Вт.

В таблице представлены исходные данные для теплового расчёта. Чтобы проверить, правильно ли заданы источники теплоты, их мощности определяют по выражению (1) и сравнивают с соответствующими значениями таблицы.

Отдельного рассмотрения требуют лобовые части обмоток. Их теплоотдача зависит от условий движения воздуха в торцевых полостях двигателя [6]. В двумерной модели поперечного сечения лобовые части непосредственно не представлены. В принятой модели их потери включены в потери обмоток и распределены по соответствующим пазовым областям меди.

Если потери лобовых частей уже учтены при подготовке источника теплоты, дополнительный поправочный коэффициент в тепловом расчёте не вводится. Иначе одна и та же составляющая будет учтена дважды.

На результат теплового расчёта влияют свойства материалов и принятые условия охлаждения [7]. При вынужденном охлаждении теплоотдача зависит от скорости движения воздуха [8]. Если вентилятор установлен на валу двигателя, изменение частоты вращения сказывается и на охлаждении. Поэтому при меньших потерях температура может оказаться выше, если отвод теплоты ухудшился. Потери и условия охлаждения в модели должны соответствовать одному и тому же режиму работы.

Для проверки тепловой модели расчётные температуры сравнивают с измеренными [9, 10]. Значения из модели берут в контрольных точках измерения температуры, где установлены датчики. Максимальная температура расчётной области для такого сравнения подходит только тогда, когда её положение совпадает с местом измерения. Результаты стационарного расчёта сопоставляют с опытом после установления теплового режима.

При задании потерь в двумерной модели необходимо проверить размерности используемых величин, мощности источников теплоты и области их размещения. Особого внимания требует учёт лобовых частей: если их потери уже включены в потери обмоток, повторно добавлять их нельзя. Эти проверки позволяют выявить ошибки при передаче потерь из электромагнитной модели в тепловую. Точность расчёта температур проверяют по результатам испытаний.

Список литературы:

1. Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Анализ возможности применения тепловых моделей асинхронных двигателей для оценки теплового состояния машины двойного питания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2023. – Т. 23. – № 4. – С. 47–53. – DOI: 10.14529/power230405.

2. Mezani S., Takorabet N., Laporte B. A Combined Electromagnetic and Thermal Analysis of Induction Motors // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – Vol. 41. – № 5. – P. 1572–1575. – DOI: 10.1109/TMAG.2005.845044.

3. Thermal finite element modeling and simulation of a squirrel-cage induction machine / C. Bergfried, Y. Späck-Leigsnering, R. Seebacher [et al.] // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2024. – Vol. 76. – № 1–2. – P. 147–160. – DOI: 10.3233/JAE-230233.

4. COMSOL A.B. Heat Transfer Module User's Guide. COMSOL Multiphysics. Version 6.0. 2021. – URL : https://doc.comsol.com/6.0/doc/com.comsol.help.heat/ HeatTransferModuleUsersGuide.pdf (дата обращения: 24.09.2026).

5. Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel / D.M. Ionel, M. Popescu, M.I. McGilp [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2007. – Vol. 43. – № 6. – P. 1554–1564. – DOI: 10.1109/TIA.2007.908159.

6. Measurements and Simulations of the Convective Heat Transfer Coefficients on the End-Windings of an Electrical Machine / M .Hettegger, O. Biro, B. Streibl [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59. – № 5. – P. 2299–2308. – DOI: 10.1109/TIE.2011.2161656.

7. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2008. – Vol. 44. – № 4. – P. 1150–1159. – DOI: 10.1109/TIA.2008.926233.

8. Staton D.A., Cavagnino A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – № 10. – P. 3509–3516. – DOI: 10.1109/TIE.2008.922604.

9. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 67–78. – DOI: 10.14529/power220408.

10. Development and Validation of a Thermal Model for Electric Induction Motors / T.A. Jankowski, F.C. Prenger, D.D. Hill [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57. – № 12. – P. 4043–4054. – DOI: 10.1109/TIE.2010.2043044.

УДК 621.31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ФРАГМЕНТОВ ПОПЛАВКА УКАЗАТЕЛЯ УРОВНЯ

Городушкин Роман Викторович
Самарский государственный технический университет
аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
romangorodushkin3etf4@yandex.ru

Научный руководитель:
Базаров Александр Александрович
Самарский государственный технический университет
д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжения промышленных предприятий»
aleksbazarov@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается задача экспериментального определения возникающих термических напряжений в процессе сварки фрагментов поплавка указателя уровня. Разработано устройство для определения возникающих термонапряжений, основанное на тензодатчиках, и подробно описана принципиальная структура устройства. В работе проводится сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования с результатами эксперимента при максимально приближенных исходных условиях моделирования и эксперимента. Результаты работы учтены и применены в разработке электротехнического комплекса изготовления пустотелых изделий.

Ключевые слова: сварка, тепловые процессы, упругодеформированные процессы, математическая модель, измерительное устройство, измеритель термонапряжений.

Введение

Сварка, как один из возможных видов соединения деталей или фрагментов конструкций, получила широкое распространение. Преимущества сварных соединений по сравнению с другими типами неразъемных соединений весьма значительны. Однако процесс сварки не свободен от недостатков. В процессе сварки возникают напряжения и деформации, которые в ряде случаев могут оказать отрицательное влияние на качество сварного изделия. Во время изготовления сварных конструкций возможно искажение формы и размеров изделий, на восстановление которых затрачивается много труда [1]. Иногда искажения формы не представляется возможным исправить. Особую трудность представляют подобные работы в отношении тонкостенных изделий сложной формы. Дополнительная проблема состоит в оценке качества выполненной работы. Экспериментальное подтверждение эффективности применяемых методов и способов минимизации термонапряжений затруднено из-за сложности применения и высокой стоимости измерительного оборудования. Не всегда можно полагаться на результаты компьютерного моделирования, так как могут быть не учтены некоторые факторы или переменные, существенно влияющие на получаемые результаты.

Целью работы является минимизация термонапряжений, возникающих при сварке тонкостенного поплавка магнитного указателя уровня, сравнение и анализ результатов компьютерного моделирования и эксперимента примененной методики минимизации термонапряжений.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи: разработать связную компьютерную модель тепловых процессов и процессов упругой деформации; произвести решение компьютерной модели; разработать устройство для проведения экспериментального тензометрического исследования; произвести анализ и сравнение результатов эксперимента с результатами расчетов, полученных с помощью компьютерной модели.

Разработка компьютерной модели тепловых процессов и процессов упругой деформации

В эксперименте и в компьютерной модели рассматривается стальная пластина марки AISI 304 с размерами 150 х 55 х 1 мм, зафиксированная в тисках со свободным

краем длинной 100 мм, поочередно нагружается грузами 200, 400, 600, 800, 1000 грамм за свободный край. Рассмотрены несколько случаев, когда заготовка нагружается при комнатной температуре и температуре 400°C. Используемая сталь AISI 304, была выбрана на замену титану ВТ-8, ввиду доступности приобретения. Приобретение титана возможно только в больших объемах.

Тепловая задача формулируется в виде дифференциального уравнения в частных производных, дополненного граничными и начальными условиями [2].

Уравнение нестационарной теплопроводности в декартовой системе координат имеет вид [2]:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \left(k \nabla T \right) - Q = 0 \ , \tag{1}$$

с начальными условиями [2]

$$T\left(x,y,z,0\right) = T_0\left(x,y,z\right) = const \, ; \tag{2}$$

и граничными условиями [2]

$$-k \cdot \nabla T = \alpha \cdot (T_c - T) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_c^4 - T^4 \right), \tag{3}$$

где T(x,y,z,0) – начальное распределение температуры в заготовке; T_c – температуры окружающей среды; ρ – плотность, C – теплоемкость; k – теплопроводность материала; α – коэффициент конвективного теплообмена, ε – степень черноты поверхности; σ – постоянная Больцмана; Q – мощность источника внутреннего тепловыделения.

Механическая задача формулируется в виде системы дифференциальных уравнений равновесия и движения.

Статические уравнения упругости имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X_\rho = 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y_\rho = 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z_\rho = 0 \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

где σ_{ii}, τ_{ii} – компоненты нормальных и касательных напряжений. Xρ, Yρ, Zρ – компоненты вектора статических сил.

Разработанная геометрическая модель, изображена на рисунке 1. В свойствах компьютерной модели учтена зависимость от температуры модуля Юнга и коэффициента линейного теплового расширения для материала изделия.

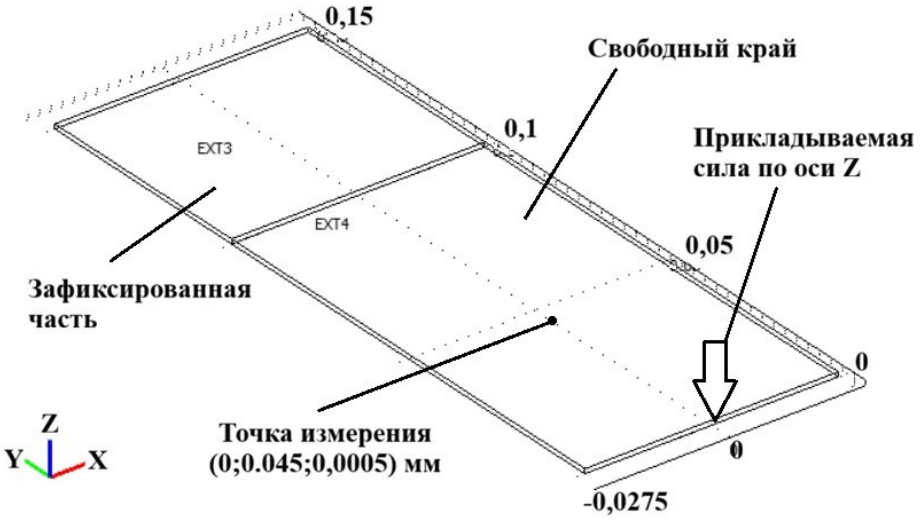


Рисунок 1 – Геометрическая модель тепловых процессов и процессов упругой деформации

На компьютерной модели связанных тепловых процессов и процессов упругой деформации, выполнен расчет термонапряжений, результат моделирования для случая без предварительного подогрева и нагружением 1000 грамм изображен на рисунке 2.

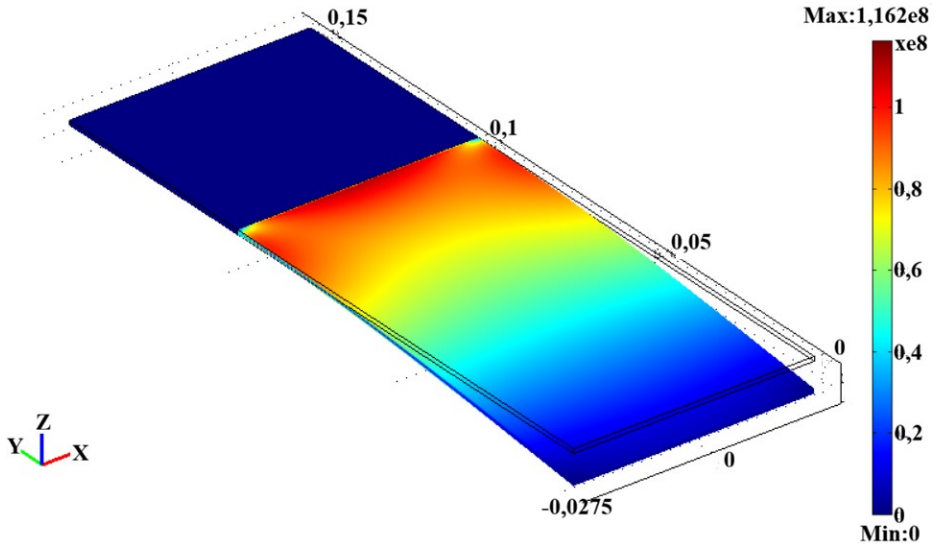


Рисунок 2 – Результат решения компьютерной модели

Результаты моделирования для всех случаев с различным нагружением пластины сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Прикладываемая сила, Н	Напряжение при комнатной температуре, МПа	Напряжение при подогреве до 400 °С, МПа
2	11,3	8,2
4	20	13
6	32,16	16,7
8	45,4	21
10	56,7	29,13

Разработка устройства для проведения экспериментального исследования

Разработка устройства для измерения термических напряжений начинается с выбора тензодатчика, который должен обладать теплостойкостью и выдерживать температуры на уровне 300–400 °С. В соответствии с требованиями был выбран датчик BAB350-5AA250(11)-X [3], с внутренним сопротивлением 350 Ом и максимальной рабочей температурой 350 °С.

На рисунке 3 изображена принципиальная электрическая схема измерительного устройства. Измерительное устройство содержит тензодатчик 1, наклеенный до момента сварки, мостовой адаптер (мост Уитсона) 2, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 3, регистрирующее устройство 4, персональный компьютер (ПК) 5 для программной обработки и вывода данных.

Порядок работы измерительного устройства осуществлен следующим образом:

1) деформации, вызванные механическими напряжениями в материале, передаются на приклеенный тензодатчик 1, что вызывает изменение его внутреннего сопротивления;

2) изменение внутреннего сопротивления тензодатчика 1 вызывает разбалансировку мостового адаптера 2 и на выходе появляется напряжение, измеряемое в мВ;

3) далее сигнал поступает в АЦП 3, где усиливается в 128 раз и преобразуется в цифровой сигнал, поступающий на регистрирующее устройство 4;

4) сигнал обрабатывается в регистрирующем устройстве и данные обработки передаются на персональный компьютер 5 для их вывода и фиксации.

Все подключения осуществлены витыми парами для минимизации погрешностей. В качестве элементной базы использованы комплектующие и программный комплекс Arduino. Датчик не мешает процессу сварки, а нагрев в месте измерения не превышает значения рассчитанные для тензодатчика.

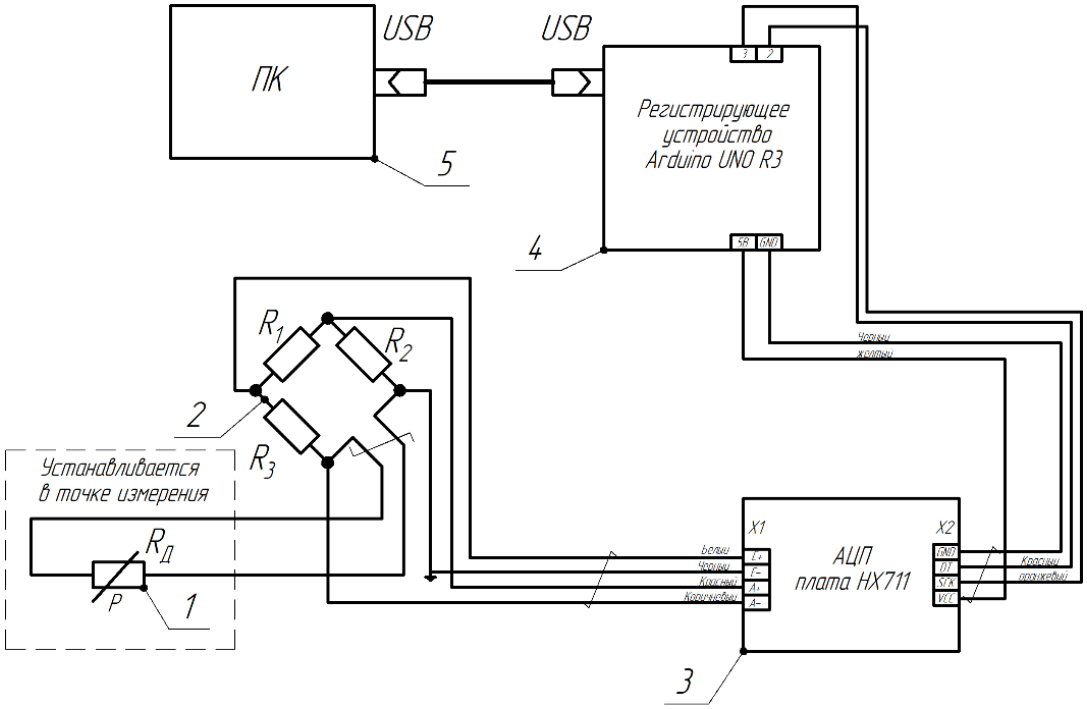


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема измерительного устройства:
1 – тензодатчик; 2 – мостовой адаптер (балансировочные резисторы 350 Ом);
3 – АЦП; 4 – регистрирующие устройство; 5 – ПК

Погрешность измерительного устройства обусловлена следующими факторами:

– разброс параметров резисторов моста Уинстона (класс точности +-1 %), что приводит к неидеальной балансировке и систематическому смещению нуля (данная погрешность минимизируется путем калибровки нуля непосредственно перед проведением измерения);

– максимальный допустимый разброс чувствительности тензорезистора до 1 %;

– дрейф нуля АЦП (HX711) при известном значении $\pm 0{,}2$ мВ дает для полной шкалы измерения (± 20 мВ) погрешность ± 1 %.

На первый план выходит стабильность мостовой схемы и корректность калибровочной процедуры. Предложенная измерительная система является работоспособной для данной задачи с ориентировочной погрешностью 3–5 %, что является сопоставимым с погрешностями компьютерного моделирования.

Сравнение и анализ полученных результатов моделирования и эксперимента

Эксперимент проводился так же для двух случаев, как при моделировании. В первом случае отсутствовал предварительный нагрев, а во втором случае был выполнен предварительный нагрев заготовки до 400 °C.

Результаты эксперимента и моделирования совместно представлены на рисунке 4 в виде диаграмм.

По диаграммам рисунка 4, расхождения результатов моделирования и эксперимента для двух рассмотренных случаев не превышает 10 % и колеблется в пределах 2,5–9,77 %, что принято допустимым.

В случае без предварительного подогрева диаграмма 1, полученная по расчетным данным, и экспериментальная кривая 2 имеют схожий характер изменения механического напряжения зависимое от приложенной нагрузки. Обе кривые демонстрируют приближенные тенденции, что говорит о том, что компьютерная модель правильно

отражает общую картину процесса.

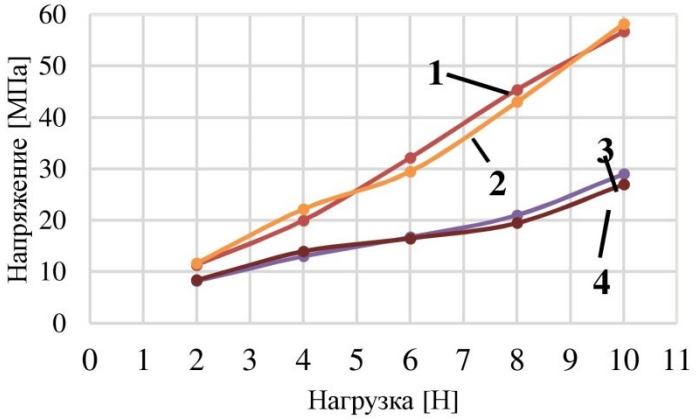


Рисунок 4 – Диаграммы механических напряжений компьютерного моделирования без предварительного подогрева (1), с предварительным подогревом (3) и эксперимента без подогрева (2), с подогревом (4)

В случае с предварительным подогревом до 400 °С наблюдается идентичное приближение расчетной кривой 3 и экспериментальной 4. Обе кривые показывают, что применение предварительного подогрева существенно снижает уровень возникающих термонапряжений по сравнению со случаем без применения предварительного подогрева, что соответствует ожиданию – уменьшение температурного градиента приводит к снижению термонапряжений.

Вывод

В результате можно уверенно сказать, что во всех случаях расчетные и экспериментальные кривые имеют близкую динамику: их форма, характер изменения и реакция на тепловое воздействие совпадают на качественном уровне.

Как в моделировании, так и в эксперименте предварительный нагрев до 400 °С приводит к значительному снижению возникающих термонапряжений в пределах 27,4–54,7 %. Это подтверждает эффективность предварительного подогрева как способа уменьшения термических напряжений в процессе сварки поплавка указателя уровня. Компьютерная модель корректно воспроизводит основные особенности экспериментальных данных, а результаты компьютерного моделирования качественно согласуются с экспериментом в обоих случаях. Таким образом эффект предварительного подогрева адекватно предсказывается компьютерной моделью и подобные модели допустимы для инженерных оценок.

Список литературы:

1. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения методы их устранения. – М. : Машиностроение, 1968. – 236 с.
2. Городушкин Р.В. Моделирование тепловых процессов при изготовлении поплавка указателя уровня // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2026.
3. Тензометрический резистор // Sierra. – URL : https://sierra.market/catalog/tenzometricheskiy-rezistor/ (дата обращения: 09.08.2026).

УДК 544

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАЗЛИЧНОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ СТРУКТУРУ НАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МЕМБРАНЫ ОПМН-П

Долгова Ольга Валерьевна
Тамбовский государственный технический университет
канд. техн. наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»
o.v.dolgova@mail.ru

Малин Павел Михайлович
Тамбовский государственный технический университет
аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»
malin.pavlik@mail.ru

Истомина Марина Александровна
Тамбовский государственный технический университет
аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»
hrebtova1997@gmail.com

Аннотация. В статье методом ИК-спектроскопии исследованы изменения в активном слое мембраны ОПМН-П под воздействием плотностей тока от 10 до 40 А/м². Установлено, что при умеренных нагрузках реорганизация водородных связей воды с переходом от их разрыва и локального разрыхления структуры при 10 А/м² к формированию упорядоченной сетки прочного связывания при 20–30 А/м². Достижение критической плотности тока 40 А/м² сопровождается резким падением интенсивности характеристических полос полимера, потерей регулярности укладки макромолекул, аморфизацией активного слоя, о чем свидетельствует изменение параметров полосы Амид I, значительным увеличением количества свободной воды в порах и разбуханием матрицы без химической деградации материала, что позволяет рассматривать динамику этих полос как неразрушающие маркеры предельного износа для прогнозирования селективности процесса разделения металлов и подтверждения потенциальной стабильности мембраны ОПМН-П в процессах электромембранной очистки стоков.

Ключевые слова: ИК-спектр, структура, конформационная перестройка, плотность тока.

Физическое понимание структурных изменений в активном слое мембран необходимо для прогнозирования механизмов электробаромембранного разделения и анализа кинетических характеристик очистки промышленных растворов. Существующие литературные данные указывают на фундаментальную роль диффузионных и спектроскопических методов в изучении слабоионизированных мембран, однако специфика отклика полиамидного слоя полипиперазинамида на высокие плотности тока требовала детального экспериментального подтверждения [1–3]. Целью работы стало изучение конформационной перестройки поверхностного слоя мембраны ОПМН-П под воздействием электрического поля.

Объектом исследования является нанофильтрационная мембрана ОПМН-П (производство ЗАО НТЦ «Владипор»), состоящая из полипропиленовой подложки и активного слоя полипиперазинамида. Электродиффузионная проницаемость сульфата никеля изучалась на установке при плотностях тока 0 (эталон), 10, 20, 30 и 40 А/м². Структурные изменения фиксировались методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с использованием кристалла ZnSe. Результаты приведены на рисунке 1.

Воздействие электрического поля при плотностях тока от 10 до 30 А/м² приводит к постепенному увеличению уровня реорганизации вторичной структуры полимера, полимерные цепи вытягиваются из клубкового состояния и выстраиваются вдоль силовых линий поля. Это вызывает анизотропию поглощения, колебания функциональных групп начинают происходить преимущественно в плоскости, перпендикулярной направлению падающего света, что снижает интенсивность их ИК-полос.

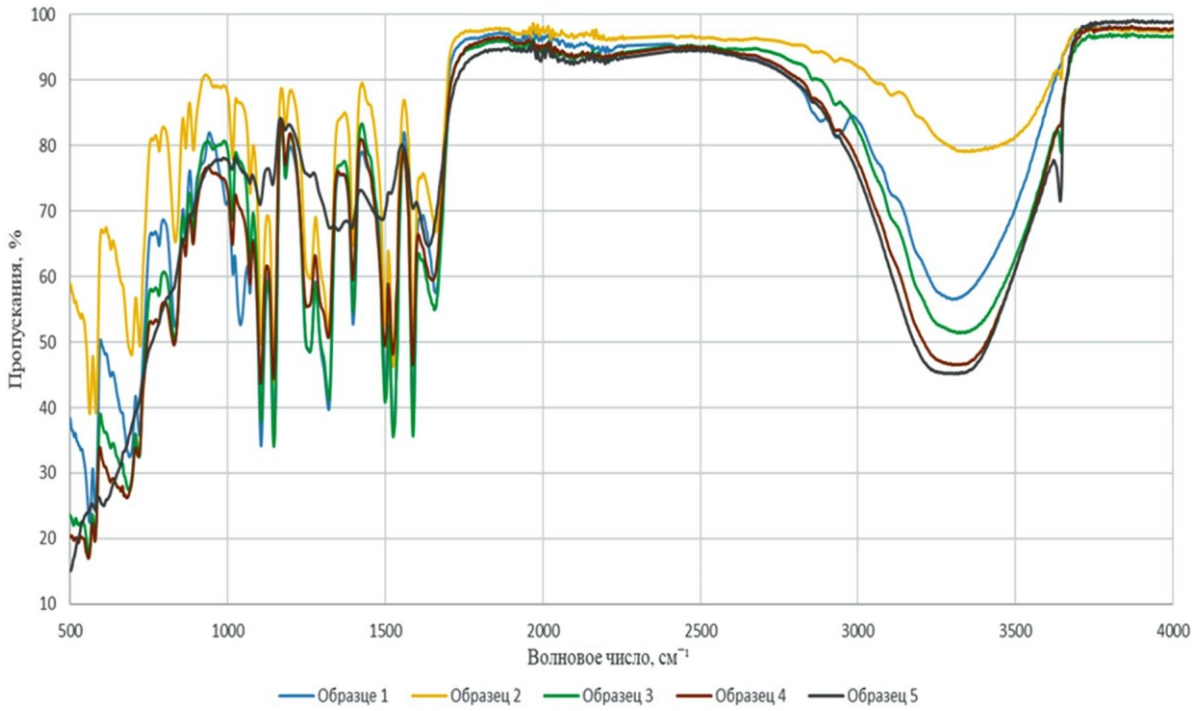


Рисунок 1 – ИК-спектры образцов мембран
(образцы 1–5, плотность тока 0, 10, 20, 30 и 40 А/м² соответственно)

При токе 10 А/м² происходит разрыв водородных связей внутри крупных ассоциатов воды. Вода становится более подвижной («свободной»), структура полимера локально разрыхляется. При повышении тока до 20–30 А/м² картина меняется, формируется упорядоченная сетка амидных групп с новыми центрами прочного связывания молекул воды. На ИК-спектрах это отражается увеличением ширины полосы при 3300 $см^{-1}$ и смещением ее максимума в область низких волновых чисел.

Достижение плотности тока 40 А/м² выступает точкой фазового перехода для полиамидного активного слоя. Наблюдается резкое падение интенсивности практически всех характеристических полос полимера (пропилена, пиперазина, амидных групп). Это связано не только с ориентацией цепей, но и с достижением критического уровня упорядоченности, за которым следует потеря регулярности укладки макромолекул. Происходит частичный переход участков активного слоя в аморфное состояние. Полоса Амид I 1660 $см^{-1}$ [4] претерпевает наиболее выраженные изменения, частота валентных колебаний связи C = O падает со 1660 до 1637 $см^{-1}$, полуширина пика увеличивается почти в 1,4 раза (с 53,6 до 74,8 $см^{-1}$), а оптическая плотность снижается вдвое (с 0,14 до 0,07). Это свидетельствует о глубоком изменении электронной плотности карбонильного кислорода и силы его водородных связей. Резко возрастает количество свободной (не связанной) воды в порах, что подтверждается появлением и доминированием узкого интенсивного пика при 3645 $см^{-1}$. Разбухание матрицы дополнительно увеличивает свободный объем.

Несмотря на радикальные физические изменения, химической деградации материала не происходит. На спектрах не зафиксировано появления новых пиков, которые указывали бы на образование побочных продуктов электрохимического окисления или разрыва основных цепей.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Критическая нагрузка в 40 А/м² переводит мембрану в новое физическое состояние. Аморфизация каркаса и избыточная гидратация могут привести к непредсказуемому изменению селективности процесса разделения металлов.

2. Мембрана ОПМН-П сохраняет свою химическую целостность во всем исследованном диапазоне, что подтверждает ее потенциальную стабильность в процессах электромембранной очистки стоков, содержащих ионы тяжелых металлов, при условии контроля плотности тока ниже порогового значения.

3. Выявленные механизмы позволяют использовать динамику полосы Амид I и полосы 3645 $см^{-1}$ как неразрушающие маркеры предельного износа мембраны в реальном времени.

Список литературы:

1. Оценка возможности получения полиалкилметилсилоксановых мембран из продуктов термолиза полиэтилена / Т.Н. Рохманка, Е.А. Грушевенко, В.Р. Атласов [и др.] // Мембраны и мембранные технологии. – 2026. – Т. 16. – № 2. – С. 191–210.

2. ИК-спектроскопические исследования структуры поверхностных слоев ионообменных мембран, полученных в процессе электродиализной очистки растворов, содержащих ионы металлов / С.И. Лазарев, О.В. Долгова, К.В. Шестаков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – № 10. – 2026. – С. 1–8.

3. Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Бидуля С.М. Мембранные технологии – экологичные способы очистки сточных вод // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2021. – № 3 (81). – С. 37–43.

4. Семенович Г.М., Храмова Т.С. Справочник по физической химии полимеров В 3 т. ИК и ЯМР спектроскопия полимеров. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 588 с.

УДК 656.259

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПЕРЕВОД СТРЕЛКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Епифанов Андрей Владимирович
Иркутский государственный университет путей сообщения
студент 5-го курса
12022110618@irgups.ru

Скоробогатов Максим Эдуардович
Иркутский государственный университет путей сообщения
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь»
Skorobogatov_ME@irgups.ru

Аннотация. В статье рассматривается роль и место стрелочных электроприводов в комплексе обеспечения безопасности движения поездов. Приведены наиболее распространённые модификации стрелочных электродвигателей постоянного тока с указанием их основных технических характеристик. Дана методика оценки энергозатрат на один цикл перевода стрелки, которая базируется на расчёте полной энергии в зависимости от напряжения, силы тока и времени перевода. Сформулированы выводы по проведённым расчётам.

Ключевые слова: стрелочный электропривод, электродвигатель постоянного тока, энергозатраты, ресурсосбережение, эксплуатационные расходы.

Безопасность и безаварийность является первоочередной задачей при организации движения поездов на отечественном железнодорожном транспорте. Это требование закрепляется в нормативных документах и отраслевых стандартах и применяется как на уже эксплуатирующихся участках, так и на вновь проектируемых. Также важно учитывать, что на функционирование технических устройств могут оказывать негативное влияние различные электромагнитные помехи, которые могут приводить к ложным срабатываниях ответственных устройств [1–2]. Исходя из этой концепции особую важность представляет наиболее эффективное и экономичное использование всеми объектами инфраструктуры при безусловном выполнении условий безопасности [3]. Кроме того важно, чтобы производительность не достигалась за счёт снижения надёжности. Одним из таких объектов является стрелочный электропривод (СЭП), который предназначен для перемещения остряков и контроля всех положений стрелочного перевода. От его работы напрямую зависит безопасность движения поездов на железнодорожных станциях при совершении поездной и маневровой работы, а также при формировании и расформировании составов на сортировочных горках [4]. Наибольшее распространение на сети отечественных железных дорог в настоящий момент получили привода марки СП-6М с центральным питанием от поста электрической централизации. Данная модель пришла на смену устаревшим приводам и отличается улучшенными характеристиками. При этом на пассажирских и грузовых станциях применяются два типа схем управления СЭП: двухпроводная (для электродвигателей постоянного тока) и пятипроводная (для электродвигателей переменного тока). Таким образом, выбор схемы определяется типом электродвигателя и условиями эксплуатации [5]. Наиболее распространённые типы модификаций электродвигателей, применяемых в двухпроводной схеме представлены в таблице 1.

В связи с большим количеством СЭП на сети дорог (несколько десятков тысяч штук) и числом переводов в сутки (несколько десятков на один СЭП) снижение энергозатрат на один перевод стрелки позволит снизить эксплуатационные расходы структурных подразделений в целом и отдельных линейных предприятий.

Для расчёта энергозатрат на один перевод необходимо учитывать, что энергия, расходуемая на один цикл, отличается от паспортной мощности электродвигателя и определяется по формуле (1):

$$W = \int_0^{t_{\text{пер}}} U(t) \cdot I(t) dt, \quad (1)$$

Таблица 1 – Основные характеристики электродвигатели постоянного тока

№	Параметр	МСП-0,1	МСП-0,15	МСП-0,25	ДБУ	ЭМСУ-СП
1.	Тип	Коллек., пост. тока	Коллек., пост. тока	Коллек., пост. тока	Коллек., пост. тока (двухобм.)	Вентильно-индукторный, пост. тока
2.	Напряжение питания	160 В	160 В	160 В	160 В	160 В
3.	Номинальный ток	~1,8 А	1,5 А	2,5 А	~2,0–2,5 А	~3,8 А
4.	КПД	0,5	0,56	0,59	~0,6	≥0,75
5.	Частота вращения	~1500 об/мин	~1500 об/мин	~1500 об/мин	~1500 об/мин	Регулир.
6.	Пусковой ток	5–7 А	5–6 А	6–8 А	6–8 А	Ограничен электроникой
7.	Время перевода	~7 с	~6 с	~4 с	~4 с	~2 с
8.	Наличие коллектора	Да	Да	Да	Да	Нет
9.	Регулировка скорости	Нет	Нет	Нет	Нет	Да (частотная)

где W – энергия на один цикл перевода; $U(t)$ – мгновенное значение напряжения, подводимого к электродвигателю; $I(t)$ – мгновенное значение тока, протекающего через электродвигатель;$t_{\text{пер}}$ – время перевода.

Однако в связи с достаточно высокой стабильностью электропитания поста электрической централизации для инженерных расчётов энергозатрат можно использовать упрощённую модель (2):

$$W \approx U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ср}} \cdot t_{\text{пер}}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное значение напряжения, подводимого к электродвигателю; $I_{\text{ср}}$ – среднее значение тока, протекающего через электродвигатель.

Кроме того, важным параметром для проводимой оценки является кпд каждого электродвигателя, так как коллекторные двигатели имеют существенный недостаток, который связан с потерей энергии в виде нагрева обмоток, щеточно-коллекторного узла и магнитопровода. Результаты расчёта энергозатрат представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводная таблица расчётов энергозатрат на один перевод стрелки

№	Параметр	МСП-0,1	МСП-0,15	МСП-0,25	ДБУ	ЭМСУ-СП
1.	Расчётная мощность	288 Вт	240 Вт	400 Вт	360 Вт	608 Вт
2.	Мощность с учётом КПД	144 Вт	134 Вт	236 Вт	216 Вт	456 Вт
3.	Энергозатраты на перевод	2016 Дж	1440 Дж	1600 Дж	1440 Дж	1216 Дж

Как видно из таблицы 2 по показателю расчётной мощности наиболее экономичным оказывается двигатель МСП-0,15, в то же время мощность двигателя ЭМСУ-СП более чем в два раза превышает это значение. Данный показатель даёт характеристику общей потребляемой энергии, что является общим оценочным ориентиром, но не отражает полные энергозатраты на один цикл перевода. При оценке двигателей по мощности с учётом кпд данное соотношение сохраняется, однако видно, что абсолютное значение механической мощности коллекторных двигателей уменьшается больше, чем у вентильного. Данный факт является следствием низкого значения кпд указанных двигателей. При анализе электродвигателей по конечным энергозатратам на один перевод можно сделать вывод о том, что в наиболее выигрышном положении оказывается ЭМСУ-СП, что связанно с его высокой эффективностью преобразования электрической энергии в механическую вращения и ускоренным временем перевода стрелки. В то же время наименее экономичным двигателем оказывается МСП-0,1, что прежде всего связано с большими потерями на нагрев его элементов.

Выводы. Проведённый анализ стрелочных электродвигателей постоянного тока показывает, что данная отрасль науки и техники прошла широкое историческое развитие, так на смену коллекторным двигателям приходят бесконтактные и вентильные с электронным блоком управления. Оценка двигателей по энергозатратам на один цикл перевода стрелки при этом показала, что наиболее эффективными и экономическими обоснованными являются современные ЭМСУ-СП в связи с их высоким кпд и ускоренным переводом. Так, при расчётной мощности 608 Вт, превышающей аналогичный показатель коллекторных моделей, данный двигатель обеспечивает наименьшие энергозатраты – 1216 Дж, что объясняется КПД не менее 0,75 и временем перевода около двух секунд, тогда как у наименее экономичного МСП-0,1 эти показатели составляют 0,5 и примерно семь секунд соответственно при энергозатратах 2016 Дж.

Список литературы:

1. Скоробогатов М.Э., Пультяков А.В. Эффективность работы локомотивного фильтра АЛСН // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 342–345. – EDN YSYRUV.

2. Пультяков А.В., Скоробогатов М.Э., Халиманов Д.С. Исследование влияния электромагнитных помех на работу устройств автоматической локомотивной сигнализации // Образование – наука – производство : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 07–08 декабря 2018 года. Том 1. – Чита : ЗабИЖТ ИРГУПС, 2018. – С. 191–198. – EDN VPLEEL.

3. Патент № 2727077 C1 Российская Федерация, МПК B61L 25/06. Однополосный цифровой фильтр для автоматической локомотивной сигнализации : № 2019114631 : заявл. 13.05.2019 : опубл. 17.07.2020 / М. Э. Скоробогатов, А. В. Пультяков, В. В. Демьянов ; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС. – EDN BWXJQI.

4. Пультяков А.В., Иванов П.Ю., Сударев И.В. К вопросу оценки эффективности работы горочных замедлителей при роспуске составов // Вестник транспорта Поволжья. – 2026. – Т. 2. – № 3(118). – С. 91–96. – EDN DCOPYH.

5. Стрелочные электроприводы. Пути совершенствования конструкции и технологии их содержания / В.И. Логвинов, Р.Ж. Бикташев, П.В. Пензев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 7. – С. 20–23. – DOI: 10.34649/AT.2020.7.7.004. – EDN RSSKQX.

УДК 621.65

АНАЛИЗ И РАСЧЁТ ВЕТРОСОЛНЕЧНОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Кашин Я.М.
Кубанский государственный технологический университет
канд. техн. наук, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин,
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
профессор кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования
yakovkashin@yandex.ru

Гимбицкий В.А.
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
доцент кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования

Яресько Н.Е.
Кубанский государственный технологический университет
студентка 4 курса кафедры электротехники и электрических машин

Аннотация. В работе рассмотрена конструкция автономной ветросолнечной генераторной установки (АВСГУ) мощностью до 1 кВт, предназначенной для электроснабжения удалённых объектов. Приведены результаты расчёта ветровой и солнечной составляющих мощности, выполнен тепловой расчёт системы охлаждения. Показано, что применение комбинированной системы охлаждения-обогрева лопаток позволяет расширить диапазон рабочих температур установки. Расчёт выполнен для климатических условий Краснодарского края с учётом подходов к прогнозированию выработки возобновляемых источников энергии [4] и выбору основного силового оборудования фотоэлектрических станций [5].

Ключевые слова: ветросолнечная генераторная установка, автономное электроснабжение, аксиальный генератор, тепловой расчёт, фотоэлектрический преобразователь.

Введение

Для электроснабжения объектов малой мощности, расположенных вдали от центральных сетей (пасеки, фермерские хозяйства, метеопосты, малые предприятия), часто применяются дизель-генераторы. Однако их использование связано с постоянными затратами на топливо и необходимостью регулярного обслуживания. Альтернативой являются установки на возобновляемых источниках энергии [1].

В работе [2] показано, что гибридные ветросолнечные установки обладают лучшими показателями по сравнению с моно-источниками за счёт взаимного дополнения ветровой и солнечной энергии. Однако существующие конструкции генераторов для таких установок имеют недостатки: перегрев обмоток при длительной работе, отсутствие стабилизации напряжения при порывистом ветре, обледенение лопаток зимой.

Цель работы – анализ и расчёт ветросолнечной генераторной установки, защищённой патентом РФ № 2839659 [3], для оценки возможности её применения на объектах малой мощности.

Конструктивная схема установки

Установка (рис. 1) содержит корпус 2, разделённый на три секции. Внутри размещены подвозбудитель, возбудитель и основной генератор. На внешней стороне средней секции закреплены лопатки 1 изогнутой формы. На передней части установлен обтекатель 8.

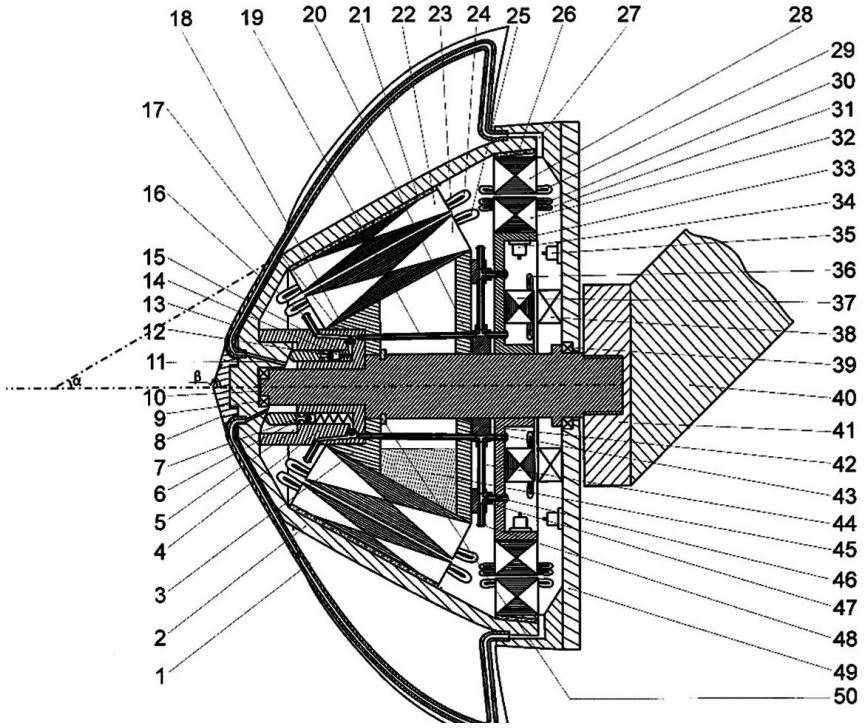


Рисунок 1 – Общий вид автономной
ветросолнечной генераторной установки в разрезе [3]

Отличительная особенность конструкции – неподвижная ось 10, на которой закреплены аксиальный магнитопровод 37 якоря подвозбудителя с многофазной обмоткой 36 якоря подвозбудителя и радиальный магнитопровод 32 индуктора возбудителя с основной однофазной обмоткой возбуждения возбудителя 30, в то время как корпус 2 с лопатками 1 вращается. Такая компоновка упрощает токосъём и снижает износ подшипников.

Электрическая схема (рис. 2) включает фотоэлектрический преобразователь 51, блок регулирования напряжения 45, многофазную обмотку 36 якоря подвозбудителя, основную однофазную обмотку возбуждения возбудителя 30, многофазную обмотку 29 якоря возбудителя. однофазную обмотку 24 возбуждения основного генератора, многофазную обмотку 25 якоря основного генератора и дополнительную 31 обмотку возбуждения. Дополнительная однофазная обмотка 31 возбуждения возбудителя уложена в пазы радиального магнитопровода 32 индуктора возбудителя и подключена к выходу фотоэлектрического преобразователя 51.

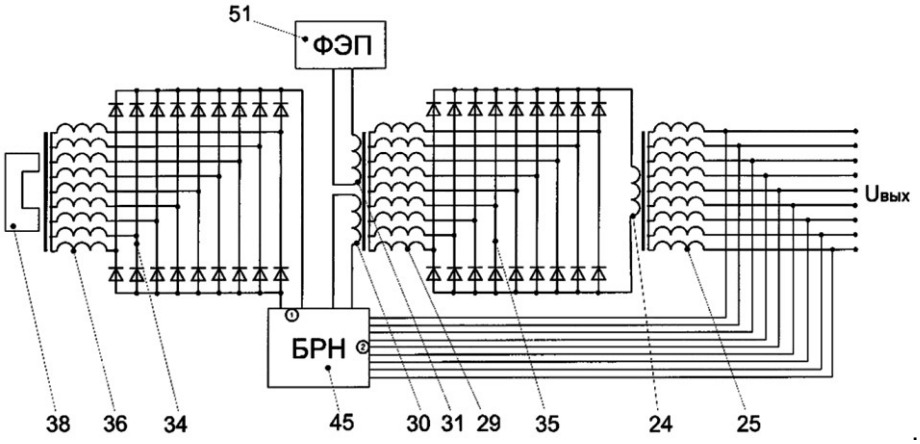


Рисунок 2 – Электрическая схема автономной ветросолнечной генераторной установки

Расчёт ветровой составляющей

Мощность ветровой части определялась по формуле:

$$P_{\text{вет}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{ред}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{возд}} = 1{,}225\ \text{кг/м}^3$ – плотность воздуха, кг/м³; S – ометаемая площадь лопаток, м²; v – скорость ветра, м/с; C_p – коэффициент использования энергии ветра; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора; $\eta_{\text{ред}}$ – КПД редуктора (в данной конструкции отсутствует, $\eta_{\text{ред}} = 1$).

Для расчёта приняты следующие значения: $S = 1{,}5\ \text{м}^2$ (диаметр ветроколеса 1,38 м); $v = 6\ \text{м/с}$ (среднегодовая скорость для Краснодарского края, что согласуется с метеорологическими данными, используемыми при краткосрочном прогнозировании выработки ВЭС [4]); $C_p = 0{,}35$; $\eta_{\text{ген}} = 0{,}82$.

Подставляя эти значения в формулу (1), получаем:

$$P_{\text{вет}} = 0{,}5 \cdot 1{,}225 \cdot 1{,}5 \cdot 216 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}82 = 57\ \text{Вт}.$$

При скорости ветра 10 м/с мощность возрастает до 264 Вт.

Расчёт солнечной составляющей

Мощность солнечной части:

$$P_{\text{солн}} = E \cdot S_{\text{ФЭП}} \cdot \eta_{\text{ФЭП}} \cdot k_{\text{потерь}}, \quad (2)$$

где E – уровень инсоляции; $S_{\text{ФЭП}}$ – площадь ФЭП; $\eta_{\text{ФЭП}}$ – КПД ФЭП; $k_{\text{потерь}}$ – коэффициент потерь в контроллере и кабелях.

Для Краснодарского края среднегодовая инсоляция $E = 850\ \text{Вт/м}^2$ (для наклонной поверхности). Принято $S_{\text{ФЭП}} = 1{,}0\ \text{м}^2$; $\eta_{\text{ФЭП}} = 0{,}16$; $k_{\text{потерь}} = 0{,}85$. Выбор параметров ФЭП и коэффициента потерь соответствует обобщенному алгоритму выбора основного силового оборудования фотоэлектрической станции [5].

$$P_{\text{солн}} = 850 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}16 \cdot 0{,}85 = 116\ \text{Вт}.$$

Суммарная мощность

$$P_{\text{сумм}} = k_{\text{одн}} \cdot (P_{\text{вет}} + P_{\text{солн}}). \quad (3)$$

С учётом коэффициента одновременности $k_{\text{одн}} = 0{,}7$:

$$P_{\text{сумм}} = 0{,}7 \cdot (57 + 116) = 121\ \text{Вт}.$$

Полученное значение соответствует мощности, достаточной для питания осветительных приборов, зарядки аккумуляторов, работы маломощной аппаратуры связи. Для объектов с большим потреблением требуется увеличение площади лопаток и ФЭП.

Тепловой расчёт

Количество теплоты, отводимой от обмоток, определялось по уравнению:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где $c = 4180\ \text{Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ – теплоёмкость воды; m – массовый расход; ΔT – перепад температур.

Массовый расход жидкости через гидронасос:

$$m = \rho \cdot V \cdot n \cdot z,$$

где $V = 2 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^3$ – рабочий объём одной камеры; n – число циклов в секунду; $z = 8$ число поршней.

При частоте вращения 300 об/мин $n = 5$ циклов/с:

$$m = 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 8 = 0{,}08\ \text{кг/с}.$$

При $\Delta T = 15\ \text{°C}$ количество отводимой теплоты составляет:

$$Q = 4180 \cdot 0{,}08 \cdot 15 = 5016\ \text{Вт}.$$

Это значение значительно превышает тепловыделение генератора (не более 50 Вт), что говорит о большом запасе по охлаждению.

Анализ стабилизации напряжения

Блок регулирования напряжения 45 работает следующим образом. При отклонении выходного напряжения от заданного значения БРН корректирует ток в обмотке возбуждения возбудителя 30. Дополнительная обмотка 31, подключённая к ФЭП, создаёт постоянный магнитный поток, сонаправленный с основным.

Экспериментальные данные, приведённые в работе [2], показывают, что применение подобной схемы позволяет удерживать напряжение в пределах ±5 % при изменении скорости ветра от 4 до 12 м/с. Без стабилизации отклонение достигает ±25 %. Следует отметить, что учет метеорологических данных и вероятностно-статистических методов прогнозирования выработки ВЭС [4] позволяет дополнительно повысить точность настройки БРН и устойчивость стабилизации в условиях переменного ветрового режима.

Результаты анализа

По результатам выполненного расчёта можно сделать несколько примечаний.

Во-первых, по мощности. При скорости ветра 6 м/с ветровая часть даёт всего 57 Вт – это немного. Основной вклад вносит солнечная составляющая (116 Вт при инсоляции 850 Вт/м²). Суммарная мощность с учётом коэффициента одновременности составила 121 Вт. Этого достаточно для питания светодиодного освещения (20–30 Вт), зарядки аккумуляторов, работы аппаратуры связи и датчиков. Для более серьёзных потребителей (например, насос или холодильник) потребуется увеличивать площадь лопаток и ФЭП в три-четыре раза, что согласуется с подходами к выбору оборудования фотоэлектрических станций [5].

Во-вторых, интересный результат дал тепловой расчёт. Система охлаждения при 300 об/мин отводит около 5 кВт теплоты – это почти в сто раз больше, чем выделяет сам генератор (не более 50 Вт). Такой запас кажется избыточным, но он не случаен: гидронасос работает от вращения корпуса, и при увеличении скорости ветра до 12–15 м/с производительность охлаждения растёт пропорционально частоте. То есть система автоматически подстраивается под режим работы. Кроме того, часть тепла идёт на обогрев лопаток, что важно для зимних условий.

В-третьих, по стабилизации напряжения. Схема с БРН и дополнительной обмоткой, подключённой к ФЭП, показывает хорошие результаты: отклонение напряжения не превышает ±5 % при изменении скорости ветра от 4 до 12 м/с. Без стабилизации этот показатель был бы на уровне ±25 %, что для многих потребителей недопустимо.

Отдельно стоит отметить, что расчёт выполнялся для среднегодовых условий Краснодарского края. В реальности скорость ветра и инсоляция существенно меняются по сезонам, поэтому в дальнейшем нужно учитывать месячные графики поступления энергии, что непосредственно связано с методами краткосрочного прогноза выработки ВЭС по метеорологическим данным [4].

Заключение

В работе выполнен анализ и расчёт автономной ветросолнечной генераторной установки, защищённой патентом РФ № 2839659. Получены следующие основные результаты:

1. Рассчитана ветровая составляющая мощности. При скорости ветра 6 м/с она составляет 57 Вт, при 10 м/с – 264 Вт.
2. Рассчитана солнечная составляющая. При инсоляции 850 Вт/м² и площади ФЭП 1 м² она составляет 116 Вт.
3. Суммарная мощность установки с учётом коэффициента одновременности равна 121 Вт, что достаточно для питания маломощных потребителей (освещение, связь, датчики).
4. Выполнен тепловой расчёт системы охлаждения. Показано, что тепловая мощность системы охлаждения составляет до 5 кВт, что значительно превышает тепловыделение генератора. Это подтверждает возможность длительной работы установки без перегрева.
5. Проанализирована схема стабилизации напряжения. Применение БРН и дополнительной обмотки, подключённой к ФЭП, позволяет удерживать напряжение в пределах ±5 % при изменении скорости ветра от 4 до 12 м/с.

Полученные результаты показывают, что рассмотренная конструкция может быть использована для электроснабжения объектов малой мощности в условиях Краснодарского края. Дальнейшая работа предполагает проведение натурных испытаний, уточнение расчёта с учётом сезонной неравномерности поступления энергии на основе методов прогнозирования выработки ВЭС [4] и выбором основного силового оборудования фотоэлектрической станции [5].

Список литературы:

1. Ветро-солнечные генераторы для электроснабжения объектов нефтегазовой отрасли / Я.М. Кашин, Е.А. Зеленская [и др.] // Газовая промышленность. – 2014. – № 6(707). – С. 114–117.

2. Гибридные энергетические комплексы на базе нескольких возобновляемых источников энергии : монография / Я.М. Кашин [и др.]. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2024. – 256 с.

3. Пат. 2839659 RU, 18.11.2024. Автономная ветросолнечная генераторная установка / Кашин Я.М., Князев А.С., Яресько Н.Е. // Опубл. 07.05.2025, Бюл. № 13.

4. Алиходжина Н.В., Андреев Н.Е. Краткосрочный прогноз выработки ВЭС по метеорологическим данным вероятностно-статистическим методом // Технические и технологические системы : материалы XVI Междунар. науч. конф. «ТТС-25». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2025. – Т. 2. – С. 11–17.

5. Обобщённый алгоритм выбора основного силового оборудования фотоэлектрической станции / А.А. Белов, Е.А. Мараховский, А.В. Самородов [и др.] // Технические и технологические системы : материалы XVI Междунар. науч. конф. «ТТС-25». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2025. – Т. 2. – С. 37–42.

УДК 621.65

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ

Кашин Я.М.
Кубанский государственный технологический университет
канд. техн. наук, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин,
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
профессор кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования
yakovkashin@yandex.ru

Климов В.В.
Кубанский государственный технологический университет
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна

Попович Е.И.
Кубанский государственный технологический университет
студент 4 курса кафедры электротехники и электрических машин факультета нефти, газа и энергетики

Аннотация. В работе рассмотрена электромагнитная система устройства для обнаружения металлических предметов, защищённая патентами РФ № 2866519 [1] и № 2866520 [2]. Приведены структурные схемы двух модификаций устройства: с тремя взаимно перпендикулярными приёмо-передающими катушками и с двумя передающими катушками и одной приёмной. Показано, что ортогональное расположение осей катушек обеспечивает формирование зондирующих магнитных потоков в трёхмерном пространстве (X, Y, Z), что повышает достоверность обнаружения предметов произвольной формы и ориентации. Выполнен анализ помехозащищённости и информативности устройств.

Ключевые слова: металлоискатель, вихревые токи, приёмо-передающая катушка, ортогональные оси, помехозащищённость.

Цель работы – анализ устройств для обнаружения металлических предметов для оценки возможности повышения достоверности обнаружения металлических предметов малых размеров, произвольной формы и ориентации.

Для обнаружения металлических предметов, находящихся под слоем грунта и воды, широко применяются индукционные металлоискатели, принцип действия которых основан на регистрации вторичного магнитного поля вихревых токов, наводимых в искомом объекте [3]. Известные устройства (типа BFO, FM, O/R, IB, VLF, T/R, PI) содержат одну или несколько катушек индуктивности различной формы и исполнения [4]. Однако их общим недостатком является низкая эффективность при поиске предметов с малым количеством металла, имеющих произвольную форму и ориентацию в пространстве.

В [5] описано устройство для поиска металлических предметов, содержащее передающую катушку, намотанную на каркас с ферромагнитным сердечником и подключённую к электрической батарее последовательно с прерывателем. Ось передающей катушки лежит в плоскости витков приёмной катушки и перпендикулярна её оси. Недостаток этого устройства – невозможность формирования магнитных потоков, оси которых расположены в трёхмерном пространстве (X, Y, Z), что снижает информативность и помехозащищённость этого и подобных ему устройств [6].

Авторами разработаны два устройства для обнаружения металлических предметов [1, 2]. На рисунке 1 представлена структурная схема устройства [1], которое содержит электрическую батарею 1, индикатор 9, устройство управления УУ 7, первую приёмо-передающую катушку 15, намотанную на первый каркас с ферромагнитным сердечником, вторую приёмо-передающую катушку 14, намотанную на второй каркас с ферромагнитным сердечником, и третью приёмо-передающую катушку 13. Оси первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушек взаимно перпендикулярны.

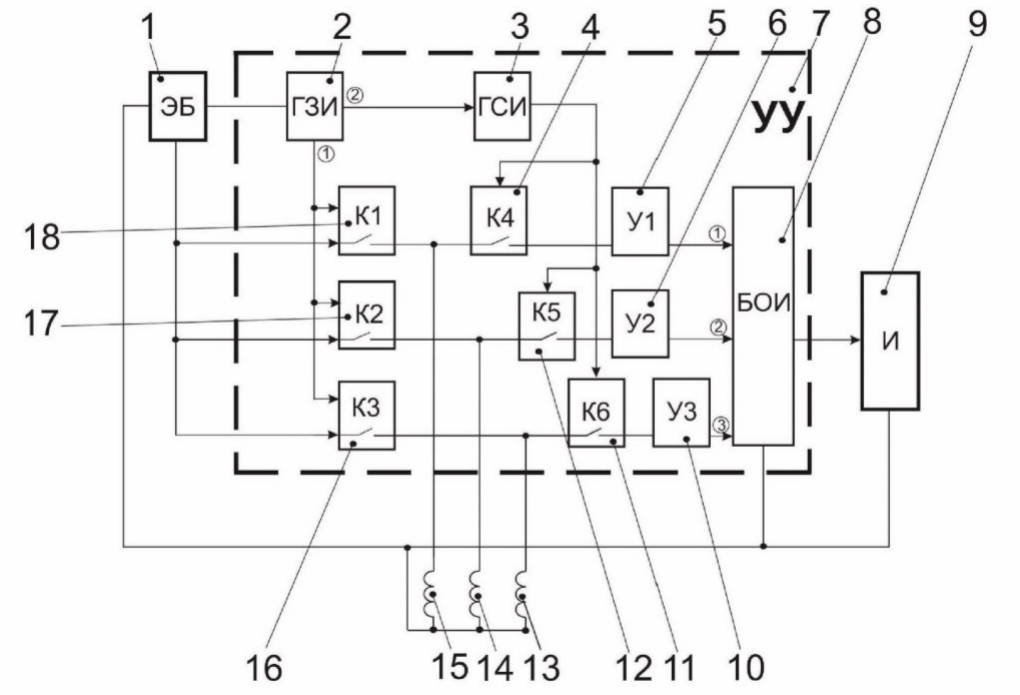


Рисунок 1 – Стуктурная схема устройства с тремя приемно-передающими катушками [1]

Устройство управления УУ 7 содержит подключённый к электрической батарее ЭБ 1 блок обработки информации БОИ 8 с первым, вторым и третьим входами и выходом, подключённым ко входу индикатора И 9, первый У1 5, второй У2 6 и третий У3 10 усилители, первый К1 18, второй К2 17, третий К3 16, четвёртый К4 4, пятый К5 12 и шестой К6 11 электронные ключи, подключённый к электрической батарее ЭБ 1 генератор задающих импульсов ГЗИ 2 с первым и вторым выходами и генератор стробирующих импульсов ГСИ 3.

Первый выход генератора задающих импульсов ГЗИ 2 подключён к управляющим элементам первого К1 18, второго К2 17 и третьего К3 16 электронных ключей [1]. Второй выход генератора задающих импульсов ГЗИ 2 подключён ко входу генератора стробирующих импульсов ГСИ 3. Выход генератора стробирующих импульсов ГСИ 3 подключён к управляющим элементам четвёртого К4 4, пятого К5 12 и шестого К6 11 электронных ключей.

Выход первого усилителя У1 5 подключён к первому входу блока обработки информации БОИ 8, а его вход выполнен с возможностью подключения через четвёртый электронный ключ К4 4 к первой приёмо-передающей катушке 15, выполненной с возможностью подключения к электрической батарее ЭБ 1 через первый электронный ключ К1 18. Выход второго усилителя У2 6 подключён ко второму входу блока обработки информации БОИ 8, а его вход выполнен с возможностью подключения через пятый электронный ключ К5 12 ко второй приёмо-передающей катушке 14, выполненной с возможностью подключения к электрической батарее ЭБ 1 через второй электронный ключ К2 17. Выход третьего усилителя У3 10 подключён к третьему входу блока обработки информации БОИ 8, а его вход выполнен с возможностью подключения через шестой электронный ключ К6 11 к третьей приёмо-передающей катушке 13, выполненной с возможностью подключения к электрической батарее ЭБ 1 через третий электронный ключ К3 16.

Первый К1 18, второй К2 17, третий К3 16, четвёртый К4 4, пятый К5 12 и шестой К6 11 электронные ключи выполнены с регулируемой частотой следования импульсов и скважностью [1]. Индикатор И 9 выполнен в виде анализатора амплитудно-временных характеристик затухания вихревых токов в искомом объекте в паузах между зондирующими импульсами и подключён к электрической батарее ЭБ 1.

Помехозащищённость устройства достигается тем, что устройство содержит первую приёмо-передающую катушку 15, намотанную на первый каркас с ферромагнитным сердечником, вторую приёмо-передающую катушку 14, намотанную на второй

каркас с ферромагнитным сердечником, и третью приёмо-передающую катушку 13, при этом оси первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушек взаимно перпендикулярны [1]. Поскольку оси первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушек перпендикулярны, их взаимные влияния друг на друга (то есть создаваемые ими помехи) исключены, и ЭДС в этих катушках от непосредственного воздействия на них магнитных полей, создаваемых протекающими в этих катушках электрическими токами, равны нулю [1].

Повышение информативности устройства достигается тем, что оно дополнительно содержит устройство управления УУ 7, которое в свою очередь содержит блок обработки информации БОИ 8 с первым, вторым и третьим входами, первый У1 5, второй У2 6 и третий У3 10 усилители, первый К1 18, второй К2 17, третий К3 16, четвёртый К4 4, пятый К5 12 и шестой К6 11 электронные ключи, генератор задающих импульсов ГЗИ 2 с первым и вторым выходами и генератор стробирующих импульсов ГСИ 3 [1].

Оборудование устройства управления УУ 7 электронными ключами (первым К1 18, вторым К2 17, третьим К3 16, четвёртым К4 4, пятым К5 12 и шестым К6 11 соответственно – по два на каждую приёмо-передающую катушку), управляемыми генератором задающих импульсов ГЗИ 2 и генератором стробирующих импульсов ГСИ 3, позволяет подключать приёмо-передающие катушки к электрической батарее ЭБ 1 для формирования магнитного поля (передающего) для наведения в искомых металлических предметах вихревых токов и отключать их от электрической батареи ЭБ 1 (для приёма индуктированного вихревыми токами в искомых металлических предметах) и подключать к первому У1 5, второму У2 6 и третьему У3 10 усилителям соответственно с последующей подачей принятого и усиленного сигнала о наличии и размерах искомого металлического предмета на соответствующий вход блока обработки информации БОИ 8 [1].

Это делает возможной регистрацию малых значений ЭДС, наводимых только магнитными потоками, создаваемыми вихревыми токами, протекающими в искомых предметах [1, 3].

Индикация амплитудно-временных параметров ЭДС индикатором И 9 от всех приёмо-передающих катушек осуществляется только в паузах между управляющими импульсами и только во время действия стробирующего импульса [1]. Это снижает вероятность электромагнитных наводок в приёмо-передающих катушках, а суммирование полезных сигналов (ЭДС, индуктируемых магнитными полями, создаваемыми вихревыми токами, протекающими в искомых металлических предметах) повышает соотношение полезный сигнал/помеха (особенно при поиске объектов с мелкими металлическими элементами) [1, 3].

Это позволяет обеспечить возможность выполнения ряда специальных задач в сложных условиях, например, обнаружения металлических предметов игольчатой формы, вертикально заглублённых в грунт, и других предметов с малым количеством металла [1, 6].

Принцип работы устройства [1] (рисунок 1). Генератор задающих импульсов ГЗИ 2 устройства управления УУ 7 подаёт на управляющие элементы первого К1 18, второго К2 17 и третьего К3 16 электронных ключей управляющий импульс. Передним фронтом управляющего импульса первый электронный ключ К1 18 подключает к электрической батарее ЭБ 1 первую приёмо-передающую катушку 15, второй электронный ключ К2 17 подключает к ЭБ 1 вторую приёмо-передающую катушку 14, третий электронный ключ К3 16 подключает к ЭБ 1 третью приёмо-передающую катушку 13.

Под действием напряжения ЭБ 1 в первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушках протекают импульсные электрические токи, которые создают импульсные магнитные поля [1]. Так как оси первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушек взаимно перпендикулярны, то протекающие в этих катушках импульсные электрические токи формируют импульсные магнитные поля, магнитные потоки которых взаимно перпендикулярны (направлены по осям ортогональной системы координат X, Y, Z). Эти импульсные магнитные поля наводят в искомых металлических предметах (при их наличии) вихревые токи, которые в свою очередь создают магнит-

ные поля, которые индуктируют в первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушках ЭДС, амплитуды и длительности которых зависят от размеров и характеристик искомых металлических предметов по осям ортогональной системы координат X, Y, Z [1, 3].

Отключение первой 15, второй 14 и третьей 13 приёмо-передающих катушек от ЭБ 1 осуществляется задним фронтом управляющего импульса, поданного генератором задающих импульсов ГЗИ 2 на управляющие элементы первого К1 18, второго К2 17 и третьего К3 16 электронных ключей [1].

Задним фронтом управляющего импульса также запускается генератор стробирующих импульсов ГСИ 3, который четвёртым электронным ключом К4 4 подключает первую приёмо-передающую катушку 15 ко входу первого усилителя У1 5. ЭДС, наведённая в первой приёмо-передающей катушке 15, усиливается первым усилителем У1 5 и с его выхода поступает на первый вход блока обработки информации БОИ 8.

Пятым электронным ключом К5 12 генератор стробирующих импульсов ГСИ 3 подключает вторую приёмо-передающую катушку 14 ко входу второго усилителя У2 6. ЭДС, наведённая во второй приёмо-передающей катушке 14, усиливается вторым усилителем У2 6 и с его выхода поступает на второй вход блока обработки информации БОИ 8 [1].

Шестым электронным ключом К6 11 генератор стробирующих импульсов ГСИ 3 подключает третью приёмо-передающую катушку 13 ко входу третьего усилителя У3 10. ЭДС, наведённая в третьей приёмо-передающей катушке 13, усиливается третьим усилителем У3 10 и с его выхода поступает на третий вход блока обработки информации БОИ 8.

На рисунке 2 представлено второе устройство для обнаружения металлических предметов [2], которое содержит приёмную катушку 7, первую передающую катушку 8, намотанную на первый каркас с ферромагнитным сердечником 6 и подключённую к электрической батарее 1 последовательно с первым прерывателем постоянного тока 5. Ось первой передающей катушки 8 лежит в плоскости витков приёмной катушки 7 и перпендикулярна её оси. Устройство содержит индикатор принимаемых сигналов 11, выполненный в виде амплитудно-временного анализатора, и вторую передающую катушку 10, идентичную первой, намотанную на второй каркас со вторым ферромагнитным сердечником 9, установленную внутри приёмной катушки 7, витки которой выполнены в форме окружности [2]. Ось второй передающей катушки 10 лежит в плоскости витков приёмной катушки 7 и перпендикулярна её оси, а оси первой 8 и второй 10 передающих катушек перпендикулярны. Первый 5 и второй 2 прерыватели постоянного тока входят в состав блока управления 4, выполнены в виде электронных ключей с регулируемой частотой следования импульсов и скважностью и подключены к генератору задающих импульсов 3 блока управления [2].

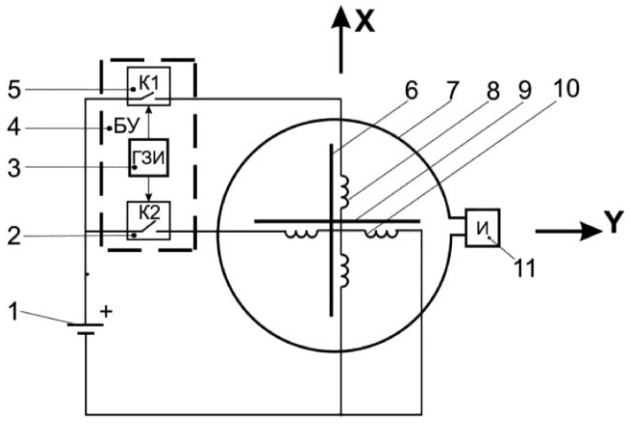


Рисунок 2 – Структурная схема устройства с двумя передающими катушками [2]

Результаты анализа

1. Ортогональное расположение осей приёмо-передающих катушек (в трёхмерном пространстве X, Y, Z) обеспечивает взаимную компенсацию помех: ЭДС, наво-

димые в каждой катушке от полей, создаваемых двумя другими катушками, равны нулю. Что обеспечивает высокую помехозащищенность разработанных устройств за счёт повышения соотношения полезный сигнал/помеха.

2. Наличие трёх независимых каналов (по осям X, Y, Z) позволяет регистрировать вихревые токи в искомом объекте независимо от его ориентации. Это особенно важно при поиске предметов игольчатой формы, вертикально заглублённых в грунт, и других предметов с малым количеством металла. Это обеспечивает высокую информативность разработанных устройств.

3. Электронные ключи с регулируемой частотой следования импульсов и скважностью позволяют производить селекцию под крупные и мелкие искомые предметы, а также подстройку устройства под разные условия (грунты и водные преграды с разной минерализацией и проводимостью. Это обеспечивает высокую селективность разработанных устройств.

4. Поочерёдное подключение приёмо-передающих катушек к электрической батарее и к усилителям через электронные ключи позволяет регистрировать малые значения ЭДС, наводимых только магнитными потоками вихревых токов.

Таким образом, разработанные конструкции целесообразно использовать для обнаружения металлических предметов, имеющих малые размеры, различную конфигурацию и произвольную ориентацию в пространстве. В дальнейшем необходимо провести дополнительные расчёты устройств и их натурные испытания с целью учёта влияния проводимости грунта и воды на амплитудно-временные характеристики затухания вихревых токов.

Список литературы:

1. Пат. 2866519 RU, 20.07.2026. Устройство для обнаружения металлических предметов / Кашин Я.М., Климов В.В., Попович Е.И. // Опубл. 20.07.2026, Бюл. № 20.

2. Пат. 2866520 RU, 20.07.2026. Устройство для обнаружения металлических предметов / Кашин Я.М., Климов В.В., Попович Е.И. // Опубл. 20.07.2026, Бюл. № 20.

3. Саулов А.Ю. Металлоискатели для любителей и профессионалов. – СПб. : Наука и техника, 2004. – С. 10–21.

4. Щедрин А.И. Металлоискатели для поиска кладов и реликвий. – М. : Арбат-Информ, 1998. – С. 9–34.

5. Пат. US 1679339, 31.07.1928. Устройство для поиска металлических предметов / Шерл Херб.

6. Новые металлоискатели обнаружат боеприпасы под шестиметровым грунтом // Московский комсомолец. – 2019. – № 27922 (11 марта).

УДК 621.65

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ КАБЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНО-РАДИАЦИОННОГО МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ

Кашин Я.М.
Кубанский государственный технологический университет
канд. техн. наук, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин,
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
профессор кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования
yakovkashin@yandex.ru

Морозов В.В.
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
преподаватель кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования

Ченцов М.А.
Кубанский государственный технологический университет
студент 2 курса кафедры электротехники и электрических машин факультета нефти, газа и энергетики

Аннотация. Сотрудниками кафедры электротехники и электрических машин КубГТУ разработан на уровне изобретений ряд устройств для определения места повреждения кабеля, основанных на использовании разработанного ими же импульсно-радиационного метода диагностики.

Ключевые слова: места повреждения кабеля, импульсно-радиационный метод диагностики.

В [1] предложено устройство, посредством которого в кабель посылают зондирующий сигнал, представляющий собой перепад напряжения или суперпозицию видеоимпульса и перепада напряжения. В зоне повреждения кабеля перемещают источник направленного радиоактивного излучения, временно создавая в изоляции кабеля искусственную волновую неоднородность. Измерение расстояния до места повреждения определяют по времени задержки отраженного от места повреждения сигнала относительно зондирующего. О точном месте повреждения судят по моменту совмещения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) импульсного искателя повреждений сигнала, отраженного от места повреждения, с сигналом, отраженным от искусственной волновой неоднородности. Координацию перемещения оператора, движущегося с устройством вдоль трассы кабеля (первого оператора), осуществляет второй оператор по радиотелефону.

Основными достоинствами этого устройства, выгодно отличающего его от ранее существующих являются снижение радиационного воздействия радиоактивного γ-излучения на организм оператора, перемещающего источник радиоактивного излучения вдоль трассы в зоне повреждения кабеля, повышение точности совмещения проходного канала свинцового затвора с вертикальным каналом свинцового контейнера и вертикальным узконаправленным выходным каналом свинцовой крышки с обеспечением его фиксации, а следовательно, увеличение потока радиоактивного γ-излучения, проходящего через проходной канал свинцового затвора и вертикальный узконаправленный выходной канал свинцовой крышки и воздействующего на поврежденный кабель [1].

Другим устройством, решающим ту же задачу – определение мета повреждения кабеля является усовершенствованное устройство, представленное в описании изобретения к патенту № 2698939 RU [2] (рисунок 2).

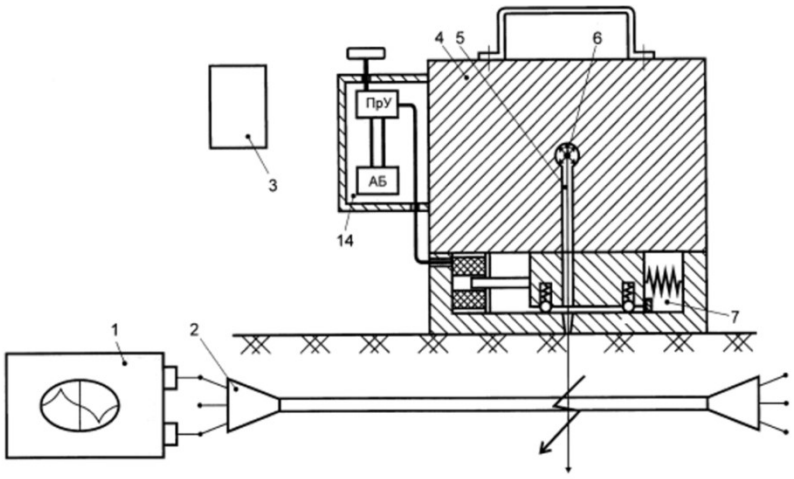


Рисунок 1 – Устройство определения места повреждения кабеля [1]

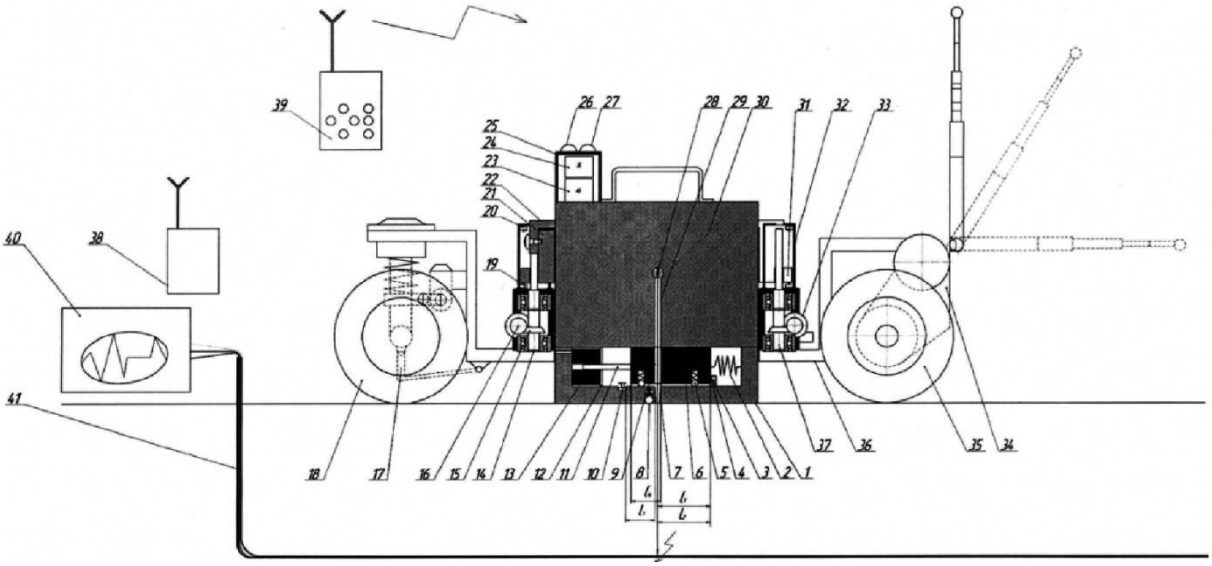


Рисунок 2 – Устройство определения места повреждения кабеля [2]

Это устройство в дополнение к предыдущему позволяет обеспечить автоматизацию процесса управления, уменьшить вероятность радиоактивного облучения оператора, за счет обеспечения возможности его информирования о точном совмещении проходного, вертикального и вертикального узконаправленного выходного каналов, а также предотвратить неполное прохождение γ-излучения от источника радиоактивного излучения и, соответственно, слабое воздействие γ-излучения через слой земли на поврежденный кабель.

В целях минимизации отклонения устройства для определения места повреждения кабеля от трассы прохождения кабеля в зоне его повреждения произведена доработка известного из [2] устройства, которое названо авторами автономное устройство для определения места повреждения кабеля [3].

Полученный результат достигнут за счет того, что в нижней части несущей рамы 36 (рисунок 3) на равном расстоянии от рулевых колес 18 устанавливают рамочную антенну 41, а блок рулевого управления 17 содержит электродвигатель, на валу которого жестко закрепляют ведущую шестерню реечной передачи, при этом рулевые колеса 18 соединяют между собой рулевой рейкой, связанной со ступицами рулевых колес посредством шарниров, в центральной верхней части которой жестко закрепляют зубчатую рейку реечной передачи, а в ее центральной нижней части жестко закрепляют потенциометр обратной связи, при этом блок автономного управления 25 содержит элемент выдержки времени и сравнивающий блок, имеющее первый вход, соединенный с выходом рамочной антенны, и второй вход, соединенный с движком потенцио-

метра обратной связи, а в корпусе реечной передачи устанавливают правый и левый концевые выключатели

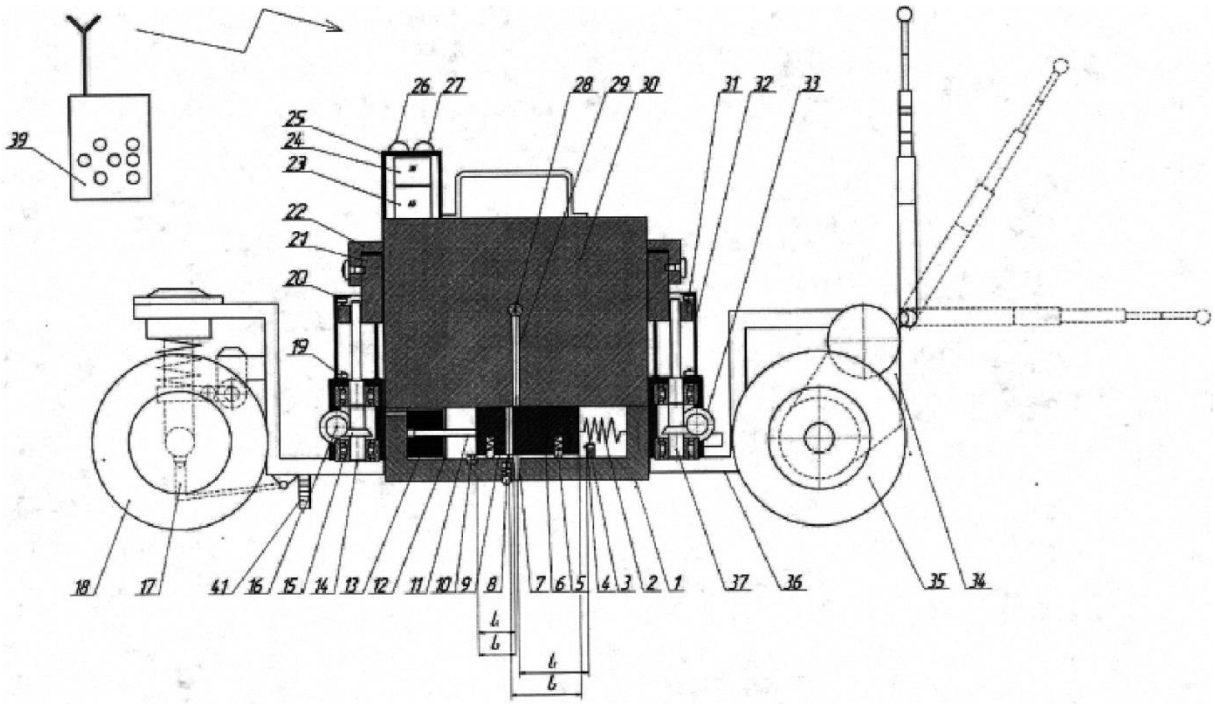


Рисунок 3 – Автономное устройство определения места повреждения кабеля [3]

Более совершенная конструкция автономного устройства для определения места повреждения кабеля описана в [4].

Методика определения места повреждения кабеля посредством этого устройства аналогична методике, реализуемой более ранними и рассмотренными выше конструкциями, в которых применяется импульсно-радиационный метод, однако имеется ряд ключевых отличий.

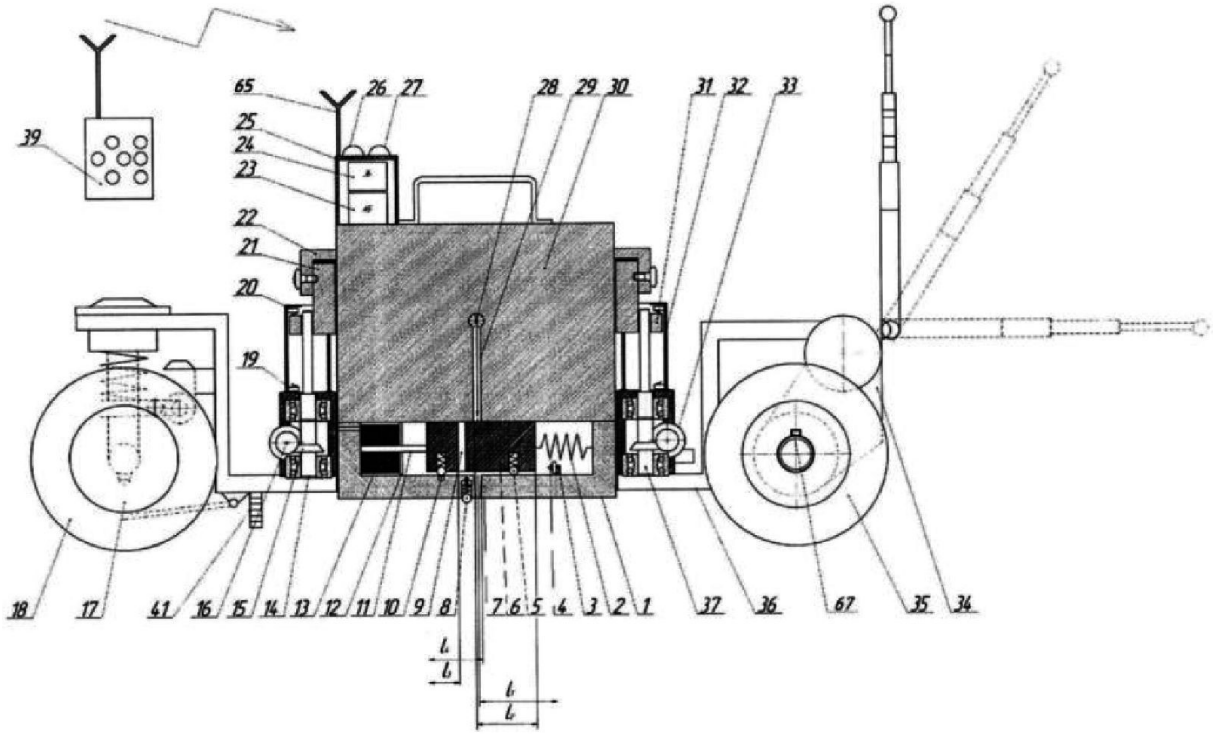


Рисунок 4 – Автономное устройство определения места повреждения кабеля [4]

Эта конструкция, выполняя функцию известного автономного устройства для определения места повреждения кабеля, в то же время в отличие от него позволяет улучшить его эксплуатационные характеристики путем автоматизации управления продольным движением, что позволяет минимизировать отклонения автономного устройства от места повреждения кабеля при его продольном движении в зоне повреждения кабеля, исключить повторные передвижения и включения устройства в работу, что повышает точность определения места повреждения кабеля и сокращает время определения места повреждения.

Этот эффект достигается тем, что в автономном устройстве для определения места повреждения кабеля дополнительно устанавливают блок измерения и преобразования расстояния БИПР, , содержащий передающую антенну Ап 65 (рисунок 4) и кнопки дистанционного управления «Старт», «Стоп», «Пуск», а в блок автономного управления БАУ 25 дополнительно устанавливают выключатель «Питание» с контактами К1, К2, К3, К4, приемно-преобразующее устройство ППУ с приемной антенной Апр 65 и устройство сравнения УС, а электропривод ведущих колес 35 дополнительно содержит датчик пройденного расстояния ДПР 67, при этом вход блока измерения и преобразования расстояния БИПР выполняют с возможностью подключения к выходу импульсного измерителя ИИ 40, его выход подключают к передающей антенне Ап 65.

Список литературы:

1. Пат. 2650081 RU, 10.01.2017. Устройство для определения места повреждения кабеля / Я.М. Кашин, Г.А. Кириллов, А.Б. Варенов // Опубл. 06.04.2018. Бюл № 10.

2. Пат. 2698939 RU, 04.12.2018. Устройство для определения места повреждения кабеля / Я.М. Кашин, Г.А. Кириллов, А.А. Шаршак // Опубл. 02.09.2019. Бюл № 25.

3. Пат. 2730384 RU, 29.10.2019. Автономное устройство для определения места повреждения кабеля / Я.М. Кашин, Г.А. Кириллов, А.Е. Селин // Опубл. 21.08.2020. Бюл № 24.

4. Пат. 2777879 RU, 16.07.2021. Автономное устройство для определения места повреждения кабеля / Я.М. Кашин, Г.А. Кириллов, А.А. Шаршак // Опубл. 11.08.2022. Бюл № 23.

УДК 621.65

ИМПУЛЬСНО-РАДИАЦИОННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Кашин Я.М.
Кубанский государственный технологический университет
канд. техн. наук, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин,
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
профессор кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования
yakovkashin@yandex.ru

Тулиев К.А.
Кубанский государственный технологический университет
магистрант 2 курса факультета нефти, газа и энергетики

Вах П.И.
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова
преподаватель кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования

Аджигириев А.М.
Кубанский государственный технологический университет
студент 1 курса кафедры электротехники и электрических машин факультета нефти, газа и энергетики

Аннотация. В статье описан способ определения места повреждения кабеля, осуществляемый путем создания искусственной неоднородности волнового сопротивления движущимся контролируемым источником радиоактивного излучения в зоне повреждения кабеля, определенной с помощью метода импульсной рефлектометрии, и просмотром кабельной линии импульсным измерителем отражений от волновой неоднородности, созданной повреждением кабеля в месте повреждения и искусственно созданной неоднородности [1, 2].

Ключевые слова: диагностика кабельных линий электропередач, импульсно-радиационный метод диагностики.

Для определения мест повреждения в кабельных линиях электропередачи сотрудниками кафедры электротехники и электрических машин КубГТУ разработан способ определения места повреждения кабеля, осуществляемый путем создания искусственной неоднородности волнового сопротивления движущимся контролируемым источником радиоактивного излучения в зоне повреждения кабеля, определенной с помощью метода импульсной рефлектометрии, и просмотром кабельной линии импульсным измерителем отражений от волновой неоднородности, созданной повреждением кабеля в месте повреждения и искусственно созданной неоднородности [1, 2]. В момент совмещения этих отражений на экране измерителя источник радиоактивного излучения будет находиться точно над местом повреждения на трассе кабеля (рисунок 1) [3].

На рисунке 1 обозначены: ИИ – импульсный измеритель, кабель, МП – фактическое место повреждения кабеля, СК – свинцовый контейнер, СЗ-свинцовый затвор, ИРИ – источник радиоактивного излучения, ИСН 1-3 – искусственные созданная неоднородности волнового сопротивления в изоляции кабеля, радиотелефоны.

$L_1^{'}$ – расстояние до первой искусственно созданной волновой неоднородности (соответствует положению СК до МП);

$L_2^{'}$ – расстояние до места повреждения неоднородности (соответствует топографическому положению СК над МП);

$L_3^{'}$ – расстояние до третьей искусственно созданной волновой неоднородности (соответствует положению СК после МП);

$L^{'}$ – общая длина повреждённого кабеля от выходного разъёма рефлектометра до конца подключаемых жил.

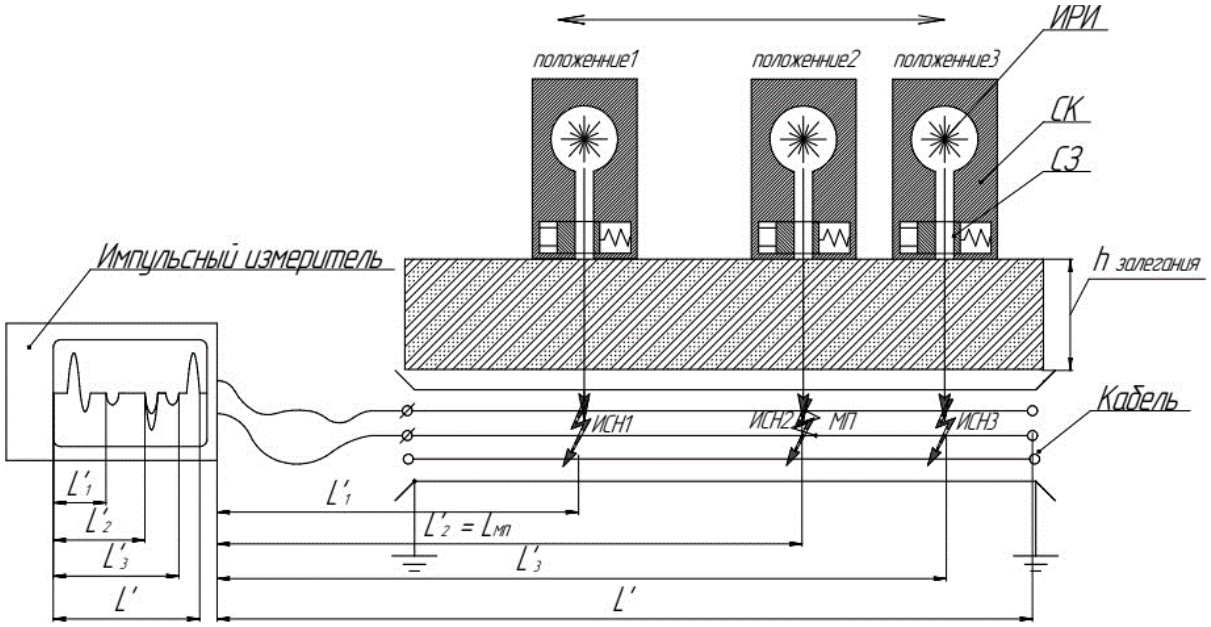


Рисунок 1 – Функциональная схема определения места повреждения кабеля

Обоснуем принцип действия устройства для определения места повреждения кабеля импульсно-радиационным методом.

Известно, что при воздействии на изоляцию радиоактивного излучения в ней возникают как обратимые, так и необратимые изменения. К таким изменениям относятся изменение проводимости изоляции *G*, диэлектрических потерь *tgδ*, диэлектрической проницаемости *ε*, а также изменение емкости *C* в месте воздействия излучения. В качестве радиоактивного излучения учитывается *γ* – излучение.[3]

При воздействии на изоляцию кабеля радиоактивного излучения сопротивление изоляции уменьшается в 10^2–10^4 раз при поглощенной дозе 10^{-1}–10^{-4} Гр, в 10^3–10^4 раз при дозах облучения 10^6–10^8 эрг/ч, в 10–10^6 раз при дозе облучения 10^4–10^6 рад [2, 4, 5].

В качестве импульсных измерителей можно рекомендовать отечественные измерители типа Р5-13 [6], Рейс-205 [7], Рейс-305 [8], РИ-307 [9], TDR-109 [10], РИФ-7 [11] и зарубежные FEROLUX, CAF-eta и KABELUX.

При определении мощности источника радиоактивного излучения должно приниматься во внимание, ослабляющее действие грунта (толщина слоя 700–1250 мм), брони кабеля (толщина лент брони 1–1,5 мм) и оболочки кабеля (толщина 1,5–2 мм) через коэффициент ослабления каждым слоем по формуле:

$$D_\gamma = \frac{D_{0\gamma}}{2^{\frac{l}{d_\gamma}}}, \quad (1)$$

где $D_{0\gamma}$ – поглощенная доза излучения, при которой происходит возникновение волновой неоднородности, Гр; l – толщина слоя ослабления, см; d_γ – слой половинного ослабления, см.

Так, для грунта с плотностью 1,6 г/см^3 – d_γ = 13 см, брони с плотностью 7,8 г/см^3 – d_γ = 3,5 см, свинцовой оболочки с плотностью 11,3 г/см^3 – d_γ = 2 см.

Для изменения сопротивления изоляции в 10^2–10^4 раз, что вполне достаточно для создания неоднородности в изоляции кабеля, необходимо иметь источник, позволяющий получить поглощенную дозу излучения для различных марок кабеля в пределах 10^{-1}–10^{-4} Гр.

Такие дозы облучения не могут привести к необратимым процессам в изоляции.

Дозирование уровня радиации источника может производится при помощи специальных защитных задвижек, выполненных их материалов различной радиационной проницаемости в щелевом отверстии контейнера – носителя и регулированием времени экспозиции излучения источника радиоактивного излучения (ИРИ).

Величины амплитуды зондирующего импульса измерителей составляют 3–80 В, которые не могут привести к электрическому пробою изоляции кабеля.

Предложенный импульсно-радиационный метод диагностики кабельных линий, соединяет в себе достоинства относительного и абсолютного методов и при практическом его применении может оказать существенное влияние на практику поиска отказов и скорость диагностики кабельных линий электропередач в сторону значительного повышения их эффективности.

Список литературы:

1. Определение расстояния до места повреждения кабеля импульсными методами посредством создания искусственной неоднородности волнового сопротивления в физическом двойнике кабельной линии / Я.М. Кашин, А.А. Шаршак, С.П. Киселев [и др.] // Техносфера : материалы I Всеросс. научн. конф. с междунар. участием. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2024. – С. 36–39.
2. Кириллов Г.А., Кашин Я.М., Коперский Е.Я. Теория и практика определения мест повреждения в кабельных линиях электропередачи / под общ. ред. Г.А. Кириллова. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2025. – 361 с.
3. Кириллов Г.А., Шаршак А.А., Малеева А.В. Импульсно-радиационный метод определения места повреждения кабеля и устройство, его реализующее // Технические и технологические системы : материалы двенадцатой Международной научной конференции. – Краснодар : Издательский Дом – Ю, 2021. – С. 49–53..
4. Кириллов Г.А., Варфоломеев А.В. Методы определения мест повреждений в кабельных линиях электропередачи: учебное пособие. – Харьков : ХВВКИУРВ, 1980. – 129 с.
5. Кириллов Г.А. Импульсно-радиационный метод определения мест повреждения в кабельных ЛЭП // Межвуз. сб. научн. тр. – № 3. – Т. 1. – Краснодар : КВИ, 2002. – С. 196–200..
6. Измеритель неоднородностей линий Р5-13 (Р5-13/1) / Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М. : Машприборин-торг, 1987. – 163 с.
7. Измеритель ЦРО 200 / Инструкция по эксплуатации Ба2.815.007РЭ. – Умань : АО «Мегомметр», 2009. – 11 с.
8. Рефлектометр Рейс-205 / Техническое описание и инструкция по применению. – Брянск : Фирма «СТЭЛЛ», 2014.
9. Рефлектометр Рейс-305 / Техническое описание и инструкция по применению. – Брянск : Фирма «СТЭЛЛ», 2015.
10. Рефлектометр РИ-307 USBм / Техническое описание и инструкция по применению. – СПб. : ООО «ЭРСТЕД», 2015. 102 с.
11. Рефлектометр TDR-109 / Техническое описание и инструкция по применению. – СПб. : ООО «ЭРСТЕД», 2013.
12. Рефлектометр РИФ-7 / Техническое описание и инструкция по применению. – СПб. : ООО «ЭРСТЕД», 2016.

УДК 004.932

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРЕСА В ВИДЕОСИСТЕМЕ ОРНИТОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭРОПОРТОВ

Обухова Наталия Александровна
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
д-р техн. наук, профессор, декан факультета радиотехники и телекоммуникаций
natalia172419@yandex.ru

Мотыко Александр Александрович
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедра телевидения и видеотехники
motyko.alexandr@yandex.ru

Поздеев Александр Анатольевич
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедра телевидения и видеотехники
puches4@gmail.com

Аннотация. Предложен метод обнаружения малоразмерных и низкоконтрастных объектов интереса в видеоданных на основе детектора SSD-ADSAR с двухпоточным вниманием. Использование синтетически дополненной выборки сгенерированной с помощью Stable Diffusion XL с дообучением LoRA позволило устранить дисбаланс по сюжетам фонов и повысить устойчивость к малоразмерным и низкоконтрастным целям. Предложенная модель обеспечила mAP@0.5 = 0.806, что на 6.4 % выше, чем у прототипа, а mAP@0.5:0.95 = 0.431, что на 2.8 % выше. Итоговая метрика *F*1 при этом улучшилась на 4.8 %. Сравнение с промышленным детектором YOLO11n, который на аналогичных данных показал *F*1 = 0.33, mAP@0.5 = 0.346, подтверждает оправданность разработки адаптированной к малоразмерным объектам архитектуры.

Ключевые слова: автоматический захват, системы мониторинга, нейросетевые детекторы, малоразмерные объекты, синтетические данные.

Введение

Одной из наиболее важных задач для обеспечения безопасного функционирования аэропорта является обнаружение в его воздушном пространстве птиц, их сопровождение и последующее отпугивание.

Обнаружение птиц предполагает решение задачи детектирования достаточно малых по размеру объектов на сложном фоне.

В последние годы задачам автоматического обнаружения и сопровождения движущихся объектов в видеоряде уделяется большое внимание. Этому способствует появление высококачественных камер и аппаратуры с большой вычислительной мощностью. Новые возможности позволяют реализовать в реальном времени сложные методы обработки видеоданных [1–12], но задача обнаружения достаточно малых по размеру объектов на сложном фоне не решена полностью и остается актуальной.

В данной работе предлагается метод автоматического обнаружения объектов интереса (птиц) для оптоэлектронной системы орнитологического мониторинга в условиях глобального движения, неоднородного фона и окклюзии (перекрытия объекта интереса другими объектами или фрагментами фона). Система состоит из поворотной камеры и вычислителя, в составе которого имеется GPU на базе NVIDIA RTX 3090, обеспечиваю-

щее работу нейронных сетей. Оптическая схема системы спроектирована таким образом, чтобы проекция целевого объекта (птицы среднего размера: голубя, вороны) размером по наибольшей стороне 35 сантиметров на дистанции 1500 метров занимала на изображении 20 пикселей. Указанной дистанции достаточно, для нужд орнитологического мониторинга аэропортов (длина взлетно-посадочной полосы для международных аэропортов обычно составляет около 3000 метров, в то время как для обслуживания внутренних авиалиний достаточно взлетно-посадочных полос длиной около 1500 метров).

Автоматическое обнаружение объекта интереса

Для задачи детектирования малорамерных объектов в данной работе используется архитектура SSD-ADSAR [13] – модифицированная и доработанная с учётом специфики задачи. Модель обеспечивает устойчивость к изменениям фона при движении камеры, выявление слабоконтрастных и малоразмерных объектов. Схема предлагаемого решения представлена на рисунке 1. Ключевым элементом модели является модуль двухпоточного самовнимания ADSAR, который работает следующим образом. Пусть $X \in R^{H \times W \times D}$ – входное представление данных для блока ADSAR после свёрточных операций в блоке извлечения признаков (*H, W, D* – задают размерность входного тензора). Признаки преобразуются в запросы Q, ключи K и значения V:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{X}\mathbf{W}^{\mathbf{Q}}, \mathbf{K} = \mathbf{X}\mathbf{W}^{\mathbf{K}}, \mathbf{V} = \mathbf{X}\mathbf{W}^{\mathbf{V}},$$

где W^Q, Q^K, $W^V \in R^{DxD'}$ – матрицы преобразования.

Для выделения глобальной и локальной информации вводятся две маски M_l и M_g:

$$M_l(i,j) = \begin{cases} 0, если\ j \in N(i) \\ -\infty, иначе \end{cases},$$

$$M_g(i,j) = \begin{cases} 0, если\ j \notin N(i) \\ -\infty, если\ j \in N(i) \end{cases},$$

где $N(i)$ – окрестность фиксированного размера для каждого значения *i*. С учетом полученных масок рассчитывают веса внимания для потоков локальных и глобальных признаков:

$$\mathbf{A}_l = \mathrm{softmax}\left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^T}{\sqrt{D}} + \mathbf{M}_l\right),$$

$$\mathbf{A}_g = \mathrm{softmax}\left(\frac{\mathbf{Q}\mathbf{K}^T}{\sqrt{D}} + \mathbf{M}_g\right).$$

Отклики двух потоков вычисляются как

$$\mathbf{R}_l = \mathbf{A}_l\mathbf{V},$$

$$\mathbf{R}_g = \mathbf{A}_g\mathbf{V},$$

а их разность

$$\mathbf{Res} = \mathbf{R}_l - \mathbf{R}_g$$

служит для усиления релевантных признаков малоразмерных объектов. Наконец, результирующее представление интегрируется с исходными признаками:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X} + \mathbf{Res} \cdot \mathbf{F},$$

где $F \in R^{DxD'}$ – обучаемая матрица проекции, возвращающая представление в исходное размерное пространство.

Благодаря такой архитектуре SSD-ADSAR демонстрирует более высокие метрики *mAP* для малоразмерных объектов и лучшую точность локализации по сравнению с аналогичными решениями, такими как RetinaNet и YOLOv11.

Исследуемая модель на базе SSD-ADSAR при использовании механизма параллелизации (параллельная обработка фрагментов, на которые разрезается исходное изображение) при обработке кадров с разрешением 1920×1080 на вычислителе на базе NVIDIA RTX 3090 обеспечивает быстродействие более 40 кадров в секунду, что с системной точки зрения является вполне достаточным с учетом производительности камеры 30 кадров в секунду.

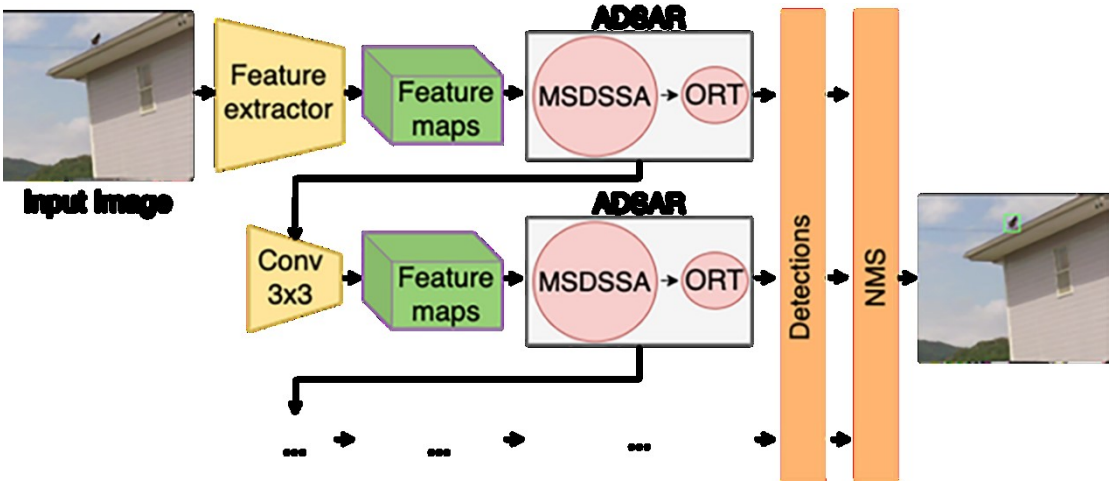


Рисунок 1 – Схема сверточной нейронной сети SSD-ADSAR

Видеоизображения, поступающие с камеры, имеют разрешение в соответствии со стандартом Full HD (1920×1080). При этом обучение на полноразмерных изображениях оказалось нецелесообразным, поскольку приводит к избыточному потреблению памяти, снижению скорости обработки и значительному увеличению размера итоговой модели. Применение масштабирования изображений, как правило, используется для решения подобных проблем, однако в данном случае этот подход неприемлем, так как ведёт к утрате малоразмерных объектов интереса, что впоследствии существенно снижает способность модели к их детектированию.

Для обучения модели был использован набор изображений в объеме 10 000 снимков, полученных с различных устройств. Исходные изображения были предварительно нарезаны на фрагменты фиксированного размера 640×640 пикселей характерного для моделей на базе архитектуры SSD. В процессе создания фрагментов контролировалось недопущение частичного попадания объектов интереса в рамки одного фрагмента. Разметка использовалась в качестве ориентира: фрагменты формировались вокруг целевых объектов. В результате фрагментации объем данных увеличился до 23 061 изображения.

Для расширения репрезентативности обучающей выборки была проведена генерация синтетических данных. Синтетические изображения были получены с использованием модели Stable Diffusion XL [14], дообученной методом LoRA [15] с рангом 128 на ограниченном наборе реальных снимков птиц из исходного корпуса. Для численной оценки качества сгенерированных данных было рассчитано значение метрики FID (Fréchet Inception Distance), которое оказалось равным 19.44, что соответствует хорошему, близкому к реалистичному качеству генерации.

Интеграция синтетических данных позволила компенсировать дисбаланс в данных и увеличить обобщающую способность модели. В итоге объём обучающего датасета составил 28 061 изображение.

Оценка модели производилась по метрике PR-кривая, которая учитывает как точность, так и полноту. Полученное значение площади под кривой составляет 0.83.

Экспериментальное исследование

Для количественной оценки эффективности работы детектора, а также сравнения с аналогами было проведено экспериментальное исследование. Эксперименталь-

ное исследование проводилось для двух детекторов: модели детектора, предложенного в [13], и модели детектора, представленного в данной работе, при обучении которого использовался обновленный датасет обогащенный синтетическими данными;

Оценка характеристик детекторов проводилась на наборе изображений с птицами, не использовавшемся на этапе обучения моделей. Примеры таких изображений показаны на рисунке 2.

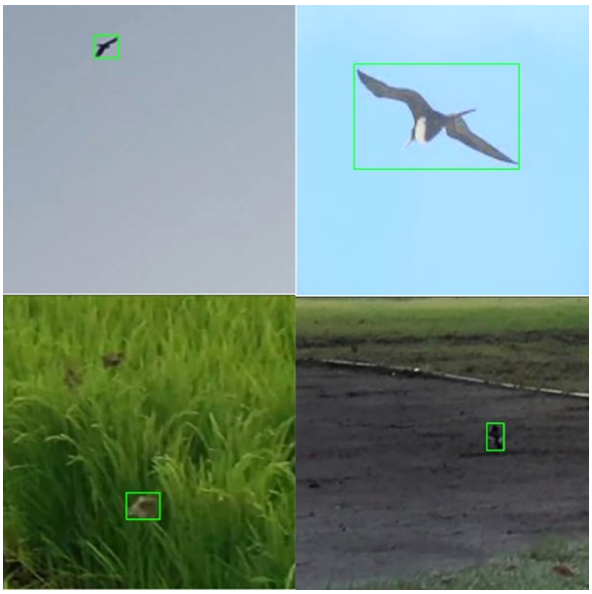


Рисунок 2 – Примеры изображений из тестового набора

В ходе экспериментов для всех изображений проводилось автоматическое определение положения объекта. Точность моделей оценивалась с использованием стандартных метрик: точности, полноты, мере *F*1, а также mAP@0.5 и mAP@0.5:0.95.

Следует отметить, что указанные точностные характеристики рассчитаны для объектов в обучающей выборке с максимальным линейным размером проекций от 20 пикселей и выше, что соответствует целевым значениям для системы. В обучающей выборке доля таких объектов составила 87 %, доля объектов с максимальным линейным размером проекций от 10 до 20 пикселей – 9 %, от 5 до 10 пикселей (при минимальном размере 5x5) – 4 %. Для последних двух категорий объектов точностные характеристики не рассчитывались, они были добавлены для диверсификации выборки с целью отражения в данных того обстоятельства, что на практике в видеоряде системы будут встречаться в том числе объекты с размерами проекций меньшими, чем целевые, которые в ряде случаев также могут быть успешно детектированы.

Результаты экспериментов показаны на рисунках 3, 4 и 5.

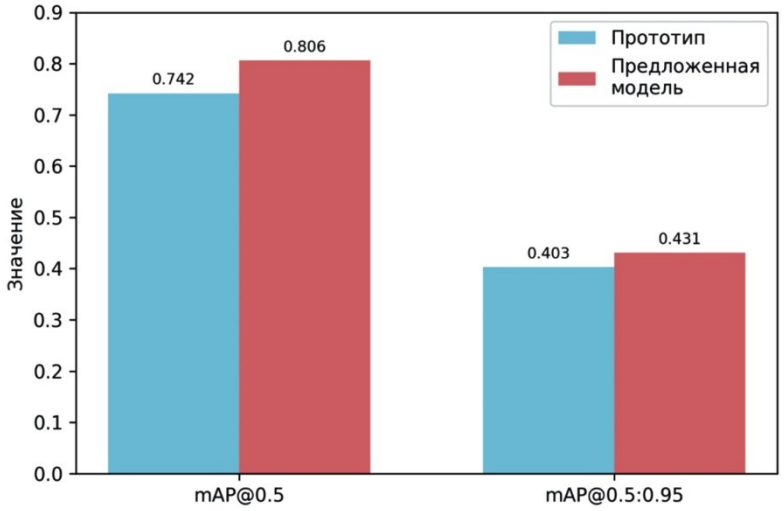


Рисунок 3 – Сравнение mAP между прототипом и предложенной моделью

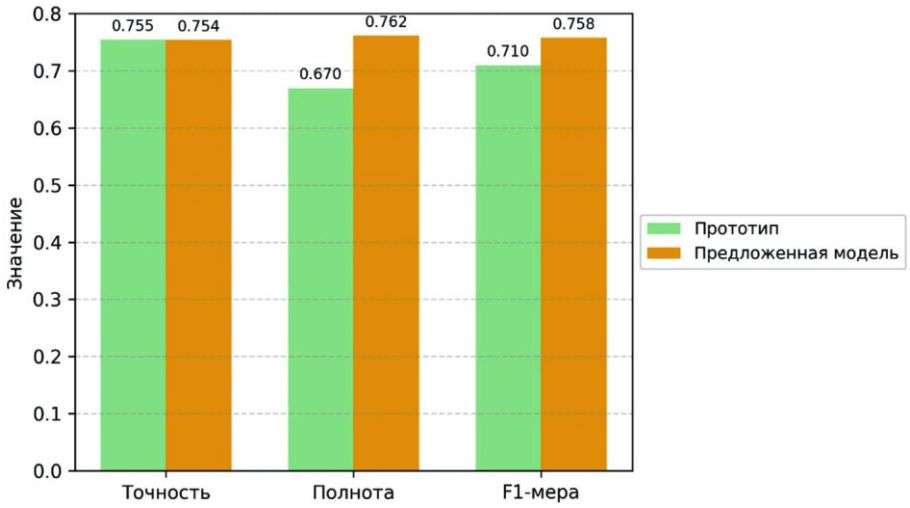


Рисунок 4 – Сравнение точности, полноты и F1-меры между прототипом и предложенной моделью

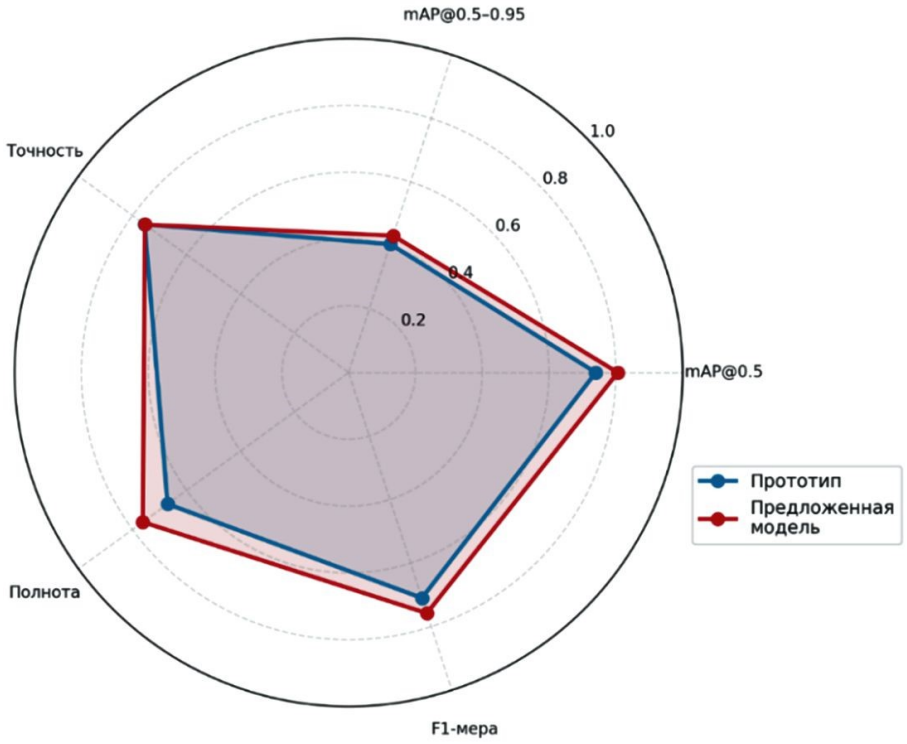


Рисунок 5 – Сравнение точности, полноты, mAP и F1-меры для прототипа и предложенной модели в виде радарной диаграммы

Предложенная модель детектора в сравнении с прототипом демонстрирует значительный рост оценки полноты на 9.2 %. Это привело к увеличению *F*1 на 4.8 %. Значение mAP увеличилось на 6.4 % и 2.8 % соответственно, что подтверждает лучшее обнаружение объекта новой моделью детектора. Несмотря на рост полноты, точность осталась практически неизменной – предложенная модель детектора пропускает меньше объектов без потери точности.

Дополнительно для оценки предложенного в рамках работы решения было проведено его сравнение с результатами стандартной предобученной Yolo11n на тех же валидационных данных. Выбор данной модели в качестве базового уровня для сравнительной оценки результатов обусловлен тем, что:

– YOLO11n является негласным промышленным стандартом для задач обнаружения, что позволяет объективно оценить сложность специализированной задачи, описанной в данной работе;

– модель изначально обучалась на общедоступных датасетах, включающих класс «птицы», но в других не специфичных для систем мониторинга условиях съемки.

Результаты Yolo11n на целевых данных составили: F1 = 0.33, mAP@0.5 = 0.346. Причины понятны – предобученная Yolo11n обучена на выборках и для решения задачи в условиях, характеризующихся совершенно другой спецификой. Данные результаты приведены, разумеется, не с целью критики известной архитектуры, а как подтверждение, что рассматриваемая задача обнаружения объектов интереса в системах мониторинга имеет выраженные особенности как в данных, так и в условиях съемки, которые приводят к тому, что воспользоваться при разработке подобных систем стандартными готовыми средствами невозможно.

Заключение

В работе представлен метод обнаружения объектов интереса, учитывающий особенности анализа видеоданных в системе орнитологической безопасности аэропортов.

Для обнаружения объектов интереса предложена сверточная архитектура SSD-ADSAR с модулем двухпоточного самовнимания. Добавлением в обучающую выборку синтетических изображений, сгенерированных с помощью Stable Diffusion XL с дообучением LoRA, удалось устранить дисбаланс в данных и повысить обобщающую способность модели. Предложенная модель обеспечила mAP@0.5 = 0.806, что на 6.4 % выше, чем у прототипа, а mAP@0.5:0.95 = 0.431, что на 2.8 % выше. Итоговая метрика *F*1 при этом улучшилась на 4.8 %. Сравнение с промышленным детектором YOLO11n, который на аналогичных данных показал *F*1 = 0.33, mAP@0.5 = 0.346, подтверждает оправданность разработки адаптированной к малоразмерным объектам архитектуры.

Список литературы:

1. SSD: Single Shot MultiBox Detector. In: *Computer Vision – ECCV 2016.* Lecture Notes in Computer Science / W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan [et al.] // Springer. – 2016. – Vol. 9905. – P. 21–37. – DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0_2

2. Microsoft COCO: Common objects in context. In: *Computer Vision – ECCV 2014.* Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8693 / T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie [et al.] // Springer. – 2014. – P. 740–755. – DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48

3. Tan M., Pang R., Le Q.V. EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection // In: Proceedings of CVPR. – 2020, Seattle. – P. 10778–10787. – DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01079

4. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y.M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors // In: Proceedings of CVPR. – 2023, Vancouver. – P. 7464–7475. – DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00721

5. End-to-End Object Detection with Transformers / N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve [et al.] // ArXiv e-prints. – Art. № arXiv: 2005.12872, 2020. – DOI: 10.48550/arXiv.2005.12872

6. Deformable DETR: Deformable transformers for end-to-end object detection / X. Zhu, W. Su, L. Lu [et al.] // Proceedings of the 9-th International Conference on Learning Representations (ICLR 2021). – 2021. – DOI: 10.48550/arXiv.2010.04159

7. Zhang H., Li F., Liu S. DINO: DETR with Improved DeNoisingAnchor Boxes for End-to-End Object Detection // *arXiv*, 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2203.03605

8. DiffusionDet: Diffusion model for object detection / S. Chen, P. Sun, Y. Song [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV 2023). – P. 19773–19786. – DOI: 10.48550/arXiv.2211.09788

9. Video Tiny-Object Detection Guided by the Spatial-Temporal Motion Information / Xin Yang, Gang Wang, Weiming Hu [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops. – 2023. – P. 3054–3063.

10. Dynamic Coarse-To-Fine Learning for Oriented Tiny Object Detection / Chang Xu, Jian Ding, Jinwang Wang [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2023. – P. 7318–7328.

11. A Real-time and Lightweight Method for Tiny Airborne Object Detection / Y. Lyu, Z. Liu, H. Li [et al.] // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition

Workshops (CVPRW), Vancouver, BC. – Canada, 2023. – P. 3016–3025. – DOI: 10.1109/CVPRW59228.2023.00303

12. Small object detection algorithm incorporating swin transformer for tea buds / Shi Meiling, Dongling Zheng, Tianhao Wu [et al.] // Plos one 19. – № 3 (2024). – P. e0299902.

13. ADSAR: Advanced Dual-Stream Attention and Reweighting for Small Object Detection / A. Samarin, A. Savelev, A. Toropov [et al.] // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2025. – Vol. 35. – P. 211–218. – URL : https://doi.org/10.1134/S1054661825700129

14. High-resolution image synthesis with latent diffusion models / R. Rombach, A. Blattmann, J. Müller [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2023). – P. 10674–10685. – DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01042

15. LoRA: Low-rank adaptation of large language models / J.E. Hu, Y. Shen, P. Wallis [et al.] // Proceedings of the 11-th International Conference on Learning Representations (ICLR 2022). – 2022. – P. 10674–10685. – DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01042

УДК 628.92

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДОСТУПОМ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА

Попрядухин Павел Игоревич

Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова
соискатель ученой степени кандидата технических наук,
начальник службы – помощник начальника штаба
popryadukhin985@mail.ru

Аннотация. В статье представлена системная методология проектирования энергоэффективных гибридных систем освещения, сочетающих трубчатые солнечные световоды и светодиодные источники. Методология включает семь последовательных этапов: анализ исходных условий, формирование требований, выбор компонентов, расчёт параметров, климатическая адаптация, моделирование и внедрение. Показано, что применение предложенного подхода позволяет снизить потребление электроэнергии на освещение на 40–60 % по сравнению с традиционными системами при обеспечении нормативных значений коэффициента естественной освещённости. Особое внимание уделено климатическим условиям Краснодарского края (г. Краснодар) и объектам специального назначения (заглублённым помещениям). Приведены расчётные соотношения, таблицы рекомендуемых компонентов и меры климатической адаптации.

Ключевые слова: гибридная система освещения, солнечный световод, коэффициент естественной освещённости, энергоэффективность, методология проектирования, заглублённые помещения, светодиодная досветка.

Введение

Современные нормативные документы в области строительства [1, 2] предъявляют жёсткие требования к энергоэффективности зданий, экологической безопасности и обеспечению комфортных условий освещения. Одним из перспективных решений для помещений с ограниченным или полностью отсутствующим доступом естественного света (в том числе заглублённых объектов) является применение гибридных систем, объединяющих трубчатые солнечные световоды и управляемые светодиодные источники.

Анализ существующих исследований [5–7] показывает, что эффективность таких систем существенно зависит от корректного учёта климатических, архитектурных и эксплуатационных факторов. Однако в отечественной практике отсутствует целостная методология, охватывающая весь жизненный цикл проектирования – от анализа исходных данных до эксплуатации.

В статье представлена и обоснована семиэтапная методология проектирования гибридных систем солнечного освещения, адаптированная к условиям южных регионов России (на примере Краснодарского края) и пригодная для объектов специального назначения.

Методология проектирования

Предложенная методология представляет собой последовательный алгоритм, состоящий из семи этапов (рисунок 1).

На этапе анализа исходных условий оцениваются географические (широта, долгота), климатические (инсоляция, облачность, температурный режим) и экологические (запылённость, уровень загрязнения воздуха) параметры места установки. Для Краснодарского края характерны: среднегодовая инсоляция около 4,02 кВт·ч/м², 220–240 солнечных дней в году, диапазон температур от –25 °С до +40 °С. Эти данные определяют потенциальную эффективность световодов и необходимость мер защиты от перегрева и ультрафиолетового излучения.



Рисунок 1 – Методология проектирования энергоэффективного освещения гибридной системы солнечного освещения

На втором этапе формируются требования к выбранной системе, которые подразделяются на три группы:

– архитектурно-планировочные (высота помещений не менее 2,7 м, предпочтительная прямоугольная конфигурация, нормируемая освещённость 150–500 лк в зависимости от назначения);

– энергетические (максимальное использование естественного света, снижение электропотребления не менее чем на 40–60 %, автоматическое регулирование LED-досвета);

– эксплуатационные (срок службы не менее 20 лет, устойчивость к УФ-излучению, перепадам температур и влажности, простота обслуживания).

При проектировании гибридных систем освещения немаловажную роль играет выбор ее компонентов, эффективных для эксплуатации в применяемом регионе страны. Основные элементы системы и рекомендуемые их типы для условий Краснодарского края приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые компоненты гибридной системы

Компонент	Функция	Рекомендуемый тип
Наружный купол	Захват прямого и рассеянного света	Фиксированный поликарбонатный с UV-стабилизацией
Световод	Транспортировка света	Алюминиевая труба с зеркальным покрытием (ρ ≥ 98 %)
Диффузор	Равномерное распределение	Призматический матовый поликарбонат (τ ≥ 80 %)
LED-модули	Компенсация дефицита света	4000–5000 К, CRI ≥ 80, с возможностью диммирования

Фиксированные купола, ориентированные на юг, использовать предпочтительнее систем слежения из-за существенно меньшей стоимости при незначительном (5–10 %) приросте эффективности.

На четвертом этапе расчет параметров выполняется в соответствии с положениями [1, 4].

Общее энергопотребление системы рассчитывается по формуле:

$$W = P_{\text{LED}} \cdot t_{\text{LED}} + P_{\text{aux}} \cdot t_{\text{aux}} , \quad (1)$$

где P_{LED} – установленная мощность светодиодного досвета; t_{LED} – время его работы; P_{aux} и t_{aux} – мощность и время работы вспомогательного оборудования.

Коэффициент естественной освещённости для помещений без окон:

$$e = e_{верх}, \quad (2)$$

где $e_{\text{верх}}$ – составляющая от верхнего освещения через световоды. Требуемое значение должно соответствовать нормативному КЕО для данной категории помещений.

Световой поток на выходе световода:

$$\Phi_{\text{вых}} = \Phi_{\text{вх}} \cdot \tau_{\text{общ}} . \quad (3)$$

Общий коэффициент пропускания:

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{купол}} \cdot \tau_{\text{дифф}} \cdot \rho^{n} \cdot k_{\text{изгиб}} . \quad (4)$$

Для типового световода диаметром 400 мм и длиной 10 м эффективность в ясный день составляет около 0,55–0,65.

На следующем этапе учитывается климатическая адаптация системы. Основные риски и способы их компенсации для Краснодарского края приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Меры климатической адаптации

Риск	Характеристика	Способ адаптации
Перегрев	Температура до +40 °C	Термостойкие материалы, UV-фильтры, вентиляция
УФ-деградация	Высокий уровень УФ	Стабилизированный поликарбонат
Загрязнение	Пыль, AQI 30–50	Гидрофобное покрытие, периодическая очистка
Конденсат	Перепады температур	Герметизация, антифог-покрытия

Теплоизоляция и подогрев куполов в условиях рассматриваемого региона не требуются.

На этапе моделирования и проверки состояния системы рекомендуется комплексное использование программных средств:

– расчёт инсоляции [4];
– моделирование освещённости (DIALux);
– оценка энергетического баланса (PVsyst);
– проверка КЕО (RUSKEO).

По результатам моделирования корректируются диаметр и количество световодов, устанавливаются регулируемые заслонки или изменяется тип диффузора.

Этап внедрения и эксплуатации системы включает:

– монтаж (южная ориентация куполов с углом 20–25°, минимизация изгибов световодов, герметизация);
– настройку автоматики (пороги срабатывания LED при снижении освещённости ниже 80 % от нормы);
– плановое обслуживание (очистка куполов 1–2 раза в год, проверка герметичности, замена LED-модулей по ресурсу 50 000 ч).

Заключение

В материалах статьи представлена семиэтапная методология проектирования гибридных систем солнечного освещения, обеспечивающая системный подход от анализа исходных условий до эксплуатации.

Ключевыми расчётными параметрами являются коэффициент естественной освещённости, общий коэффициент пропускания световода и энергопотребление светодиодного досвета.

Для условий Краснодарского края приоритетными являются меры защиты от перегрева и ультрафиолетового излучения.

Применение моделирования в DIALux, PVsyst и RUSKEO на стадии проектирования позволяет оптимизировать параметры системы и гарантировать достижение нормативных показателей.

Методология может быть применима для заглублённых и иных помещений специального назначения (защитных сооружений гражданской обороны) при соответствующей корректировке исходных данных.

Список литературы:

1. СП 367.1325800.2017 Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещенного освещения. – М. : Стандартинформ, 2017. – 78 с.
2. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. – М. : Минстрой России, 2017. – 136 с.
3. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. – М. : Стандартинформ, 2018. – 114 с.
4. СП 23-102-2003 Свод правил по проектированию и строительству. Естественное освещение жилых и общественных зданий. – М. : Госстрой России, 2003. – 83 с.
5. Kirpichnikova I.M., Volkova O.S., Maliugina A.A. Combined Lighting System Energy Efficiency Evaluation by the Light Flux Regulation // 2017 ICIEAM. IEEE.
6. Kirpichnikova I.M., Volkova O.S., Maliugina A.A. Using solar optical fibers for public buildings illumination in the South Urals // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 129. – P. 195–200.
7. Волкова О.С., Кирпичникова И.М. Повышение эффективности светопередачи солнечного световода на примере г. Челябинска // Энерго- и ресурсосбережение. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – С. 506–510.

УДК 614.835.3

ПРОБЛЕМА ЛОЖНЫХ СРАБАТЫВАНИЙ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ ПЛАМЕНИ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Рахматуллина Элина Фанисовна
Уфимский государственный нефтяной технический университет
старший преподаватель кафедры математики.
rahmatullina_elina@mail.ru

Питецкий Евгений Андреевич
Уфимский государственный нефтяной технический университет
evgeniypitetskiy07@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема ложных срабатываний извещателей пламени на объектах нефтегазового комплекса, которая приводит к значительным экономическим потерям из-за необоснованных остановок технологических процессов. Проведен анализ основных источников оптических помех: прямого и отраженного солнечного излучения, бликов от воды и снега, проведения сварочных работ, а также теплового излучения нагретого оборудования. Исследованы характеристики ультрафиолетовых, инфракрасных и комбинированных извещателей пламени. Обоснована необходимость применения мультисенсорных многодиапазонных ИК-извещателей (ИК3/ИК4) с алгоритмами микропроцессорной обработки спектров для повышения надежности систем противопожарной защиты. Предложена методика оценки вероятности ложного срабатывания.

Ключевые слова: извещатель пламени, ложное срабатывание, нефтегазовый комплекс, пожарная безопасность, оптические помехи, инфракрасное излучение, мультисенсорные системы, система противоаварийной защиты, технологический процесс.

Введение

Объекты нефтегазового комплекса (НГК), включая буровые установки, нефтеперерабатывающие заводы, резервуарные парки и компрессорные станции, относятся к категории объектов повышенной взрывопожароопасности. Наличие значительных объемов горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей требует применения высокоэффективных автоматических установок пожарной сигнализации (АУПС) [5]. Одним из основных элементов таких систем выступают извещатели пламени, способные обнаруживать возгорание на ранней стадии по электромагнитному излучению огня.

Однако специфика эксплуатации объектов НГК связана с присутствием мощных фоновых оптических помех. К ним относятся прямое солнечное излучение, блики от водной поверхности, снега и металлических конструкций, излучение факельных установок, а также засветка от дуговой сварки при проведении ремонтных работ. Воздействие данных факторов регулярно приводит к ложным срабатываниям (ЛС) извещателей пламени [8].

Ложное срабатывание системы противоаварийной защиты (ПАЗ) и автоматических установок пожаротушения (АУПТ) влечет за собой колоссальные экономические убытки. Остановка технологического процесса, стравливание газа на факел, расход дорогостоящего огнетушащего вещества и последующий перезапуск оборудования обходятся предприятиям в десятки миллионов рублей. Кроме того, частые ЛС приводят к «эффекту привыкания» у дежурного персонала, что снижает бдительность и может стать причиной игнорирования реального пожара. В связи с этим, задача минимизации ложных срабатываний извещателей пламени без снижения их чувствительности является крайне актуальной [1].

Обзор существующих методов обнаружения пламени

В современной практике противопожарной защиты применяются извещатели пламени, работающие в различных диапазонах электромагнитного спектра: ультрафи-

олетовом (УФ), инфракрасном (ИК) и видимом. Согласно ГОСТ Р 53325-2012, извещатель пламени должен реагировать на тестовые очаги пожара в течение заданного времени, однако стандарт не регламентирует жестко алгоритмы фильтрации помех [2].

Ультрафиолетовые извещатели обладают высокой чувствительностью к излучению пламени в диапазоне 185–260 нм (солнечно-слепая область). Их главное преимущество – высокое быстродействие (миллисекунды). Однако УФ-извещатели крайне подвержены ложным срабатываниям от дуговой сварки, коронных разрядов, рентгеновского излучения (при дефектоскопии сварных швов), а также молний. Кроме того, их чувствительность резко падает при замасливании или задымлении оптического окна, что часто встречается на объектах нефтедобычи [3].

Инфракрасные извещатели (ИК) анализируют излучение в диапазоне от 2 до 5 мкм. Наиболее эффективны приборы, настроенные на спектральный пик эмиссии углекислого газа (CO_2), образующегося при горении углеводородов, который находится в узкой полосе около 4,3–4,4 мкм. Проблема однодиапазонных ИК-сенсоров заключается в их реакции на модулированное тепловое излучение от нагретого оборудования (двигателей, турбин) и мерцающие солнечные блики, проходящие через лопасти вентиляторов [10].

Для повышения устойчивости к помехам были разработаны многодиапазонные инфракрасные извещатели (ИК2, ИК3, ИК4). Технология ИК3 (Triple IR) использует три сенсора: один настроен на пик горения углеводородов (4,3 мкм), а два других – на соседние фоновые участки спектра (например, 3,8 мкм и 5,0 мкм). Сравнивая интенсивность сигналов в этих каналах, микропроцессор извещателя способен точно отличить пламя от фоновых помех [9].

Методология исследования и результаты

В рамках данного исследования был проведен спектральный анализ оптических помех, характерных для открытых площадок нефтеперерабатывающего завода (НПЗ). На рисунке 1 представлены нормированные спектры излучения типичного углеводородного пламени, солнечного света и нагретого технологического оборудования.

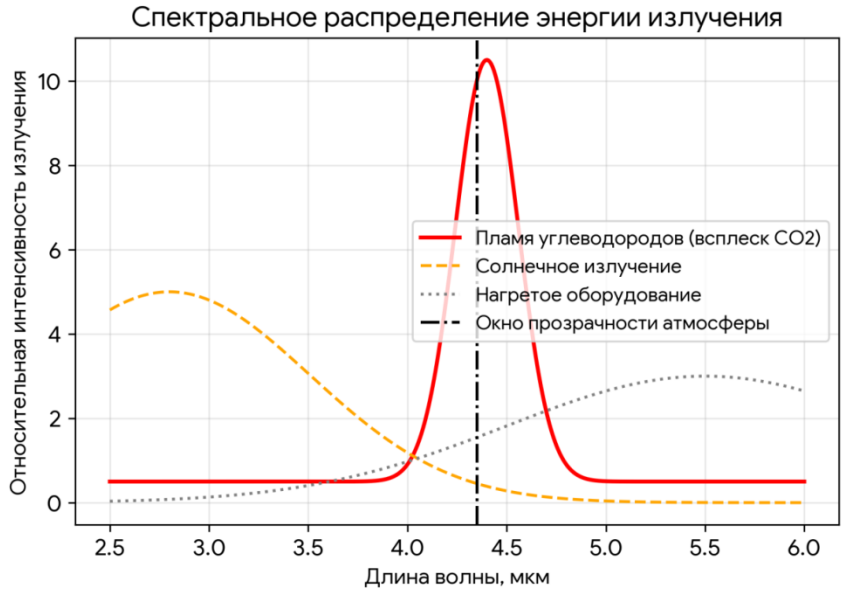


Рисунок 1 – Спектры излучения пламени и основных источников оптических помех

Как видно из рисунка 1, спектр горения углеводородов имеет ярко выраженный максимум в зоне 4,3 мкм, обусловленный резонансным излучением нагретых молекул углекислого газа. В то же время солнечное излучение и излучение абсолютно черного тела (имитирующее нагретое оборудование) имеют в этой области монотонный характер без резких пиков [7].

Для оценки эффективности различных типов извещателей была проанализирована статистика ложных срабатываний на 12 объектах переработки нефти за период 2021–2025 гг. Обобщенные результаты восприимчивости датчиков к типичным помехам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Восприимчивость извещателей пламени к источникам ложных срабатываний

Тип извещателя	Прямое солнце	Блики / отражения	Дуговая сварка	Нагретое оборудование
УФ (одноканальный)	Низкая	Низкая	Критическая	Отсутствует
ИК (одноканальный)	Средняя	Высокая	Низкая	Критическая
УФ/ИК (комбинированный)	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя
ИК3 (трехматричный)	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Низкая
ИК4 + видеомодуль	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Данные из таблицы 1 наглядно демонстрируют, что применение комбинированных (УФ/ИК) и особенно трехдиапазонных (ИК3) извещателей позволяет практически полностью исключить влияние базовых помех. Это достигается за счет сложной математической обработки поступающих сигналов [4].

Для формализации процесса принятия решения микропроцессором извещателя можно использовать вероятностную модель. В общем виде вероятность ложного срабатывания устройства можно описать следующим математическим выражением, которое программируется в логическом контроллере (формула 1):

$$P_{ls} = 1 - \mathcal{E}(-(S_{signal} / S_{noise}) \times \Delta t) , \quad (1)$$

где P_{ls} – вероятность ложной тревоги; S_{signal} – интегральная мощность сигнала в полезном диапазоне (4,3 мкм); S_{noise} – суммарная мощность сигнала в опорных фоновых диапазонах; Δt – время интегрирования сигнала (задержка срабатывания); $\mathcal{E}$ – постоянная Эйлера.

Обсуждение результатов

Внедрение извещателей типа ИК3 и ИК4 требует значительных начальных капиталовложений по сравнению с традиционными УФ-сенсорами. Однако технико-экономический анализ показывает, что срок окупаемости современных устройств на крупном НПЗ составляет от 6 до 12 месяцев исключительно за счет предотвращения остановок производства и экономии на сбросах газа в факельную систему.

Дополнительным перспективным направлением является интеграция извещателей пламени с системами промышленного технологического видеонаблюдения (CCTV) и алгоритмами компьютерного зрения. Видеомодуль позволяет оператору визуально подтвердить наличие возгорания до того, как система ПАЗ запустит алгоритм пожаротушения [6].

Заключение

Проблема ложных срабатываний автоматических установок пожарной сигнализации на объектах нефтегазового комплекса может быть успешно решена за счет перехода на мультисенсорные технологии регистрации пламени. Оптимальным техническим решением для открытых технологических площадок является применение трехдиапазонных инфракрасных извещателей (ИК3). Применение данных приборов, наряду со строгим соблюдением регламентов технического обслуживания (регулярной очисткой оптики) и правильным пространственным размещением сенсоров, минимизирующим попадание прямых солнечных лучей, обеспечивает высокую надежность систем промышленной безопасности.

Список литературы:

1. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». – М. : Российская газета, 2008.

2. ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2014.

3. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2006.

4. Прогнозирование ложных срабатываний дымовых пожарных извещателей с помощью нейронной сети / И.Ф. Хафизов, Ф.Ш. Хафизов, Э.Ф. Рахматуллина [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2025. – № 3 (37). – С. 111–120.

5. Исследование ложных срабатываний автоматических установок пожарной сигнализации на объектах нефтегазового комплекса / И.Ф. Хафизов, Ф.Ш. Хафизов, Э.Ф. Рахматуллина [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 3(56). – С. 53–61.

6. Влияние концентрации дыма и ложных факторов на срабатывание автоматической пожарной сигнализации / Э.Ф. Рахматуллина, А.В. Пермяков, И.Ф. Хафизов [и др.] // Вестник СПб университета ГПС МЧС России. – 2025. – № 3. – С. 1–12.

7. Рахматуллина Э.Ф. Методика построения нейронной сети для прогнозирования ложных срабатываний дымовых извещателей системы пожарной сигнализации / Э.Ф. Рахматуллина, И.Ф. Хафизов, З.Х. Павлова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2026. – № 1 (77). – С.184–192.

8. Анализ ложных срабатываний систем пожарной сигнализации на объектах массового пребывания людей с 2021 по 2023 год / Э.Ф. Рахматуллина, А.В. Пермяков, И.Ф. Хафизов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33. – № 6. – С. 85–96.

9. Прогнозирование значений пожарного риска с помощью машинного обучения и анализа временных рядов / Э.Ф. Рахматуллина, А.В. Пермяков, И.Ф. Хафизов [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2024. – № 5. – С. 6–20.

10. Экоинжиниринг и техносферная безопасность при транспортировке нефти : учебное пособие / Р.Г. Шарафиев, Ф.Ш. Хафизов, Н.Я. Багаутдинов [и др.]. – Уфа, 2024. – 288 с.

11. Аглямова Я.Н. Программные продукты для отработки ложных срабатываний пожарной сигнализации / Я.Н. Аглямова, Э.Ф. Рахматуллина // Актуальные проблемы и тенденции развития современной экономики и информатики. Материалы Международной научно-практической конференции. Бирск. – 2024. – С. 39–41.

12. Рахматуллина Э.Ф. Интеллектуальные алгоритмы в извещателях и системах пожарной сигнализации / Э.Ф. Рахматуллина, А.И. Аюпова // Актуальные проблемы и тенденции развития современной экономики и информатики. Материалы Международной научно-практической конференции. Бирск. – 2024. – С. 76–79.

13. Пиреева В.С. Влияние концентрации дымовых частиц на обнаружение возгорания / В.С. Пиреева, Э.Ф. Рахматуллина, А.В. Пермяков // Технические и технологические системы : материалы XV Международной научной конференции «ТТС-24» (20–22 ноября 2024 г.). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2024. – С. 150–152.

14. Рахматуллина Э.Ф. Исследование ложных срабатываний автоматических установок пожарной сигнализации на объектах с массовым пребыванием людей / Э.Ф. Рахматуллина, А.В. Пермяков // 75-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2024. – С. 82.

15. Хафизова А.А. Потенциал искусственного интеллекта (ИИ) в прогнозировании ложных срабатываний пожарной сигнализации / А.А. Хафизова, Э.Ф. Рахматуллина // : материалы XV Международной научной конференции «ТТС-24» (20–22 ноября 2024 г.). – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2024. – С. 160–161.

16. Масагутов Д.М. Искусственный интеллект в пожарной безопасности / Д.М. Масагутов, А.Л. Мухаметзянов, Э.Ф. Рахматуллина // Научный форум: Инновационная наука LXXIX международной научно-практической конференции. – Москва, 2024. – С. 5–10.

17. Масагутов Д.М. Нейросетевые методы обработки сигналов пожарных извещателей / Д.М., Масагутов, А.Л. Мухаметзянов, Э.Ф. Рахматуллина // Конференция «Искусственный интеллект: научные достижения и прикладные задачи». – Ханты-Мансийск, 2025. – С. 188–190.

УДК 004.932

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Савич Екатерина Константиновна
Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении
savich.ek@ssau.ru

Кленовский Сергей Александрович
Самарский национальный исследовательский университет им. Академика С.П. Королева
аспирант кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении.
klenovskii41@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается автоматизированная система метрологического контроля аналоговых средств измерений, используемых в авиационной отрасли, при помощи машинного зрения. Был проведен анализ существующего процесса метрологического контроля, FMEA-анализ потенциальных отказов. Разработана и предложена модульная система построения архитектуры комплекса. Разработаны программа и методика испытаний поверочного комплекса.

Ключевые слова: метрологический контроль, аналоговые средства измерений, машинное зрение, автоматизированный комплекс, преобразование Хафа.

Цифровая трансформация промышленности затрагивает метрологическое обеспечение. В настоящее время приоритетными направлениями развития в области метрологического обеспечения остаются модернизация эталонной базы, достижение цифровой зрелости метрологических процессов и повышение уровня единства измерений. Автоматизация поверочных процедур рассматривается как необходимое условие для достижения необходимого уровня цифровизации [1].

Объектом исследования выступает процесс метрологического контроля аналоговых средств измерений в авиационной отрасли. В авиационной отрасли требования к метрологическому контролю наиболее жесткие. Федеральный закон № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» относит безопасность полетов к сфере государственного регулирования. Цель работы заключается в разработке автоматизированной системы поверки стрелочных средств измерений на основе технологий машинного зрения, обеспечивающей устранение отказов существующего процесса.

Метрологический контроль средств измерений состоит из нескольких этапов. На каждом задействованы различные ресурсы. Высокая сложность и взаимосвязанность элементов обуславливают наличие потенциальных отказов, способных привести к искажению результатов измерений, срыву производственных сроков и дополнительным финансовым потерям.

Для выявления потенциальных отказов был применен FMEA-анализ полного цикла метрологического контроля. Анализ позволил идентифицировать возможные виды отказов на каждом этапе процесса, оценить их потенциальные последствия, вероятность возникновения и обнаружения.

Одним из наиболее значимых отказов процесса является неверный метод снятия показаний. К причинам его возникновения относятся параллакс, особенности зрения оператора, усталость и неравномерное освещение [2]. Выявленные причины определили необходимость автоматизации этапа считывания показаний аналоговых средств измерений.

Проектирование автоматизированной системы требует перехода от специализированных решений, ориентированных на конкретный вид приборов, к универсальной модульной архитектуре. Аппаратный уровень системы строится как совокупность функционально независимых подсистем, каждая из которых может быть заменена или модернизирована без нарушения работоспособности остальных [3–5].

Подсистема захвата изображений идентифицирует шкалу и первоначальное положение стрелки поверяемого прибора. Дальше она оценивает угловое соотноше-

ние положения стрелки и определяет значение, которое показывает средство измерений. Цифровая камера является центральным элементом подсистемы. Предпочтительной является монохромная матрица, поскольку она обеспечивает более высокую контрастную чувствительность и не вносит артефактов цветовой фильтрации. Объектив камеры подбирается исходя из размера шкалы и дистанции съемки .

Камера должна быть крепко закреплена на штативе, дополненным механизмом фиксации корпуса поверяемого прибора. Конструкция должна обеспечивать однозначное взаимное расположение камеры и прибора, и исключать смещение в процессе измерений. Обязательно на месте крепления должны быть установлены метки, соответствующие заранее откалиброванным положениям для стандартных диаметров корпусов. Контроль параллакса осуществляется с помощью лазерного указателя, жестко связанного с корпусом камеры либо при помощи программного функционала.

Для определения положения стрелки используется преобразование Хафа. Для корректной работы преобразования Хафа необходима дополнительная подготовка изображения. Используется алгоритм Кэнни, состоящий из размытия изображения фильтром Гаусса.

После обработки изображения выполняется определение геометрических параметров прибора и углового положения стрелки. Для обеспечения работы системы используются профили приборов, геометрическая и метрологическая калибровка. Модульная архитектура позволяет применять систему для различных типов стрелочных средств измерений.

Для проверки разработанного поверочного комплекса была разработана программа и методика испытаний. Испытания включают определение погрешности считывания показаний, проверку повторяемости и стабильности результатов, проверку устойчивости к изменениям внешних условий, проверку программного обеспечения и модуля формирования протоколов.

Проверка устойчивости к изменениям внешних условий выполняется путем измерений одного прибора в одной точке при трех уровнях освещенности: нормальном, пониженном и повышенном. Проверка влияния угла наклона камеры выполняется путем контролируемого наклона камеры на угол порядка 30° относительно нормали к плоскости шкалы. Также проводится верификация работы механизма контроля геометрической калибровки.

При проверке программного обеспечения оценивается работоспособность интеллектуального помощника, верность его предложений, помощи, выбора методик, описаний типа и руководств по эксплуатации. Проверка защиты от несанкционированного доступа включает тестирование механизма аутентификации пользователей и разграничения прав. Отдельно проверяется модуль формирования протоколов.

Заключение

В результате работы разработана модульная архитектура автоматизированной системы поверки стрелочных средств измерений на основе машинного зрения с использованием преобразования Хафа. Проведен FMEA-анализ процесса метрологического контроля, выявивший критические риски. Разработаны регламент внедрения и программа испытаний системы.

Список литературы:

1. Применение автоматизированных систем с целью повышения качества метрологического обеспечения средств измерений / М.Ю. Егоров, А.В. Антипина, Н.Б. Демидова [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 9. – С. 803–810.

2. Шляхов М.В. Анализ возможностей считывания показаний стрелочных приборов при помощи алгоритмов машинного зрения / М.В. Шляхов, Е.О. Петренко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2024. – № 4. – С. 84–90.

3. Горячкин Б.С. Компьютерное зрение / Б.С. Горячкин, М.А. Китов // E-SCIO. – 2020. – С. 317–345.

4. Ляшева М.М. Обнаружение и отслеживание объектов в компьютерном зрении // МНПК-2024. – 2024. – С. 38–40.

5. Кудров Т.Д. Алгоритмы компьютерного зрения, основанные на методах проективной геометрии / Т.Д. Кудров, П.С. Кушнер // Актуальные проблемы и перспективы развития потребительского рынка. – 2025. – С. 393–398.

УДК 519.6

СТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ

Терехов В.В.
Краснодарское высшее военное авиационное ордена Кутузова училище летчиков
канд. техн. наук, доцент
kvvaul@mil.ru

Выскубов Е.В.
Краснодарское высшее военное авиационное ордена Кутузова училище летчиков
канд. техн. наук,

Терехов В.В.
Кубанский государственный технологический университет
магистрант
mitya.ivanov.2015@gmail.com

Аннотация. В научной статье авторы рассматривают использование метода наименьших квадратов для получения статических моделей экспериментального устройства очистки жидкости на основе спирали Архимеда. Цель исследования: по экспериментальным данным определить коэффициенты a и b – минимизирующие функцию S, выражения вида: $S = \sum_{i=1}^{n}\left(\Delta p_i - g(f_i)\right)^2 \to min$. В ходе исследования по результатам решения систем уравнений получены математические модели статики системы очистки I и II ступени с регулированием. Проведённый анализ абсолютной и относительной погрешностей аппроксимирующих моделей показал наличие максимальных значений относительных погрешностей около 5 %, что подтверждает надёжность полученных статических моделей экспериментального устройства очистки и возможность их применения для управления объектом.

Ключевые слова: аппроксимация, метод наименьших квадратов, инерционное устройство очистки, экспериментальные данные, частота управления, дифференциальное давление

Введение

В последние годы тема разработки новых и технологичных устройств очистки (УО) привлекает значительное внимание специалистов, но для решения практических задач часто необходимо получить математическое описание работы устройства очистки в установившемся режиме. В таких случаях используют статические модели, которые помогают решить ряд задач:

– проектировать устройство – возможность рассчитать ключевые геометрические и технологические параметры для эффективной очистки частиц требуемого размера при заданном расходе жидкости;

– анализировать и оптимизировать работу УО, позволяет изучить различные факторы такие как: скорость потока, размер и плотность частиц, влияющие на технологический процесс очистки жидкости;

– прогнозировать работу УО в нестандартных ситуациях, модель можно адаптировать, добавив эмпирические коэффициенты для новых типов загрязнений или условий эксплуатации и использовать при симуляции работы УО при переменных параметрах.

Скорость потока, расход и частота управления двигателем – параметры, которые тесно связаны между собой и используются для управления технологическими процессами, чаще всего в системах очистки с насосным электроприводом. Например: для поддержания расхода воды в системе очистки – если расход жидкости падает, следовательно, необходимо увеличить частоту управления двигателем. Растёт частота, значит скорость вращения двигателя тоже растёт – в следствии этого скорость потока и расход жидкости увеличивается до нужного значения.

Рассмотрим работу экспериментального инерционного УО [1, 2]. На основе результатов экспериментальных данных получим аналитическую зависимость между входными и выходными величинами изучаемого объекта с целью дальнейшего исследования.

Для описания технологического процесса регулирования потока жидкости в основном канале инерционного УО системы очистки, запишем функцию:

$$\Delta p = g(f), \quad (1)$$

где Δp – дифференциальное давление; f – частота управления двигателем.

Выражение (1) показывает – как зависит дифференциальное давление от частоты управления двигателем.

Метод

Для определения вида функции g для $g(f)$ воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК) [3].

МНК – способ подобрать такую функцию $g(f)$, чтобы она с минимальной погрешностью аппроксимировала заданной аналитической зависимостью экспериментальные данные:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta p_i - g(f_i)\right)^2 \to min, \quad (2)$$

где Δp_i – значения выходной величины, характеризующие состояние объекта, полученные экспериментально; $g(f_i)$ – расчётные значения, найденные по аналитической модели в точках f_i; S – целевая функция; f_i – значения входной величины объекта [3].

Полученные экспериментальные данные имеют погрешности измерений, что делает актуальным применение метода аппроксимации для построения модели.

Используем аппроксимацию линейной моделью вида $g(f) = af + b$.

При проведении эксперимента в целях создания необходимого давления использовались две ступени насосов с регулируемой подачей. I–я ступень, работа насоса низкого давления (ННД) с регулированием частотным преобразователем (ПЧ). II–я ступень, работа насоса высокого давления (НВД) без регулирования и включался последовательно ННД с ПЧ.

Цель: по экспериментальным данным определить коэффициенты a и b – минимизирующие функцию $\boldsymbol{S}$, выражение (2) [4, 5].

При моделировании введём ограничение по входному воздействию:

$$f_{min} \le f \le f_{max}. \quad (3)$$

Для решения воспользуемся экспериментальными данными таблиц 1 и 2.

Таблица 1 – Экспериментальные данные регулирования I–й ступени

№ п/п	f, Гц	p_1, Па	p_2, Па	Δp, Па	Δp^*, Па	$\Delta_{\Delta p}$, Па	$\delta_{\Delta p}$, %
1.	20	4500	3900	600	210	390	1,85
2.	25	7965	4980	2 985	3042	57,9	0,275
3.	30	12030	6190	5 840	6583,95	743,95	3,53
4.	35	16880	7550	9 330	10125	795	3,77
5.	40	22100	9000	13 100	13666,05	566,05	2,69
6.	45	28200	10830	17 370	17207,1	162,9	0,773
7.	50	34300	12650	21 650	20748,15	901,85	4,28

Запишем линейную систему уравнений по экспериментальным данным Таблицы 1:

$$\left.\begin{array}{l} a \cdot 9275 + b \cdot 245 = 2\,976\,525 \\ a \cdot 245 + 7 \cdot b = 70875 \end{array}\right\}.$$

Решим систему уравнений методом подстановки – определим коэффициенты a и b: $a = 708{,}21$, $b = -14\,662{,}35$. Аппроксимирующая линейная модель для регулирования I –й ступени выражение (4):

$$\Delta p^* = 708{,}21 \cdot f - 14662{,}35. \quad (4)$$

Для оценки адекватности модели определим абсолютную $\Delta_{\Delta p} = |\Delta p^* - \Delta p|$ и относительную $\delta_{\Delta p} = \frac{\Delta_{\Delta p}}{(\Delta p_{max} - \Delta p_{min})}$ погрешности, результаты вычислений запишем в таблицу 1.

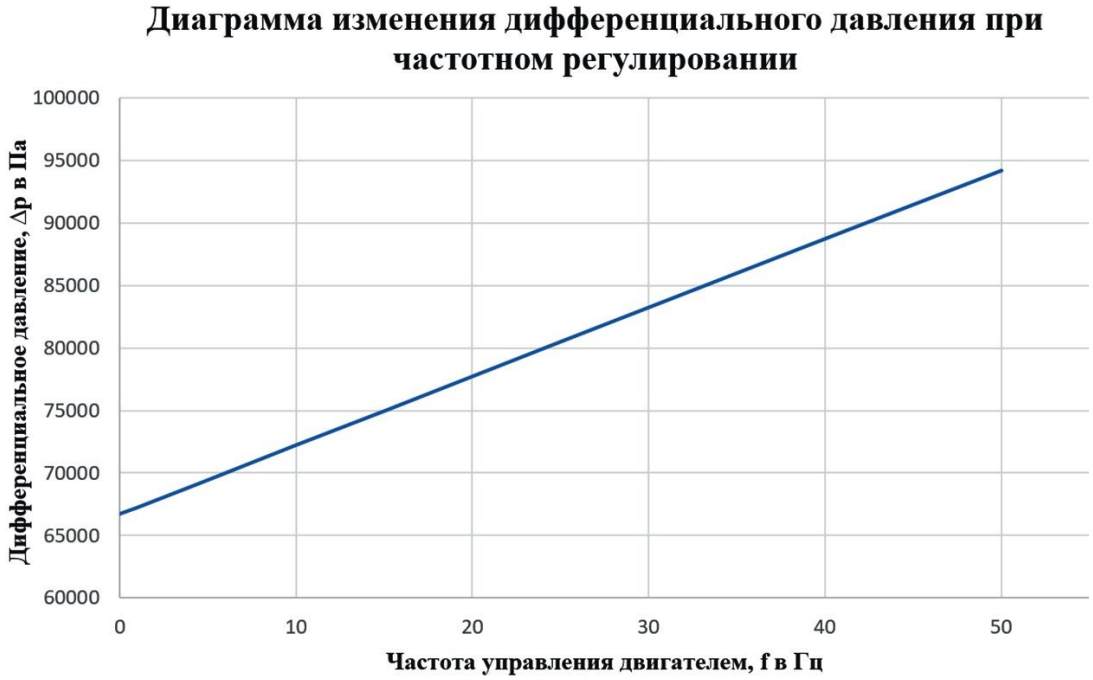


Рисунок 1 – Статическая модель инерционного УО при работе I-й ступени

Таблица 2 – Экспериментальные данные регулирования II-й ступени

№ п/п	f, Гц	p_1, Па	p_2, Па	Δp, Па	Δp^*, Па	$\Delta_{\Delta p}$, Па	$\delta_{\Delta p}$, %
1.	5	106650	36650	70 000	69454,64	545,36	2,216
2.	10	109650	37230	72 420	72207,94	212,06	0,86
3.	15	112950	37725	75 225	74961,24	263,76	1,071
4.	20	116080	38500	77 580	77714,55	134,54	0,546
5.	25	118300	39100	79 200	80467,85	1267,85	5,15
6.	30	122900	40300	82 600	83221,15	621,15	2,52
7.	35	127300	41290	86 010	85974,45	35,55	0,144
8.	40	131600	42390	89 210	88727,76	482,24	1,96
9.	45	134200	42610	91 590	91481,06	108,94	0,442
10.	50	138300	43690	94 610	94234,36	375,64	1,526

Запишем линейную систему уравнений по экспериментальным данным таблицы 2:

$$\left.\begin{array}{l} a \cdot 9625 + b \cdot 275 = 23\,642\,975 \\ a \cdot 275 + 10 \cdot b = 818\,445 \end{array}\right\} =>$$

Решим систему уравнений методом подстановки – определим коэффициенты a и b: $a = 550{,}66$, $b = 66701{,}33$. Аппроксимирующая линейная модель для регулирования II –й ступени выражение (5):

$$\Delta p^* = 550{,}66 \cdot f + 66701{,}33. \quad (5)$$

Для оценки адекватности модели определим абсолютную $\Delta_{\Delta p} = |\Delta p^* - \Delta p|$ и относительную $\delta_{\Delta p} = \frac{\Delta_{\Delta p}}{(\Delta p_{max} - \Delta p_{min})}$ погрешности, результаты вычислений запишем в Таблицу 2.

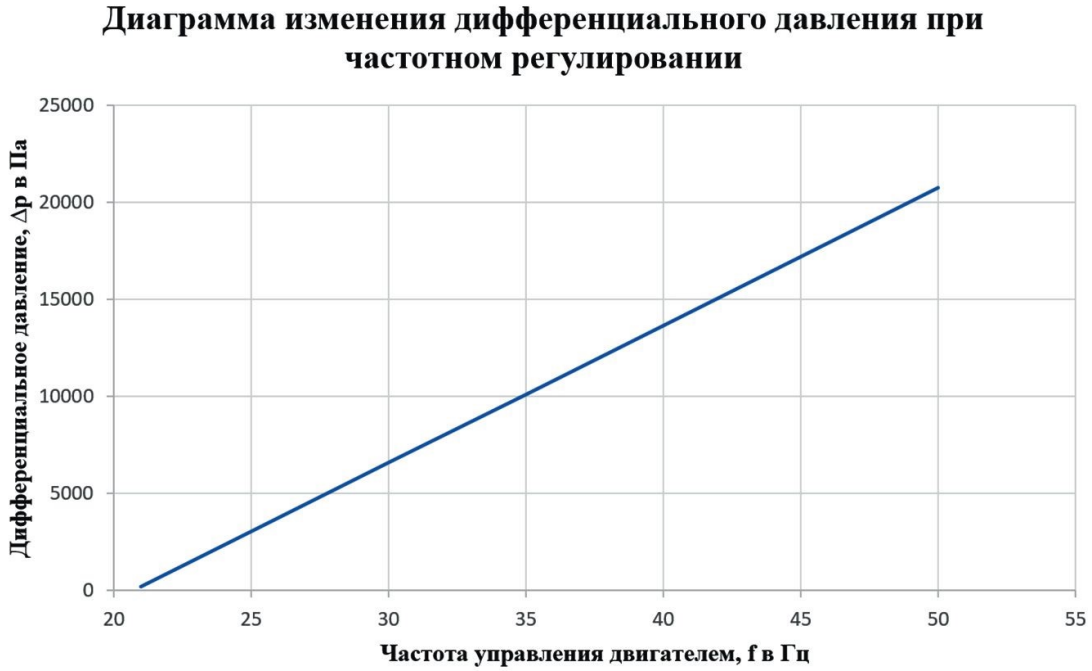


Рисунок 2 – Статическая модель инерционного УО при работе II–й ступени

Заключение

Таким образом, в ходе исследования по результатам решения систем уравнений получены математические модели статики системы очистки I и II ступени с регулированием. Определены коэффициенты линейной математической модели.

Для оценки адекватности моделей определены погрешности:

Таблица 1: $\Delta_{\Delta p\ \text{ср.}} = 516{,}8\ \text{Па}$, $\delta_{\Delta p\ \text{ср.}} = 2{,}45\ \%$, $\delta_{\Delta p\ max} = 4{,}28\ \%$, $\delta_{\Delta p\ min} = 0{,}275\ \%$.

Таблица 2: $\Delta_{\Delta p\ \text{ср.}} = 404{,}71\ \text{Па}$, $\delta_{\Delta p\ \text{ср.}} = 1{,}64\ \%$, $\delta_{\Delta p\ max} = 5{,}15\ \%$, $\delta_{\Delta p\ min} = 0{,}144\ \%$.

Проведённый анализ абсолютной и относительной погрешностей аппроксимирующих моделей, несмотря на чувствительность МНК к выбросам, искажающим результаты расчётов, показал наличие максимальных значений относительных погрешностей около 5 %, что подтверждает надёжность полученных статических моделей инерционного УО и возможность их применения для управления объектом.

Список литературы:

1. Терехов В.В. [и др.]. Устройство для очистки жидкости // Патент на полезную модель № 242865 от 15.04.2026 года.
2. Терехов В.В. [и др.]. Устройство для очистки горюче-смазочных материалов с прямолинейным одним входным и двумя выходными каналами // Патент на полезную модель № 227821 от 07.08.2024 года.
3. Коломиец Л.В., Поникарова Н.Ю. Метод наименьших квадратов: метод. указания / сост.: Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. – Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. – 32 с.
4. Иванов К.А. Автоматизированная система стабилизации потока органической фазы в каскаде экстракционных колон : дис. … канд. техн. наук: 25.13.06 / Иванов Константин Александрович. – Томск, 20218. – 133 с.
5. Комиссарчик В.Ф. Автоматическое регулирование технологических процессов: учебное пособие / Тверской государственный технический университет. – Тверь, 2001. – 247 с.

УДК 621.794.4

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК СУЛЬФИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ИОННОГО НАСЛАИВАНИЯ

Толкач Максим Дмитриевич
Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
инженер-технолог
maksimtolkac34@gmail.com

Богомазова Наталья Валентиновна
Белорусский государственный технологический университет
канд. хим. наук, доцент, доцент кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники
nbogom@belstu.by

Аннотация. Исследовано влияние гомогенных и коллоидных растворов-прекурсоров на толщину сульфидных пленок на примере широкозонного CdS, получаемых методом ионного наслаивания (SILAR). Продемонстрировано, что метод SILAR позволяет формировать в режиме ионного наслаивания пленки толщиной от 50 до 350 нм при использовании истинных растворов, а также покрытия толщиной более 2 мкм при использовании коллоидных растворов в режиме ионно-коллоидного наслаивания. Относительная скорость наслаивания варьировалась в диапазоне от 2,5 нм/цикл до около 20 нм/цикл. Установлено, что элементный состав пленок характеризуется типичным для сульфидных полупроводников стехеометричным недостатком халькогена на уровне около 10 ат. % .

Ключевые слова: Сульфидные полупроводники, стеклянная подложка, сульфид кадмия, ионное наслаивание, истинные растворы-прекурсоры, коллоидные растворы, толщина, элементный состав.

Современный этап развития полупроводниковой электроники характеризуется активным поиском вариантов более широкого применения альтернативных кремнию сложных полупроводников. Среди них достаточно широко исследуются халькогенидные полупроводники классов $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$ и другие. К таким материалам относят и сульфидные полупроводники, например, сульфид кадмия (CdS), сульфид цинка (ZnS), сульфид олова (SnS) и сульфид ртути (HgS). Сульфидные полупроводники в сравнении с пока еще преобладающим кремнием характеризуются более высоким значением ширины запрещенной от 2 до 3,7 эВ, прямозонной структурой энергетических зон, повышенной весовой плотностью от 4 до 7 г/см^3 и более низкой подвижностью электронов от 140 до 700 см^2/В·с (таблица 1) [1].

Таблица 1 – Физические параметры сульфидных полупроводников и Si

Полупроводник	Плотность, г/см^3	Структура энергетических зон	Ширина запрещённой зоны, эВ	Подвижность электронов, см^2/(В·с)
Si	2,33	непрямая	1,12	1500
ZnS	4,09	прямая	3,74	140
CdS	4,82	прямая	2,48	300
HgS	7,73	прямая	2,0	700

Среди сульфидных широкозонных полупроводников класса $A^{II}B^{VI}$ сульфид кадмия занимает промежуточное положение по подвижности электронов (300 см^2/(В·с)) и ширине запрещённой зоны (2,5 эВ). Последняя особенность позволяет использовать пленки CdS в различных оптоэлектронных приборах, например, для создания гибридного фотодетектора на пористом кремнии [2], а также в фотовольтаических структурах для солнечных элементов [3].

Требования к свойствам пленок CdS отличаются в зависимости от области применения. Одним из таких свойств является толщина функционального слоя. Актуальной задачей современных технологий полупроводниковых устройств является прецизионный контроль не только химического состава, но и структурно-геометрического состояния функциональных слоев в микро- или наноразмерном состоянии. Например, в фотовольтаических гетероструктурах толщина широкозонного слоя сульфида кадмия в составе многослойных широкозонных окон может составлять от 5 до 100 нм [2].

Для получения пленок CdS различной толщины используют как более сложные физические методы, например магнетронное напыление [4], так и более доступные жидкофазные химические методы, например электрохимическое осаждение [5], ионное наслаивание [6] и гидрохимическое осаждение [7].

Данная работа посвящена исследованию особенностей получения микро- и наноразмерных сульфидных пленок методом ионного наслаивания (SILAR) на примере сульфида кадмия.

Пленки CdS были получены на стеклянных подложках размером 78x26x1 мм при реальной площади наслаивания 20–30 см^2.

В проведенных опытах для получения сульфида кадмия использовалось два исходных истинных раствора-прекурсора: 0,05 М хлорид кадмия ($CdCl_2$) и 0,1 М сульфид натрия (Na_2S). Технологический маршрут формирования пленки состоял из предварительного этапа подготовки и активации подложек, а также проведения ионного наслаивания полупроводниковой пленки путем погружения подложки в растворы катионного и анионного прекурсоров с промежуточной промывкой в дистиллированной воде после каждого раствора. Время обработки в обоих растворах-прекурсорах составляло 40 с, а в промывке – 20 с.

В рассматриваемых опытах по ионному наслаиванию варьировалось только число циклов наслаивания от 20 до 100 циклов для получения пленок разной толщины. Для оценки толщины полученных пленок использовались гравиметрический метод, а также электронная сканирующая микроскопия сколов подложек.

В то время, как гравиметрия позволила оценить толщину субмикронных и микроразмерных пленок (рисунок 1, *а*), электронная микроскопия позволила оценить толщину всех полученных пленок (рисунок 1, *б*). Толщину пленок можно было оценить и визуально: пленка, полученная после 20 циклов наслаивания (рисунок 2, *а*) была едва заметной, а пленка, полученная после 100 циклов (рисунок 2, *б*), образовывала малопрозрачное покрытие характерного желтого цвета.

Резкое увеличение толщины (от 50 нм до 2 мкм) и удельного привеса (от около 1 мкм/см^2 до 120 мкм/см^2) пленки CdS при увеличении количества циклов наслаивания от 20 до 100 циклов наиболее вероятно обусловлено образованием коллоидных частиц сульфида кадмия в объеме катионного и анионного растворов-прекурсоров за счет взаимного загрязнения при многостадийном проведении процесса, что приводит к смене механизма наслаивания с ионного на ионно-коллоидный.

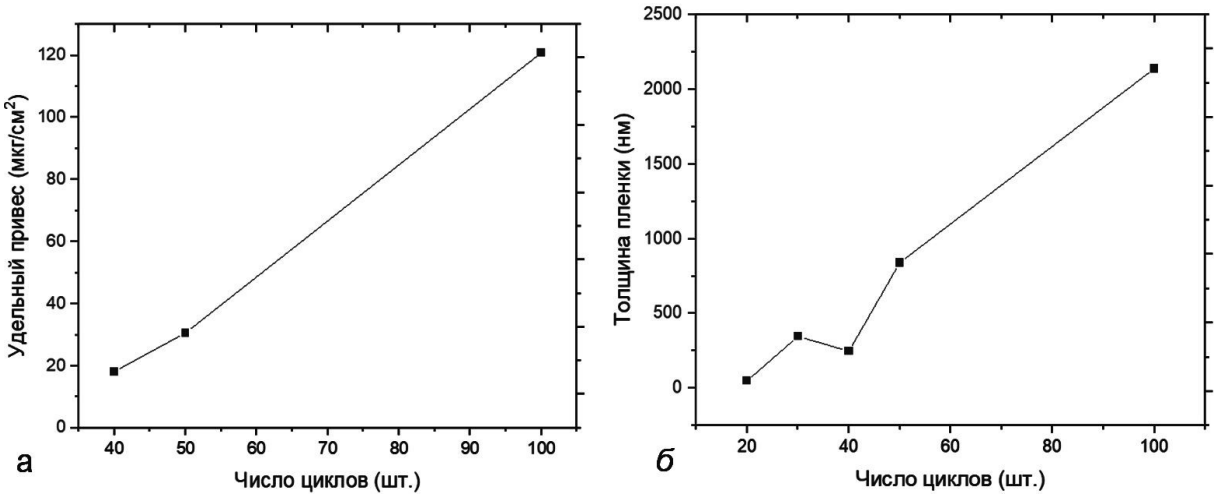


Рисунок 1 – Зависимости удельного привеса (а) и толщины пленки (б) от числа циклов наслаивания

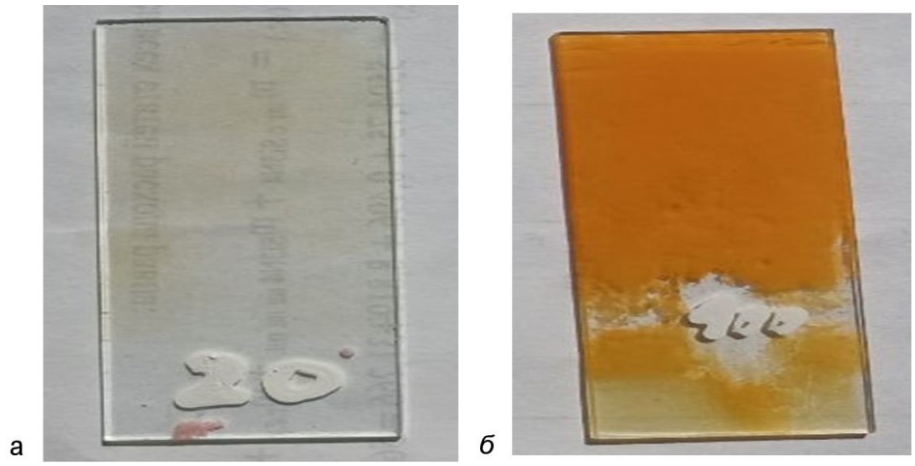


Рисунок 2 – Оптические изображения нано- (а) и микроразмерной (б) пленок CdS на стекле, полученных при 20 (а) и 100 (б) циклах

Для пленок, полученных с использованием коллоидных растворов (после 50 и 100 циклов наслаивания), были сняты EDX-спектры, которые позволили оценить элементный состав вышеуказанных объектов относительно элементного состава подложки (таблица 2). Атомное содержание элементов сульфидной пленки в анализируемом поверхностном слое подложки хорошо коррелирует с толщиной пленок и составляет для наиболее толстой пленок 40 ат. % кадмия и 36 ат. % серы. Стехиометрическое соотношение атомов кадмия к сере для двух пленок приблизительно одинаковое: стехиометрический недостаток серы составляет около 10 ат. %.

Таблица 2 – Элементный состав подложек CdS/стекло по основным компонентам

Обозначение образцов	Элементарный состав, ат. %	Cd : S
SILAR 50	Cd – 13,14 S – 11,34 O – 42,91 Si – 19,98	1 : 0,86
SILAR 100	Cd – 40,07 S – 35,86 O – 5,30 Si – 12,59	1 : 0,89

Таким образом, проведенные исследования показали, что для получения субмикронных или наноразмерных пленок необходимо предотвращать образование дисперсной фазы CdS в объемах растворов-прекурсоров, а для получения микроразмерных пленок, напротив, необходимо образование коллоидной фазы. Пленки, полученные методом ионного наслаивания, демонстрировали характерный для халькогенидов стехиометрический недостаток халькогена на уровне около 10 ат. %, что способствует генерации электронов проводимости с участием ионов кадмия. Относительная скорость наслаивания пленок CdS варьировалась в диапазоне от менее 1 нм/цикл до около 20 нм/цикл, что позволяет достаточно гибко управлять толщиной формируемых функциональных слоев.

Список литературы:

1. Сорокин В.С. Материалы и элементы электронной техники : в 2 т. Т. 1. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.С. Сорокин, Б.Л. Антилов, Н.П. Лазарева. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 448 с.

2. Mashsin R.H. Fabrication and characterization of efficient visible NIR CdS/porous Si/p-Si photodetectors via laser enhanced chemical bath deposition / R.H. Mashsin, H.A. Hadi, R.A. Ismail // RSC Advances. – 2026. – Vol. 16. – P. 3207–3219.

3. Electron transport layers in thin-film solar cells: Materials, interfaces, and device performance / M.K. Basher [et al.] // Journal of Power Source. – 2025. – Vol. 663. – P. 23882. – URL : https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238882.

4. Hao-Min W. Enhanced optical and electrical properties of CdS thin films with indium and oxygen co-doping by magnetron sputtering / W.Hao-Min, G. Xue, G. Guang-Rui // Thin Solid Films. – 2026. – Vol. 843. – P. 140942. – DOI: 10.1016/j.tsf.2026.140942.

5. Nashed G. Preparation and study of ZnO-doped CdS thin films using electrochemical deposition technique / G. Nashed, L. Alchab // Heliyon. – 2024. – Vol. 12. – Is. 9. – URI : https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2026.e44997.

6. Effect of Mn doping in CdS quantum dot sensitized solar cells grown by SILAR method / J. Srisomroop [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 47. – P. 3471–3475.

7. Green synthesis of CdS thin films using A. Indica extract: A theoretical and experimental investigation for potential photovoltaic applications / S. Soni [et al.] // Materials Chemisry and Physics:Sustainality and Energy. – 2025. – Vol. 6. – P. 100055. – DOI: 10.1016/j.macse.2025.100055.

УДК 621.313.333.1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Тутаев Геннадий Михайлович
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электроники и электротехники
tutaevgm@mail.ru

Безбородов Егор Сергеевич
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
аспирант кафедры электроники и электротехники
egor.bez-off@yandex.ru

Малинкина Юлия Игоревна
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва
студентка кафедры электроники и электротехники
malinkinau@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена обработка результатов температурных испытаний асинхронного двигателя с фазным ротором при различных частотах вращения. На примере двигателя МТН011-06 показано, какие результаты можно использовать для проверки стационарной тепловой модели, а какие характеризуют неустановившийся нагрев. Приведены условия сопоставления кривых нагрева и выбора контрольных точек.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, тепловое состояние, температурные испытания, кривая нагрева, тепловая модель.

Результаты температурных испытаний позволяют оценить нагрев двигателя и проверить его тепловую модель. При этом важно учитывать условия проведения и завершения каждого опыта. Если температура к концу испытания практически перестала изменяться, её можно использовать для оценки установившегося нагрева. Если двигатель отключили при продолжающемся росте температуры, последнее показание характеризует только состояние в момент отключения.

Для оценки теплового состояния асинхронных двигателей применяют модели различной степени детализации [1]. В двухмассовой модели обмотку статора рассматривают отдельно от остальных частей двигателя [2]. Более подробные эквивалентные тепловые схемы позволяют рассчитывать температуры отдельных элементов конструкции и сопоставлять их с результатами измерений [3].

При исследовании двигателя с вентилятором на валу необходимо учитывать изменение условий охлаждения. Конвективный теплообмен зависит от скорости охлаждающего воздуха [4]. Поэтому при уменьшении частоты вращения нагрев двигателя может увеличиваться даже при неизменном моменте нагрузки.

Цель работы – определить порядок обработки результатов температурных испытаний, позволяющий обоснованно сопоставлять режимы двигателя и выбирать данные для проверки тепловой модели.

Исследование выполнено на асинхронном двигателе с фазным ротором МТН011-06. Обмотка статора питалась от преобразователя частоты, обмотка ротора во время тепловых испытаний была замкнута накоротко. Испытания проводились при частотах вращения 860, 645, 430 и 215 об/мин и моментах нагрузки 7,5; 11,25 и 15 Н·м.

Температуру измеряли шестью термопарами, установленными в различных частях двигателя (рисунок 1). Запись результатов выполнялась с интервалом в одну минуту. Для оценки нагрева статора использовались, в частности, показания термопары 3 в области «паз–ярмо» и термопары 4 на сердечнике статора.

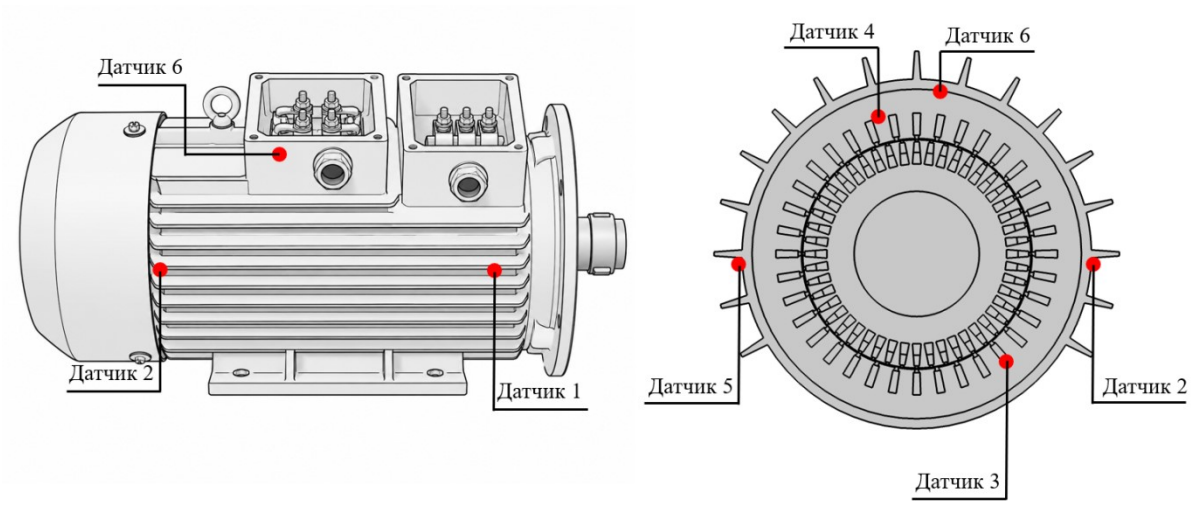


Рисунок 1 – Расположение контрольных точек измерения температуры на экспериментальном двигателе MTH011-06

Экспериментальные температурные зависимости используют как для проверки модели, так и для определения её тепловых параметров [5, 6]. При этом важны условия проведения испытаний и учёт факторов, влияющих на передачу теплоты между частями двигателя [7].

При подготовке результатов к обработке каждому измерительному каналу необходимо поставить в соответствие место установки термопары. Температуры корпуса, сердечника и обмоток характеризуют разные части двигателя, поэтому заменять один показатель другим нельзя. В расчётной модели температуру следует определять в точках, соответствующих расположению датчиков.

Для каждого опыта также сохраняют частоту вращения, момент нагрузки, начальные температуры, температуру окружающей среды, продолжительность испытания и причину его завершения. Эти сведения нужны для объяснения различий между кривыми нагрева.

При сравнении опытов начало отсчёта времени должно соответствовать одному и тому же событию. Например, им может быть установление заданной частоты вращения и нагрузки. Если продолжительность пуска различается, пусковой участок следует рассматривать отдельно.

Различия температуры окружающей среды учитывают с помощью превышения температуры: из температуры контрольной точки вычитают температуру окружающего воздуха. Однако такая обработка не устраняет различий начального теплового состояния двигателя. Поэтому при сравнении нагрева необходимо учитывать и начальные показания термопар.

На рисунке 2 представлены кривые нагрева при частотах вращения 860 и 215 об/мин. В таблице 1 приведены температуры при завершении испытаний для четырёх частот вращения. Момент нагрузки во всех рассматриваемых опытах составлял 15 Н·м.

При частотах вращения 860 и 645 об/мин в конце опытов наблюдались участки стабилизации показаний. Температуры на этих участках использовались как приближённые оценки установившихся значений в рассматриваемых контрольных точках. При уменьшении частоты вращения с 860 до 645 об/мин температура в области «паз–ярмо» увеличилась с 65,00 до 91,25 °С, а температура сердечника статора – с 64,25 до 88,75 °С.

Для определения температуры на участке стабилизации следует использовать несколько последовательных измерений. Одного совпадения соседних показаний недостаточно. Оценка должна учитывать продолжительность наблюдения, разрешение измерительной системы и сохраняющееся изменение температуры.

При частотах вращения 430 и 215 об/мин испытания прекращались для предотвращения перегрева. В момент отключения температура продолжала повышаться. Поэтому значения 110,75 и 113,25 °С нельзя считать установившимися температурами области «паз–ярмо».

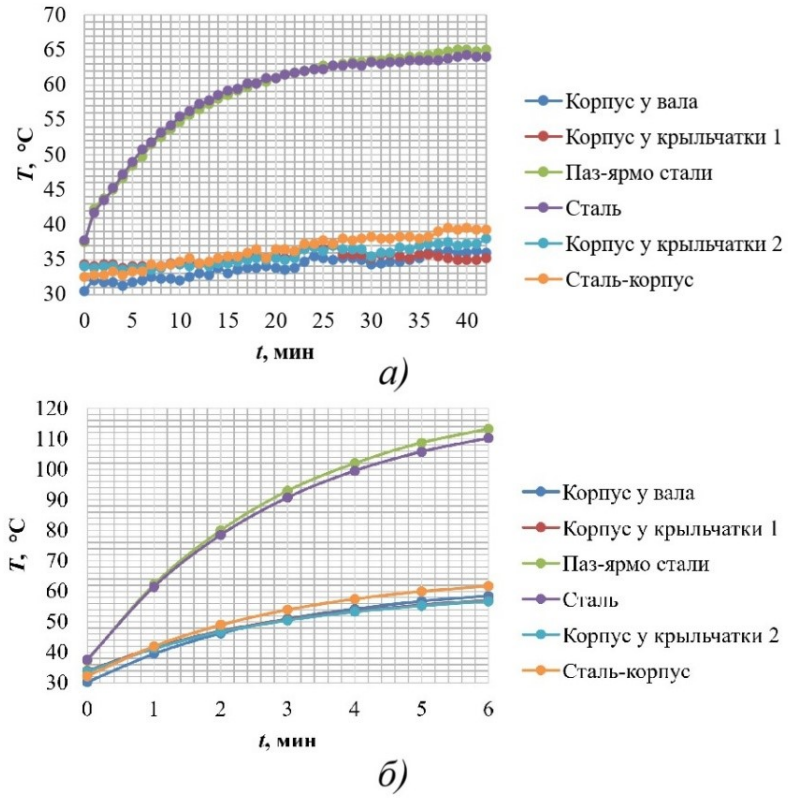


Рисунок 2 – Кривые нагрева двигателя при моменте нагрузки 15 Н·м: а) частота вращения 860 об/мин; б) частота вращения 215 об/мин.

Таблица 1 – Температуры двигателя MTH011-06 при завершении испытаний с моментом нагрузки 15 Н·м

Частота вращения, об/мин	Температура в области «паз–ярмо», °C	Температура сердечника статора, °C	Состояние к концу опыта
860	65,00	64,25	Наблюдалась стабилизация показаний
645	91,25	88,75	Наблюдалась стабилизация показаний
430	110,75	107,00	Нагрев продолжался; опыт прекращён через 10 мин
215	113,25	110,25	Нагрев продолжался; опыт прекращён через 6 мин

Сопоставление только последних показаний могло бы создать впечатление, что нагрев в этих двух режимах почти одинаков. Однако при 430 об/мин значение 110,75 °C зарегистрировано через 10 мин, а при 215 об/мин значение 113,25 °C – через 6 мин. Следовательно, конечные температуры необходимо рассматривать вместе с кривыми нагрева и продолжительностью опытов.

Вместе с тем время прекращения испытания не является временем достижения одного и того же температурного уровня. Для количественного сравнения продолжительности нагрева следует выбрать общую контрольную температуру, достигнутую в обоих опытах, и определить время её достижения при сопоставимых начальных условиях.

Другой показатель – средняя скорость нагрева на выбранном участке. Её определяют по изменению температуры за соответствующий промежуток времени. При сравнении опытов используют одинаковый способ выбора участков: общий интервал времени при близких начальных температурах либо общий диапазон превышения температуры. Усреднение за весь опыт при существенно различающейся продолжительности может затруднить сравнение.

Проверку тепловой модели проводят сопоставлением расчётных и измеренных температур [8]. Выбор экспериментальных данных зависит от вида расчёта. Со стационарным расчётом сопоставляют температуры, полученные после стабилизации показаний. В рассматриваемых испытаниях для этого использованы результаты при частотах вращения 860 и 645 об/мин и моменте нагрузки 15 Н·м.

Результаты досрочно прекращённых опытов характеризуют неустановившийся нагрев. Изменение температуры во времени рассматривается в моделях переходных тепловых процессов [9, 10]. Для сопоставления такого расчёта с экспериментом необходимо задать начальное тепловое состояние двигателя, условия нагрузки и охлаждения, а также продолжительность работы. Стационарный расчёт позволяет оценить предполагаемые установившиеся температуры, но не время их достижения.

Таким образом, обработка результатов испытаний должна учитывать не только измеренные температуры, но и условия завершения опыта. Участки стабилизации показаний используются для проверки стационарной тепловой модели. Кривые продолжающегося нагрева служат для оценки изменения температуры во времени и проверки нестационарного расчёта. Такое разделение позволяет избежать ошибочного сопоставления конечной температуры короткого опыта с установившейся температурой двигателя.

Список литературы:

1. Тутаев Г.М., Безбородов Е.С. Анализ возможности применения тепловых моделей асинхронных двигателей для оценки теплового состояния машины двойного питания // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2023. – Т. 23. – № 4. – С. 47–53. – DOI: 10.14529/power230405.

2. Метельков В.П. О расчете параметров двухмассовой термодинамической модели асинхронного двигателя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 58–65. – DOI: 10.14529/power160109.

3. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Математическая модель нагрева асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на основе эквивалентной тепловой схемы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22. – № 4. – С. 67–78. – DOI: 10.14529/power220408.

4. Staton D.A., Cavagnino A. Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – № 10. – P. 3509–3516. – DOI: 10.1109/TIE.2008.922604.

5. Inverse Thermal Identification of a Thermally Instrumented Induction Machine Using a Lumped-Parameter Thermal Model / Phuc P. Nguyen, H. Vansompel, D. Bozalakov [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13. – № 1. – Article 37. – DOI: 10.3390/en13010037.

6. Moreno J.F., Hidalgo F.P., Martínez M.D. Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine // IEE Proceedings – Electric Power Applications. – 2001. – Vol. 148. – № 5. – P. 393–397. – DOI: 10.1049/ip-epa:20010580.

7. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D. Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2008. – Vol. 44. – № 4. – P. 1150–1159. – DOI: 10.1109/TIA.2008.926233.

8. Development and Validation of a Thermal Model for Electric Induction Motors / T.A. Jankowski, F.C. Prenger, D.D. Hill [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57. – № 12. – P. 4043–4054. – DOI: 10.1109/TIE.2010.2043044.

9. Ершов М.С., Феоктистов Е.А. Аналитическое решение для шестимассовой термодинамической модели асинхронного двигателя закрытого исполнения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 53–61. – DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3331.

10. Валиуллин К.Р., Тушев С.И. Алгоритм пересчета температуры асинхронного двигателя на основе эквивалентной тепловой схемы // Энергетические системы. – 2022. – Т. 7. – № 2. – С. 42–48.

УДК 629.7.064.56

ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКА В АВИАЦИИ

Хренов Сергей Иванович
Научный исследовательский университет «МЭИ»
канд. техн. наук, доцент
KhrenovSI@mpei.ru

Мирзабекян Гарри Завенович
Научный исследовательский университет «МЭИ»
доктор технических наук, профессор
garri_mirzabekyan@mail.ru

Турчанинова Юлия Сергеевна
Научный исследовательский университет «МЭИ»
старший преподаватель
TurchaninovaYS@mpei.ru

Аннотация. Солнечная энергия используется с давних времен в разных сферах. Проведено исследование использования солнечной энергии в авиации. Рассмотрены несколько видов самолетов и их достижения. Установка солнечных батарей на летательные аппараты имеет разные стороны, но положительным путем развития может быть акцент на имеющемся опыте. В России существует разработка отечественных компаний, представляющая собой перспективное изобретение. Наиболее популяризированный самолет на солнечных батареях выпущен в проекте Solar Impulse, для разработки которого привлечено много инвесторов и специалистов компаний разных стран мира, в результате стал источником несколько рекордов и множества научных открытий и применение разных технологий.

Ключевые слова: солнечная энергия, солнечные батареи, летательный аппарат.

Наиболее известные возобновляемые источники энергии: земля, солнце, вода, ветер. Традиционно энергия воздушных потоков используется для получения электрической энергии в ветровые электростанциях и стала одной из первых, которую начал применять человек. Энергию водных ресурсов (рек) используют для работы гидроэлектростанций. Геотермальная энергетика, если говорить о России – на Камчатке, в нашей стране устанавливают геотермальные электрические и тепловые станции, со временем выработка может достичь 8 %, что значительно. Гелиоэнергетика обладает огромным потенциалом, поскольку огромные запасы энергии можно использовать поколениями; с учетом отражений и поглощений в слоях атмосферы, распределении населения по поверхности земли, энергия солнечного излучения может составлять до 700 кВт·ч на человека [1].

С Древних времен люди используют солнечное излучение для обогрева, освещения жилищ, в настоящее время ряд стран делает заготовки пищевых продуктов, высушивая их под солнцем, затем экспортирует. С открытиями, связанными с солнечным излучением, появлением фотоэлементов, объединенных в модули, начинают использовать солнечные батареи на гелиотермальных станциях [2]. В некоторых странах, к примеру, Куба, акцент на солнечной энергетике может стать мощным стимулом развития горной и металлургической промышленности [3].

В настоящее время для снабжения спутников, космических станций нашла свое применение гелиоэнергетика [4].

В 2003 году Бертран Пикар и Андре Боршберг объявили о начале амбициозного проекта, которому дали название Solar Impulse [5].

Цель создания данного самолета – показать возможности возобновляемой энергетики, когда самолет может круглые сутки находиться в воздухе, и поиск эффективных научных разработок [6].

По словам Бертрана Пикара: «Поскольку мы вступаем в решающее десятилетие борьбы с изменением климата, – и, скорее всего, это наш последний шанс ограничить

глобальное потепление до 1,5 °С, – нам необходимо сделать так, чтобы чистые технологии стали единственной приемлемой нормой. Эти технологии существуют сейчас, и их можно выгодно внедрить в этот ответственный момент». Он родился в семье исследователей и творческих людей. Огюст Пикар, его дед «разработал первый в мире стратостат – воздушный шар со сферической герметичной гондолой из алюминия», его отец Жак Пикар «впервые опустились на дно Марианской впадины» [7].

Сфера интересов Бертрана Пикара широка: получив образование психолога и психиатра, занимался профессионально воздухоплаванием, облетев в 1999 году вокруг Земли на воздушном шаре без посадки, решил совершить кругосветный перелет на самолете, снабженном солнечными батареями. Этот проект за несколько лет исследований был реализован. Известно, что 9 марта 2015 года стартовал вылет нового самолета [5]. На поверхности крыла и стабилизатора установлено более 11 тыс. солнечных панелей [6]. Всего в проекте Solar Impulse выпущено два самолета. Второй из них основывался на полученных достижениях, с большей грузоподъемностью и увеличенном размахе крыльев [8]. Об этом полете говорили многие СМИ. Список рекордов, ознаменовавших тот полет самолета, не требующего топлива:

– первый самолет на солнечных батареях, облетевший Землю;
– первый подобный самолет, перелетевший Атлантический океан;
– самое длительное нахождение в воздухе, дорога из Нагои в Гаваи.

Для участия в его реализации были привлечены ведущие мировые производители оборудования: система автопилота Stability Augmentation System (Altran), облегченная система взлетно-посадочных прожекторов: светодиодные посадочные фары и дополнительные габаритные огни, фокусирующие линзы, силовой трансформатор и разъемы весят всего 1 кг, система предупреждения пилотов: вибрирующие рукава и сигнализатор, бортовые контрольно-измерительных приборы, в разработке которых принимали участие специалисты Omega [5]. Легкий самолет, не использующий обычное топливо, четыре электродвигателя которого имели рекордный КПД 97 % [7]. «Solar Impulse использует свою энергию днем для набора высоты и подзарядки батарей. С наступлением ночи он снижается, планируя с высоты 9000 до 3000 метров, и затем питание берут на себя батареи» [9].

Проект Solar Impulse 2 в 2019 году был приобретен компанией Skydweller Aero. Второй самолет беспилотный запущен в мае этого года. Над Мексиканским заливом заряд обнулился и самолет потерпел крушение [6].

Тем не менее, результаты проекта заслуживают изучения. Он был создан больше, как лаборатория, для тестирования новейших разработок. Например, разработана эффективная пена специалистами Bayer Material Science, защищавшая батареи и пилота от холода, что может использоваться в холодильниках. Легкое углеродное волокно, как часть конструкции самолета, может быть использовано на транспорте. Светодиодные лампы более энергоэффективные широко востребованы [5].

Данный самолет при его медийности и популярности не является первым и единственным на солнечных батареях.

История воздухоплавания на солнечных батареях началась в прошлом веке:

– 4 ноября 1974 года в США запущен первый беспилотный самолет Sunrise I, в следующем году собрали Sunrise II;
– в 1980 году в США компания AeroVironmen разработала пилотируемый Solar Challenger. Второй аппарат стал удачным и выполнил задачу перелета;
– в 2011 году в Германии вышла разработка Elektra oneElektra One пилотируемого самолета с возможностью сбора шасси [10];
– в 2003 году компания Airbus построила беспилотный самолет Zephyr 7, доработанный вариант Zephyr S в 2018 году находился в воздухе 25 суток [11];
– в 2025 году швейцарский двухпилотный самолет SolarStratos совершил подъем в стратосферу [12, 13].

Существует отечественная разработка, сконструированная в России, имеющая солнечные модули, способные улавливать прямой и отраженный солнечный свет. В конце 2017 года были утверждены задачи и параметры Летающей лаборатории – прототипа для отработки технологий, необходимых для создания самолёта для кругосвет-

ного перелёта. Проект имеет название «Альбатрос», исследования в области возможности кругосветного перелета еще ведутся [14].

Для того, чтобы выбрать вектор движения, всесторонне рассматривают преимущества и недостатки технологии.

Преимущества использования солнечных батарей на летательных аппаратах:

– доступность источника энергии;
– неисчерпаемость;
– экологическая безопасность;
– отсутствие у фотоэлектрических преобразователей движущихся частей;
– большой срок службы гелиоустановок;
– использование модульного принципа [2].

Проблемы экологии сейчас актуальны для сохранения нашего общего дома, нашей планеты. Требуется снижение выбросов углекислого газа, сернистых газов [4]. Работа солнечных батарей не имеет выбросов, за исключением производства кремния для фотобатарей [15].

Учет недостатков использования солнечной энергии поможет избежать многих неточностей в процессе реализации технологии:

– наибольшее количество солнечной энергии поступает летом;
– солнечное излучение на поверхность Земли зависит от многих факторов: широты и долготы местности, ее географических и климатических особенностей, состояния атмосферы, высоты Солнца над горизонтом, высоты Солнца над горизонтом, размещения приемника СИ на Земле и по отношению к Солнцу [1].

Область применения солнечной энергии может быть в авиации, космической отрасли [15]. Авторы [16, 17] отмечают возможность использования беспилотных транспортных средств в логистике, они могут использовать энергию солнца, однако, важным является законодательное регулирование полетов в воздушном пространстве.

Понимая недостатки установки солнечных батарей, данный вид самолета не может стать массовым, но может уверенно занять определенную нишу, чтобы приносить пользу человечеству. Результаты исследований, проведенные в ходе работы над самолетом на солнечных батареях, имеют перспективы, могут быть внедрены в разные области промышленности и повседневной жизни.

Таким образом, энергия солнца нашла свое применение во многих направлениях, даже в авиации.

Список литературы:

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики : учебник. – 3-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2012. – 352 с.

2. Гарипов М.Г. Гелиоэнергетика // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 12. – С. 90–91. – EDN QCWOZZ.

3. Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба / Я.Э. Шклярский, Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева [и др.] // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 427–440. – DOI: 10.31897/PMI.2021.3.12.

4. Соболь Т.Г. Гелиоэнергетика в России и в мире / Т.Г. Соболь, Д.В. Ревин, Ю.С. Панищева // Наукоемкие технологии и инновации : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 29 апреля 2019 года. Том Часть 11. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 64–67. – EDN DRPRWM.

5. Старцев К. Миссия выполнима. Solar Impulse: вокруг света на солнечных крыльях // Коммерсант. "Стиль Инициативы". Приложение № 50. – 21.11.2017. – С. 20. – Режим доступа : https://www.kommersant.ru/doc/3466739. – Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

6. Solar Impulse // Сайт РУВИКИ. Дата изменения 21.05.2026 г. – Режим доступа : https://ru.ruwiki.ru/wiki/Solar_Impulse?ysclid=mu46r74jj4249471263&utm_referrer=https://yandex.ru/ – Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

7. Кругосветка Solar Impulse 5 лет спустя: есть ли будущее у самолётов на солнечных батареях? // Новости энергетики (Energyland. info). – 11 июля 2021 г. – Режим доступа : https://dzen.ru/a/YOrpLy_csQSx5bLS. – Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

8. Haroon Junaidi Solar Impulse 1 Vs Solar Impulse 2 // Synergy Files. Portal for Renewable Energy & Sustainability. 29.04.2015 г. – Режим доступа : https://synergyfiles.com/2015/04/solar-impulse-1-vs-solar-impulse-2/ Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

9. Solar Impulse: perpetual flight // Altran. Ignition in Action. – 2020. – Режим доступа : https://ignition.altran.com/en/article/solar-impulse/ – Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

10. Самолеты на солнечных батареях // ЭЛЕКТРОМАГ. – Режим доступа : https://www.kavelsib.ru/index.php?route=blog/article&article_id=131. Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

11. Самолеты на солнечных батареях – есть ли у них будущее? // Сайт bibimot. – 9 марта 2022 года. – Режим доступа : https://bibimot.ru/1310-samolety-na-solnechnyh-batarejah-est-li-u-nih-buduschee.html. Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

12. Швейцария испытала двухместный стратосферный самолет на солнечных батареях // Транспорт. Технологии. – 05.05.2017 г. – Режим доступа : https://nplus1.ru/news/2017/05/05/solarstratos. Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

13. Детинич Г. Самолёт SolarStratos побил рекорд высоты полёта на солнечной тяге // «3ДНьюс» – первое независимое российское онлайн-издание, посвященное цифровым технологиям. – 28.08.2025 г. – Режим доступа : https://3dnews.ru/1128371/samolyotsolarstratos-pobil-rekord-visoti-polyota-na-solnechnoy-tyage. Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

14. Проект «Альбатрос – вокруг света на энергии Солнца» // Сайт Фёдора Конюхова. – Режим доступа : http://konyukhov.ru/project/expedition/albatross-project-the-first-non-stop-solar-powered-flight-around-the-world/ Загл. с экрана (дата обращения 20.09.2026 г.).

15. Рябинин Е.А. Влияние солнечной энергетики на экологию и развитие мировой энергетики / Е.А. Рябинин, Н.В. Нестерова // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06–07 июня 2019 года / Под общей редакцией В.А. Гулевского. Том Часть I. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. – 2019. – С. 53–56. – EDN YLZVSJ.

16. Киреева Н.С. Использование постаматов в логистике последней мили / Н.С. Киреева // Экономика, предпринимательство и право. – 2023. – Т. 13. – № 4. – С. 1165–1174. – DOI: 10.18334/epp.13.4.117485. – EDN KWDAVE.

17. Пустохина И.В., Марданшина Л.Р. Проблемы и перспективы использования дронов в доставке последней мили // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2021. – № 4(112). – С. 108–114. – DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2021.04.01.012.

УДК 62-65

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА ДЛЯ ПТИЦЕФАБРИК

Шелехов Игорь Юрьевич
Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет
канд. техн. наук, доцент ВАК, доцент кафедры «Городское строительство и Хозяйство»
promteplo@yandex.ru

Шелехова Анастасия Игоревна
Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет
магистрант
sheleh.ananas@yandex

Аннотация. В статье анализируются особенности формирования микроклимата в помещениях для выращивания птиц. Предлагается решение на основе комбинированной системы отопления, использующей полимерные нагревательные элементы с неравномерным распределением удельной мощности. Авторы ставят цель повысить эффективность потребления электроэнергии и снизить затраты на отопление таких зданий с помощью электроотопительных устройств. По результатам исследования показано, что отопительные приборы с запатентованным нагревательным элементом, имеющим распределённый греющий слой, обладают улучшенными теплотехническими свойствами и обеспечивают расширение зоны максимального комфорта по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: локальный обогрев, нагревательные элементы, энергосбережение, распределённый греющий слой, эффективность, саморегулируемый обогрев.

Одним из основных продуктов питания людей является продукция птицеферм. Сложно представить свою жизнь без традиционной яичницы или куриного супа. При этом количество и качество продукции птицефабрик очень сильно зависят от возможности систем отопления поддерживать заданные температурные параметры. Отопление птицефабрики – это не просто обогрев помещения, а сложная система поддержания микроклимата, критически влияющая на здоровье, продуктивность и сохранность поголовья птиц. Главная особенность состоит в том, что терморегуляция птицы, особенно молодняка, несовершенна, поэтому сбой в системе отопления ведёт к серьёзным экономическим потерям. Система отопления птицефабрик должна обеспечивать строго определённые параметры для каждой возрастной группы птицы, при этом необходимо учитывать, что комфортные условия для взрослой курицы губительны для цыплёнка [1].

В таблице 1 приведены ориентировочные нормы температуры, которые необходимо поддерживать для содержания кур и цыплят в холодный период времени.

Таблица 1 – Нормы температуры содержания птиц (холодный период)

Группа птицы	Напольное содержание (в помещении)	Локальный обогрев (под брудером)
Взрослые куры	От 16 до 18 °С	—
Цыплята (1–4 нед.)	От 28 до 24 °С	От 35 до 22 °С

Снижение температуры ниже заданного значения на несколько градусов может привести к гибели птицы или резкому снижению привесов. Например, у кур-несушек продуктивность падает на 30–50 % при снижении температуры до минус 1–7 °С [2].

Птичник представляет собой здание с высокой кратностью воздухообмена: от 4–8 объёмов в час зимой и до 50–100 летом. Это необходимо для удаления углекислоты, аммиака и лишней влаги. Из-за этого возникают две особенности:

1. Огромные затраты на нагрев приточного воздуха: в морозы затраты тепла на подогрев уличного воздуха в 4,5–6 раз превышают потери через стены.

2. Риск сквозняков: неправильно организованное отопление создаёт направленные потоки холодного воздуха, что вредно для птицы [3].

На смену громоздкому центральному водяному отоплению приходят локальные и комбинированные решения, позволяющие экономить до 20–30 % энергии. Авторы решали данные вопросы с помощью запатентованной технологии создания карбоновых нагревательных элементов большой площади с различным коэффициентом удельной мощности.

Инфракрасное отопление – экономичный и физиологичный метод. ИК-излучатели нагревают не воздух, а пол, подстилку и самих птиц. Это позволяет создать зону комфорта даже при более низкой температуре воздуха в помещении. Исследования показывают, что такие системы быстро окупаются (за 1–1,5 года) за счёт экономии энергоносителей. Наиболее эффективный подход для холодных регионов, к которым относится г. Иркутск, – применение комбинированных методов обогрева, отвечающих за локальный комфорт птицы и подсушивание подстилки, а также за компенсацию потерь тепла через стены и нагрев приточного воздуха. Это позволяет не тратить энергию на нагрев огромных объёмов вентиляционного воздуха дорогим электричеством.

Обеспечение оптимального микроклимата – критический фактор в промышленном птицеводстве. Температурный режим напрямую влияет на конверсию корма, темпы роста молодняка, яйценоскость и иммунитет птицы. Электрические системы отопления становятся всё более популярными благодаря экологичности, точности управления и простоте интеграции в автоматизированные системы управления птицефабрикой (АСУ ТП).

Для проведения экспериментов было оборудовано помещение размерами 2×4 м² с высотой потолков 2,5 м. Бетонный пол помещения был укрыт подстилкой для птиц, в которой с шагом 250 мм установлены термопары. Параметры микроклимата рассчитывались с учётом применения комбинированного отопления и рекомендаций по температурным параметрам для содержания цыплят и взрослых кур.

Для экспериментов были использованы три типа нагревательных элементов: галогеновые нагревательные элементы, нагревательные элементы в керамической оболочке и ленточные нагревательные элементы с распределённым греющим слоем, изготовленные в соответствии с патентом на полезную модель № 2018116517 [4].

При обработке данных учитывалось, что целенаправленное использование лучевого теплообмена позволяет снизить температуру окружающего воздуха без нарушения условий содержания птицы, а действие лучистого тепла в определённых пределах может оказывать на организм птиц благоприятное влияние.

Анализ распределения температурного поля на уровне пола показал, что применяемые на птицефабрике нагревательные приборы с галогеновым нагревательным элементом имеют ярко выраженную область с повышенной температурой по центру и плавным снижением к периферии. При установке нескольких нагревательных приборов невозможно создать равномерное температурное поле.

Исследования нагревательных приборов с нагревательным элементом в керамической оболочке показали, что распределение температуры более равномерно по сравнению с галогеновым элементом, однако присутствует спиралеобразная область повышенной температуры, расположенная по всей зоне нагрева. При установке нескольких обогревателей можно расширить зону повышенного нагрева с незначительными отклонениями от равномерной температуры.

Исследование двух штатных нагревательных приборов показало, что равномерное температурное поле получить не удаётся, а соответственно обеспечить оптимальную температуру для содержания птиц с минимальными энергетическими затратами невозможно.

Несмотря на то, что тепловым потоком можно управлять, используя классические законы оптики, производителям обогревателей с галогеновым и керамическими нагревательными элементами не удалось получить равномерного температурного поля. Для получения равномерного температурного поля авторы в качестве нагрева-

тельного элемента использовали элементы с распределённым греющим слоем. Температурное поле равномерно распределилось по всей нагреваемой зоне, отсутствуют провалы температур и локальные перегревы.

Применение нового типа нагревательных элементов позволяет упростить системы управления, обеспечить равномерный нагрев и снизить энергетические затраты. Исследования показали, что новые нагревательные элементы устойчивы к агрессивной среде (высокая влажность, наличие аммиака, пыль). В отличие от всех исследуемых нагревателей, с новым типом нагревательных элементов удалось создать эффект «теплового пятна», имитирующего тепло наседки, что позволило обеспечить экономию электроэнергии за счёт отсутствия необходимости прогревать весь объём воздуха в помещении. Данная технология позволяет в одном приборе совмещать датчики температуры и влажности и автоматически менять температурные параметры по мере взросления птицы.

Предварительные эксперименты позволили снизить энергетические затраты на 14 % и обеспечить более комфортные условия для содержания птиц. Проведённые эксперименты показали, что применение новых российских технологий в области электрического нагрева позволяет не только экономить энергетические ресурсы, но и обеспечивать благоприятные условия для содержания и выращивания птиц.

Таким образом, обеспечение оптимального температурного режима на птицефабриках является сложной технической задачей, от решения которой напрямую зависят экономические показатели предприятия и сохранность поголовья. Проведённые исследования подтвердили, что традиционные типы нагревательных элементов (галогеновые и керамические) не позволяют создать равномерное температурное поле, необходимое для комфортного содержания птицы. Применение же инновационных нагревательных элементов с распределённым греющим слоем обеспечивает равномерный нагрев, устойчивость к агрессивной среде птичника и эффект «теплового пятна», имитирующего тепло наседки. Это позволяет не только снизить энергозатраты (по предварительным данным, на 14 %), но и создать физиологически благоприятные условия для роста и продуктивности птицы. Комбинированное использование локального инфракрасного обогрева и центрального отопления является наиболее перспективным направлением для холодных регионов, к которым относится Иркутская область, поскольку позволяет минимизировать затраты на нагрев приточного воздуха и компенсировать теплопотери через ограждающие конструкции.

Список литературы:

1. Агафонова И.В. Значение систем отопления и вентиляции для производства бройлеров / И.В. Агафонова, М.Д. Соловьев // Наука. Исследования. Практика : сборник избранных статей по материалам Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 25 июня 2021 года. – Санкт-Петербург : ГНИИ «Нацразвитие», 2021. – С. 40–43. – DOI: 10.37539/SRP297.2021.14.70.002. – EDN EJEYNI.

2. Панина О.Л. Продуктивность цыплят-бройлеров кросса «Кобб-500» в условиях ОАО «Ивановский бройлер» / О.Л. Панина, А.Д. Шувалов // Зоотехническая наука в условиях современных вызовов : Сборник трудов II научно-практической конференции с международным участием, Киров, 27–29 октября 2020 года. – Киров : Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 2020. – С. 104–109. – EDN HCOJOR.

3. Симченков А.С. Исследование параметров микроклимата птичника в зимний период и усовершенствование системы автоматического регулирования температуры воздуха // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : Сборник научных трудов. – Горки : Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2024. – С. 222–227. – EDN HXZONL.

4. Патент № 2713729 C1 Российская Федерация, МПК H05B 3/36. Нагревательный элемент широкого спектра применения : № 2018116517 : заявл. 03.05.2018 : опубл. 07.02.2020 / И.Ю. Шелехов. – EDN NSFAST.

УДК 66.074.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ПРОЦЕСС СЕПАРАЦИИ ПЫЛЕГАЗОВОГО ПОТОКА В ИНЕРЦИОННО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ

Юровская Мария Андреевна
Ярославский государственный технический университет
старший преподаватель
barashevama@ystu.ru

Лебедев Антон Евгеньевич
Ярославский государственный технический университет
д-р техн. наук, профессор
lebedevae@ystu.ru

Гуданов Илья Сергеевич
Ярославский государственный технический университет
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование»
gudanovis@ystu.ru

Аннотация. В эпоху интенсивного промышленного роста экологическая безопасность становится приоритетной задачей, где критическое значение приобретает борьба с выбросами твердых частиц в атмосферу. Инерционные пылеуловители остаются наиболее востребованным и экономически оправданным решением для очистки газов в химической, металлургической и машиностроительной отраслях. Тем не менее, масштабирование производства требует повышения эффективности существующих систем пылеулавливания, что диктует необходимость разработки инновационных конструкций. При разработке принципиально новых конструкций пылеуловителей и модернизации существующих аппаратов необходимо оценивать влияние параметров пылегазовой среды на эффективность пылеулавливания. В данной работе с помощью современных программных средств, реализуемых метод конечных элементов, исследовано влияние размера частиц дисперсной фазы на структуру потока в новом инерционно-центробежном пылеуловителе. Достоверность теоретических моделей подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными.

Ключевые слова: инерционно-центробежный пылеуловитель, изоконтуры скорости, траектория движения частиц, медианный размер частиц дисперсной фазы.

Производственные циклы в химической, строительной, металлургической, деревообрабатывающей и пищевой отраслях сопровождаются интенсивным выбросом мелкодисперсной пыли в атмосферу, что создает серьезные экологические и санитарно-гигиенические риски. В современной промышленности для очистки газовых потоков чаще всего применяются инерционные аппараты, отличающиеся надежностью, компактностью, простотой обслуживания и устойчивостью к повышенным температурам и давлению [1, 2].

Однако в условиях постоянного роста промышленных производств и увеличения объёмов выбросов пыли существующие системы пылеулавливания не всегда справляются с поставленной задачей эффективной очистки пылегазового потока, поэтому возникает потребность в разработке новых конструктивных решений и совершенствовании существующих методов пылеулавливания.

В Ярославском государственном техническом университете была разработана конструкция инерционно-центробежного пылеуловителя, представленного на рисунке 1 [3].

В корпусе 1 инерционно-центробежного пылеуловителя последовательно расположены три ступени очистки пылегазового потока *I*, *II*, *III*. Аппарат работает следующим образом. Газ, содержащий взвешенные частицы, через спиральный входной патрубок 2 поступает на первую ступень очистки *I*, где происходит отделение частиц за счет сил возникающих во вращающемся потоке. Уловленная фракция пыли выводится

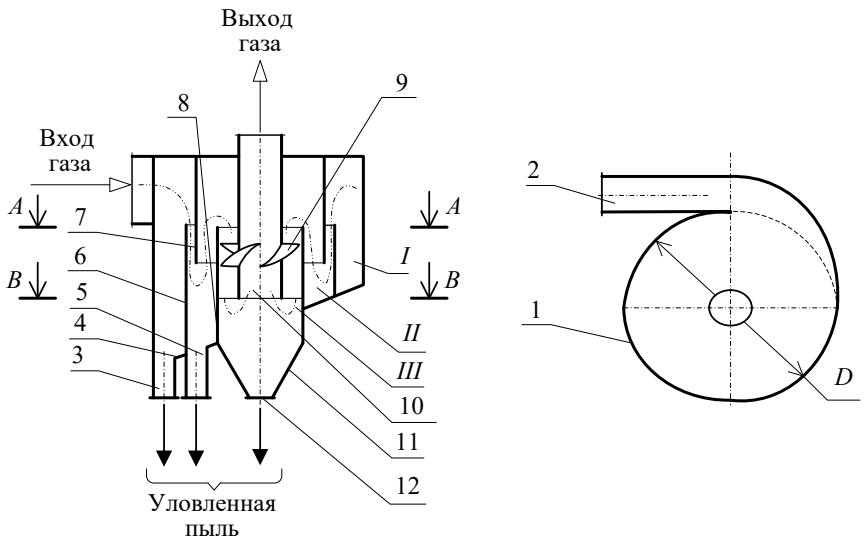


Рисунок 1 – Принципиальная схема инерционно-центробежного пылеуловителя

из аппарата через патрубок 3, расположенный на наклонном днище 4. Далее поток газа поступает на вторую ступень очистки *II*, расположенную в пространстве между приемным цилиндром 6 и экраном 7. На второй ступени очистки за счет изменения направления движения потока происходит отделение частиц, которые выводятся через патрубок 5, расположенный на наклонном днище 4. Поток газа с мелкой фракцией огибает наружную поверхность приемного цилиндра 8 и поступает на третью ступень очистки *III*, на которой за счет неподвижных лопастей 9 происходит закрутка пылегазового потока, повышается действие центробежной силы, в результате чего происходит отделение мелкодисперсных частиц от газового потока. Очищенный газовый поток выводится из аппарата через выходной патрубок 10, а мелкодисперсные частицы пыли удаляются через патрубок 12, расположенный на коническом днище 11.

В данной работе было исследовано влияние размера частиц дисперсной фазы на процесс сепарации пылегазового потока. Для этого с помощью современных программных средств, реализуемых метод конечных элементов, была проведена серия численных экспериментов.

На рисунках 2 и 3 представлены изоконтуры скорости в различных сечениях аппарата (рисунок 1) для монодисперсных частиц плотностью 2100 кг/м^3 при скорости движения пылегазового потока во входном патрубке 17 м/с.

Анализ влияния размера частиц на структуру потока показывает, что увеличение диаметра частиц приводит к увеличению скорости движения потока на первой ступени очистки, что связано с влиянием более крупных частиц на переток пылегазового потока на вторую ступень. Так скорость движения пылегазового потока в верхней части первой ступени очистки с увеличением размера частиц от 80 до 450 мкм увеличивается в среднем от 18 м/с до 24 м/с. При этом наблюдается участок с максимальным значением скорости (порядка 24 – 27 м/с), который с ростом размера частиц занимает большую площадь в зоне первой ступени.

Изоконтуры скорости на второй ступени очистки показывают, что независимо от размера частиц максимальные значения скорости при перетоке потока между ступенями достигают 30 м/с, что может вызывать унос мелкодисперсных частиц на третью ступень очистки.

Изоконтуры скорости в выходном патрубке показывают, что с увеличением размера частиц скорость движения в выходном патрубке снижается от 30 м/с (для частиц размером 80 мкм) до 24 м/с (для частиц диаметром 450 мкм).

Кроме этого, в нижней части первой ступени очистки скорость пылегазового потока в среднем возрастает от 6 м/с до 18 м/с при увеличении размера частиц от 80 до 450 м/с. Это тоже говорит о том, что крупные частицы препятствуют перетоку пылегазового потока на последующие ступени, что приводит к движению потока не только по окружности, но и в нижнюю часть аппарата. С одной стороны, это может способствовать более эффективной сепарации частиц из пылегазового потока, а с другой стороны вызывать встречные вихревые потоки, которые могут способствовать вторичному уносу более мелких частиц на последующие ступени очистки.

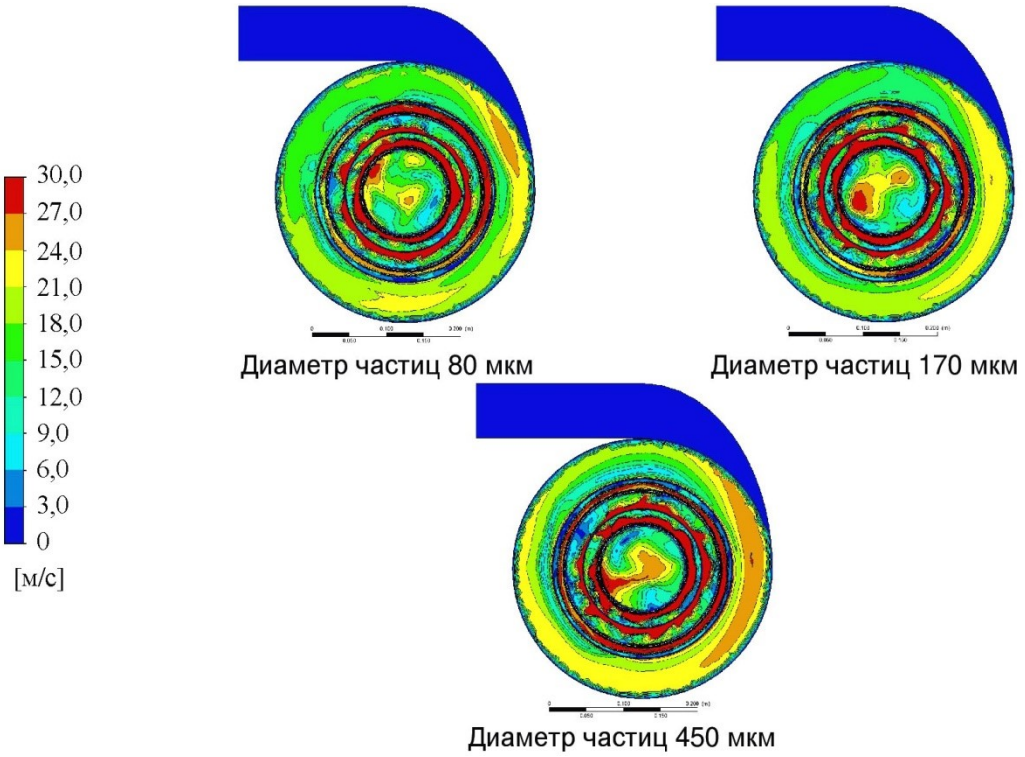


Рисунок 2 – Изоконтуры скорости в сечении, проходящем по верхней границе приемного цилиндра второй ступени (сечение *A*) в зависимости от размера частиц дисперсной фазы

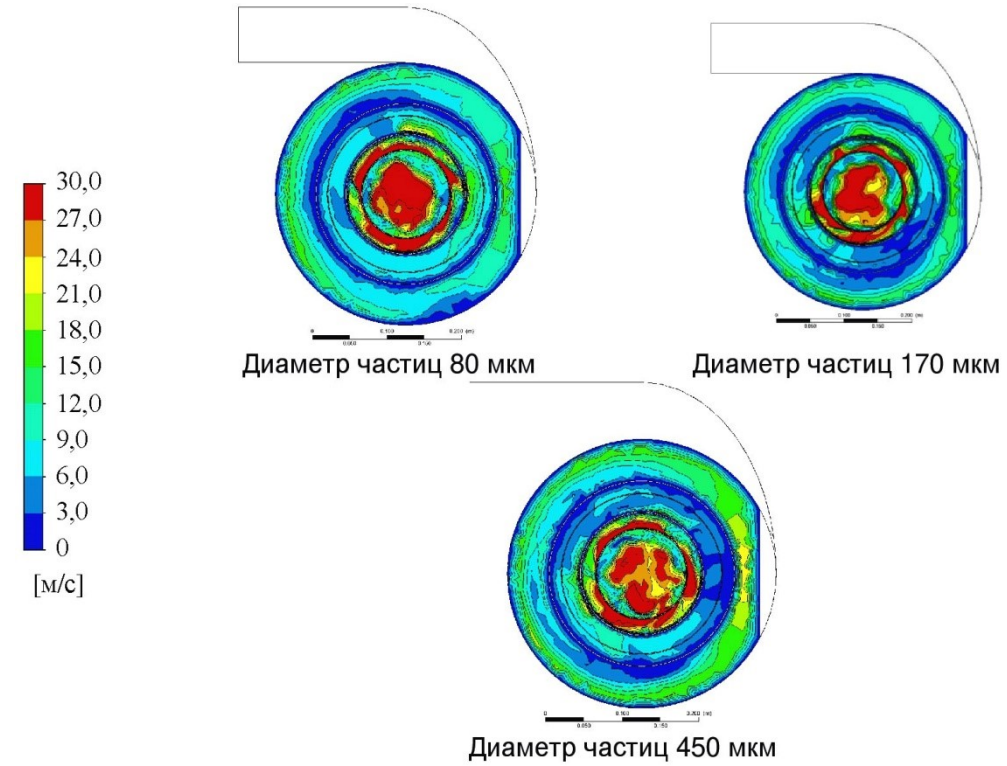


Рисунок 3 – Изоконтуры скорости в сечении, проходящем по нижнему краю выходного патрубка (сечение *B*) в зависимости от размера частиц дисперсной фазы

На рисунке 4 представлены картины распределения скоростей по траекториям движения частиц. Анализ траектории движения частиц показывает, что более мелкие частицы смещаются к стенкам аппарата и их осаждение происходит преимущественно на первой ступени очистки.

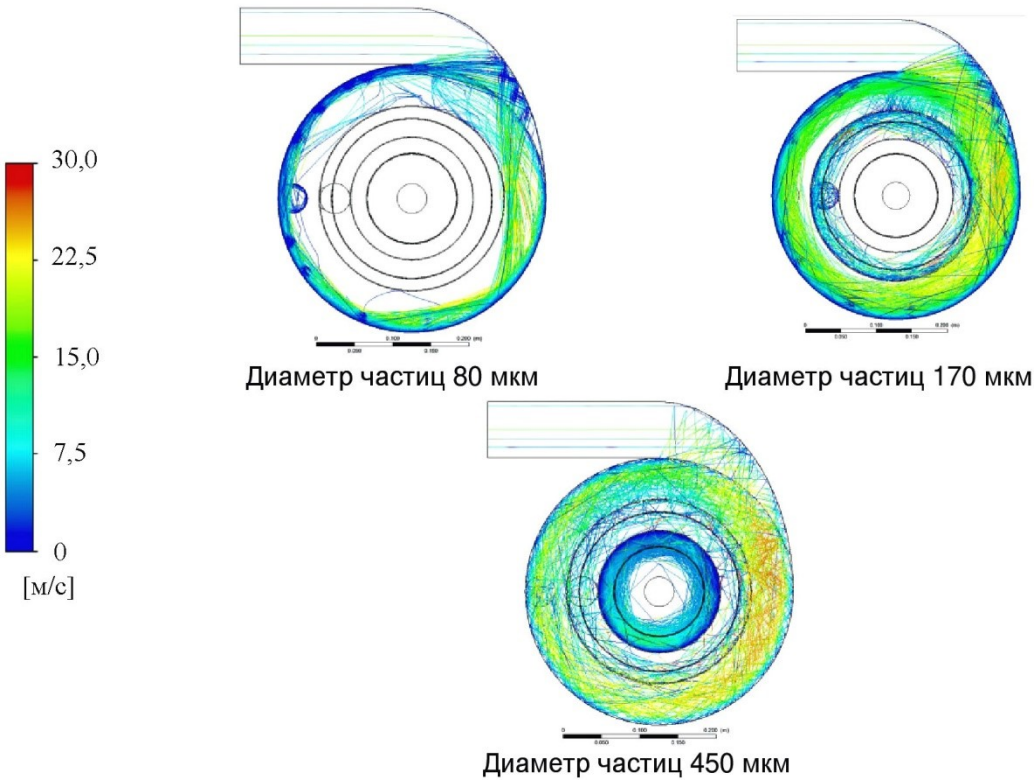


Рисунок 4 – Распределение скоростей по траекториям движения частиц в зависимости от размера частиц дисперсной фазы

Более крупные частицы при ударе о стенки аппарата отбрасываются рикошетом, при этом частицы размером 450 мкм частично осаждаются на первой ступени, а часть переходит на вторую ступень очистки, а частицы размером 170 мкм преимущественно отбрасываются на вторую ступень. При этом более крупные частицы имеют значительную скорость в пристенной области (15–20 м/с) по всей длине окружности первой ступени очистки, что приведет к значительному абразивному износу корпуса аппарата.

Для подтверждения выводов, сделанных в ходе теоретических исследований, на опытной установке была проведена серия экспериментов для частиц плотностью 2100 кг/м^3 при скорости движения пылегазового потока во входном патрубке 17 м/с. Экспериментальные данные представлены на рисунке 5.

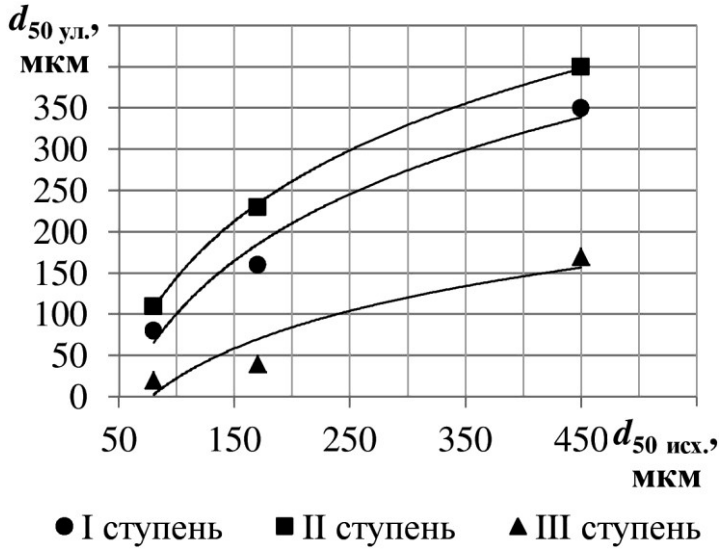


Рисунок 5 – График зависимости медианного размера частиц уловленных на каждой ступени очистки от размера частиц твердой фазы подаваемой в аппарат

Экспериментально установлено, что на первой ступени происходит осаждение достаточно большого количества мелкодисперсной пыли и медианный размер частиц данной фракции несколько меньше среднего размера частиц исходной пыли; на второй ступени происходит осаждение крупных частиц отброшенных рикошетом с первой ступени, то есть вторую ступень очистки можно рассматривать как вспомогательную ступень к первой; на третьей ступени осаждаются мелкодисперсные частицы.

Таким образом, результаты, полученные в ходе теоретического исследования, были подтверждены экспериментально, что позволяет говорить о возможности использования компьютерной модели для предварительной оценки принципа работы нового инерционно-центробежного пылеуловителя в различных производственных условиях.

Список литературы:

1. Экотехника : Защита атмосфер. воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Холдинговая группа "Кондор Эко – СФ НИИОГАЗ"; Под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль : Русь, 2004. – 424 с.

2. Обеспыливание промышленных газов / Э.М. Соколов, Н.И. Володин, О.М. Пискунов [и др.]; М-во общ. и проф. образования Рос. Федерации. Тул. гос. ун-т. ФПЦ "Интеграция". – Тула : Тул. гос. ун-т, 1999. – 376 с. – ISBN 5-7679-0232-1.

3. Экспериментальные исследования пылеуловителя-классификатора / М.А. Юровская, Д.Е. Смирнов, А.В. Сугак [и др.] // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – № 10. – С. 84–87.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ЭКОЛОГИЯ. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 66.097.5

АНАЛИЗ ТЕКСТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ КАТАЛИЗАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЛОИДНОГО КРЕМНЕЗЕМА

Алексеев Фёдор Сергеевич

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
студент факультета химии веществ и материалов
aleksway833@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено создание алюмосиликатных носителей катализаторов с применением коллоидного кремнезоля Nanosil – 40MN с определенными структурно-прочностных характеристик носителей. Синтезирована серия образцов с различным содержанием SiO_2, введённого в виде кремнезоля, и исследованы их основные текстурные и физико-механические характеристики. Рассматривалось влияние увеличения содержания кремнезёма и последующие изменения пористой структуры, объёмной плотности, усадки и механической прочности носителей .Была проанализирована возможность регулирования свойств алюмосиликатных материалов изменением концентрации кремнезоля и могут быть использованы при разработке носителей катализаторов с заданными характеристиками.

Ключевые слова: алюмосиликатный носитель, коллоидный кремнезём, кремнезоль, SiO_2, Al_2O_3, катализатор, пористость, механическая прочность.

Каталитические процессы занимают важное место в современной химической промышленности, нефтепереработке и нефтехимии. Эффективность гетерогенных катализаторов определяется не только природой активного компонента, но и свойствами носителя, который обеспечивает необходимую дисперсность активной фазы, механическую прочность гранул, развитую поверхность и доступность каталитически активных центров.

Особый интерес представляют алюмосиликатные материалы, применяемые в процессах гидрокрекинга, каталитического крекинга и гидроочистки нефтяных фракций. Система Al_2O_3–SiO_2 обладает возможностью регулирования кислотных, структурных и текстурных характеристик материала изменением соотношения компонентов и условий его получения. Кислотные свойства алюмосиликатов связаны с наличием центров Бренстеда и Льюиса, а изменение соотношения SiO_2/Al_2O_3 оказывает влияние на их количество и силу [1].

Одним из перспективных компонентов при синтезе алюмосиликатных носителей является коллоидный кремнезём. Кремнезоль представляет собой коллоидную систему, содержащую высокодисперсные частицы аморфного диоксида кремния. Благодаря высокой дисперсности, развитой поверхности и наличию силанольных групп кремнезоли могут использоваться для формирования структуры композиционных материалов и в качестве связующего компонента [2, 3].

При взаимодействии кремнезоля с соединениями алюминия формируется алюмосиликатная структура. Наличие SiO_2 влияет не только на механические характеристики получаемого материала, но и на процессы фазообразования при термической обработке. Согласно литературным данным, введение небольших количеств SiO_2 препятствует образованию корунда и способствует формированию Si–Al шпинели [4].

Для получения алюмосиликатных носителей использовали бемит марки ПБ-200, азотную кислоту, дистиллированную воду и стабилизированный ионами Na^+ кремнезоль Nanosil-40MN. Согласно данным производителя, кремнезоль характеризуется размером частиц 11–21 нм, плотностью при 20 °C 1,295–1,310 г/см³, содержанием SiO_2 497–522 г/л и pH 9,0–10,5 [6].

Синтез носителей осуществляли на основе пептизированного бемита с введением рассчитанного количества кремнезоля. Количество SiO_2 в получаемых образцах составляло 0, 10, 20 и 30 % мас. После смешения компонентов и достижения необходимой пластичности пасту формовали методом экструзии через фильеру диаметром 3 мм. Полученные цилиндрические гранулы предварительно сушили на воздухе, затем подвергали сушке в сушильном шкафу и термической обработке в муфельной печи.

Для полученной серии образцов определяли суммарный объём пор, механическую прочность гранул на раздавливание, средний диаметр гранул, объёмную плотность и влажность пастообразной формовочной массы.

После анализа образцов были получены следующие результаты:

Таблица 1 – Текстурные свойства серии образцов

Индекс	Характеристики носителей					Свойства пасты
	C(SiO_2), % мас.	VΣпор, см³/г	Прочность, МПа	Средний диаметр гранул, мм	Об. плотность г/см³	W, % мас.
К0	0	0,46	1,41	2,40	1,26	46,9
К1	10	0,44	3,94	2,39	1,34	44,8
К20	20	0,42	4,17	2,38	1,36	40,7
К30	30	0,3	4,58	2,38	1,41	40,5

По полученным данным видно, что с увеличением содержания SiO_2 от 0 до 30 % мас. наблюдается последовательное снижение влажности пастообразной формовочной массы с 46,9 до 40,5 %. Наибольшее изменение происходит при введении первых 20 % SiO_2. Полученная зависимость характеризует изменение свойств формовочной массы при введении высокодисперсного кремнезёма. Частицы SiO_2 обладают развитой поверхностью и способны связывать воду в тонких адсорбционных слоях, что изменяет соотношение свободной и связанной влаги в пасте.

Одновременно с увеличением содержания кремнезёма изменяются характеристики сформированных гранул. Средний диаметр гранул уменьшается с 2,40 до 2,35 мм. Объёмная плотность, напротив, увеличивается с 1,26 до 1,41 г/см³. Такое изменение может быть связано с уплотнением структуры материала при сушке и термической обработке.

Наиболее выраженное влияние введение кремнезоля оказывает на механическую прочность. Для исходного образца К0 прочность гранул составляет 1,41 МПа. При введении 10 % SiO_2 этот показатель увеличивается до 3,94 МПа, при 20 % – до 4,17 МПа, а при 30 % достигает 4,58 МПа. Таким образом, относительно исходного материала прочность увеличивается более чем в три раза.

Повышение прочности может быть связано со структурообразующей способностью коллоидного кремнезёма. При сушке происходит сближение частиц и конденсация силанольных групп с образованием силоксановых связей:

$$\mathrm{Si{-}OH + HO{-}Si \rightarrow Si{-}O{-}Si + H_2O}. \quad (1)$$

Формирование пространственной кремнезёмной сетки способствует усилению контактов между частицами алюмооксидной матрицы. Кроме того, при взаимодействии компонентов возможно формирование связей Al–O–Si, что приводит к образованию более жёсткого алюмосиликатного каркаса [1–3].

Вместе с тем увеличение содержания SiO_2 сопровождается уменьшением суммарного объёма пор. Для образца без кремнезёма данный показатель составляет 0,46 см³/г, тогда как при содержании 30 % SiO_2 он снижается до 0,30 см³/г. Таким образом, увеличение концентрации кремнезёма в исследованном диапазоне не приводит к развитию суммарного порового объёма, а, напротив, сопровождается его уменьшением.

Вероятной причиной является уплотнение структуры при формировании кремнезёмной сетки и усиление межчастичных взаимодействий. Образование связей Si–O–Si и Al–O–Si способствует более плотной упаковке компонентов и уменьшению части межчастичных пустот. Данный результат согласуется с литературными данными о влиянии соотношения SiO_2/Al_2O_3 на структурную организацию алюмосиликатных материалов [1, 3].

Изменение структуры носителя при введении кремнезёма может иметь значение не только для механической прочности, но и для его дальнейшего использования в каталитических процессах. Пористость определяет транспорт реагентов внутри гранулы и доступность поверхности, тогда как механическая прочность обеспечивает устойчивость носителя к разрушению при эксплуатации. Поэтому при выборе содержания кремнезёма необходимо учитывать компромисс между повышением прочности и сохранением развитой пористой структуры.

Полученные результаты также согласуются с литературными данными о влиянии SiO_2 на фазовый состав алюмосиликатных материалов. При термической обработке системы Al_2O_3–SiO_2 введение кремнезёма препятствует интенсивной кристаллизации корунда и способствует формированию Si–Al шпинельных фаз [4]. Наличие кремния при этом может способствовать сохранению более стабильной структуры алюмосиликатного материала при повышенных температурах.

Следует отметить, что увеличение содержания кремнезёма приводит к повышению жёсткости получаемых гранул. Поэтому наряду с ростом сопротивления раздавливанию может возрастать их хрупкость. В исследуемой системе формирование жёсткого каркаса Si–O–Si и Al–O–Si ограничивает способность материала перераспределять локальные механические напряжения. Это является фактором, который необходимо учитывать при дальнейшей оптимизации состава носителя.

Таким образом, проведённые исследования показывают, что концентрация коллоидного кремнезёма является одним из факторов, позволяющих управлять комплексом свойств алюмосиликатных носителей. В исследованном диапазоне увеличение содержания SiO_2 приводит к уплотнению структуры, повышению объёмной плотности и значительному увеличению механической прочности, но сопровождается снижением суммарного объёма пор.

Таким образом, полученные результаты показывают перспективность применения коллоидного кремнезёма для регулирования структурно-прочностных характеристик алюмосиликатных носителей. При этом выбор оптимального содержания SiO_2 должен учитывать необходимость одновременного обеспечения достаточной механической прочности и развитой пористой структуры материала.

Список литературы:

1. Гахраманов Т.О., Мамедов С.Э. Эффект влияния мольного отношения SiO_2/Al_2O_3 на свойства цеолита HZSM-5 в реакции алкилирования толуола этанолом // Башкирский химический журнал. – 2020. – Т. 27. – № 3. – С. 43–46.

2. Реологические свойства гидрозолей кремнезема, модифицированных солями металлов / Т.А. Савицкая, В.В. Паньков, И.М. Кимленко [и др.] // Сборник статей. – С. 1–6.

3. Кудрявцев П.Г. Методы синтеза, свойства и применения кремнезолей для получения композиционных материалов. Часть I // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. – С. 1–34.

4. Chakravorty A.K., Ghosh D.K. Crystallization Behavior of Al_2O_3 in the Presence of SiO_2 // J. Am. Ceram. Soc. – 1987. – Vol. 70. – № 3. – P. C-46–C-48.

5. Шеховцов В.В., Скрипникова Н.К., Верещагин В.И. Влияние энергии термической плазмы на фазовые переходы нанодисперсного диоксида кремния // Физика и химия стекла. – 2022. – Т. 48. – № 5. – С. 593–595.

5. Технический паспорт продукта Nanosil-40MN: коллоидный кремнезем (кремнезоль, силиказоль). – Пром-Стекло. – 2 с.

УДК 614.8

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОЦИАЛЬНО-БИОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ИТОГОВУЮ ОЦЕНКУ УРОВНЯ КУЛЬТУРЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТНИКА

Баклаженко Кристина Вадимовна
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
ассистент

Глебова Елена Витальевна
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой
baklazhenko.k@gubkin.ru

Аннотация. В работе описывается реализация новой идеи по использованию социально-биографических характеристик для оценки уровня культуры производственной безопасности (КПБ). Методом ранговой корреляции Спирмена была установлена зависимость между уровнем культуры производственной безопасности работника и вопросами социально-биографической анкеты, которая ранее не использовалась для оценки уровня КПБ. Впервые показана возможность проведения оценки уровня культуры производственной безопасности на основе социально-биографических характеристик работника.

Ключевые слова: культура производственной безопасности, безопасность, охрана труда, методика, корреляционная зависимость.

Методика оценки уровня культуры производственной безопасности

Несмотря на ежегодное снижение уровня производственного травматизма в Российской Федерации, количество несчастных случаев остается на достаточно высоком уровне [1].

Основной причиной большинства несчастных случаев является человеческий фактор, обусловленный низким уровнем развития культуры производственной безопасности [2].

Наиболее емко понятие культуры безопасности, применяемое в международном сообществе, дал профессор Стэнли Дитц: «Культура безопасности – это такая культура поведения, когда работник выполняет все инструкции, правила и регламенты в тот момент, когда за ним никто не наблюдает» [3].

В настоящее время в законодательстве Российской Федерации отсутствует единая методика оценки уровня КПБ.

На основе анализа лучших международных и отечественных практик оценки культуры производственной безопасности на кафедре промышленной безопасности и охраны окружающей среды Губкинского университета была разработана авторская методика оценки уровня КПБ. Методика предусматривает анкетирование работников по двум анкетам. Первая анкета – социально-биографическая, приведена в таблице 1. Анкета использовалась для понимания отношения работников разного возраста, стажа работы, разного служебного положения и т.д. к оценке культуры безопасности.

Таблица 1 – Вопросы социально-биографической анкеты

Наименование вопроса анкеты	
1. Ваш возраст?	
2. Ваш общий стаж?	
3. Уровень занимаемой Вами должности.	
4. Считаю, что при выполнении работы я могу соблюдать все требования безопасности в рамках своей производственной деятельности (да, нет, затрудняюсь ответить).	
5. Я не совершал ошибок в процессе своей производственной деятельности (да, нет, затрудняюсь ответить).	

Таблица 1 – Окончание

Наименование вопроса анкеты	
6. Я считаю, что в имеющихся условиях производственной деятельности возможно достичь показателя нулевого травматизма (да, нет, затрудняюсь ответить).	
7. Оцените, по шкале от 1 до 5, состояние производственной безопасности на Вашем рабочем месте.	
8. Как Вы оцениваете свой личный вклад в обеспечение и развитие безопасности своего структурного подразделения? (в %, от 0 до 100).	
9. Вы готовы сделать замечание коллеге в случае его небезопасных действий? (да, нет, затрудняюсь ответить).	
10. Вы готовы остановить выполнение работы в случае предаварийной ситуации? (да, нет, затрудняюсь ответить).	

Вторая анкета включала оценку культуры безопасности по 16 компонентам. Таким образом, оценка проводилась по 64 утверждениям.

Определение уровня развития культуры производственной безопасности устанавливается согласно пятиуровневой классификации Международной ассоциации производителей нефти и газа (IOGP 5-level classification): 1 – начальный уровень, 2 – реактивный уровень, 3 – прогнозируемый уровень, 4 – проактивный уровень, 5 – креативный уровень.

Начальный уровень (балльная оценка: 0 – 1,25) культуры безопасности отличается формальностью соблюдения необходимых мер. Для реактивного уровня (балльная оценка: 1,26 – 2,50) характерно принятие мер обеспечения безопасности только после негативного события, также присутствует мотивация в виде штрафов и наказаний. На прогнозируемом уровне (балльная оценка: 2,51 – 3,75) безопасность воспринимается как личная ответственность, а для проактивного (балльная оценка: 3,76 – 4,50) – свойственна ответственность за личную и общественную безопасность, а общие ценности и лидерство обеспечивают ее постоянное улучшение. На самом высоком креативном уровне (балльная оценка: 4,51 – 5,00) компания считает обеспечение безопасности ключевым аспектом производственной деятельности, в том числе достижение нулевого травматизма.

С целью установления уровня КПБ на основании 16 компонентов культуры безопасности было проведено анкетирование работников нефтегазового предприятия. Общий уровень КПБ по результатам расчетов составил 3,66, что соответствует прогнозируемому уровню.

Анализ влияния позиций социально-биографической анкеты на итоговый уровень КПБ

В настоящей работе была выдвинута гипотеза о том, что позиции социально-биографической анкеты возможно использовать для оценки уровня культуры производственной безопасности работника, поскольку ряд вопросов отражают отношение работника к вопросам безопасности.

В рамках данного исследования была поставлена задача установить влияние каждого из десяти вопросов анкеты на итоговый уровень культуры производственной безопасности.

Для достижения поставленной цели был использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена (1) с последующим определением связи между показателями по шкале Чеддока (таблица 2) [4].

$$p_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)}, \quad (1)$$

где d_i – разница рангов значений КПБ и рангов ответов на вопросы; n – число наблюдений.

В результате анализа было сформировано графическое изображение корреляционной связи между вопросами социально-биографической анкеты и итоговым уровнем КПБ (рисунок 2).

Таблица 2 – Качественная шкала оценки силы корреляционной связи по шкале Чеддока

Значение $\|p_s\|$	Сила связи
0,1–0,3	слабая
0,3–0,5	умеренная
0,5–0,7	заметная
0,7–0,9	высокая
0,9–1,0	очень высокая

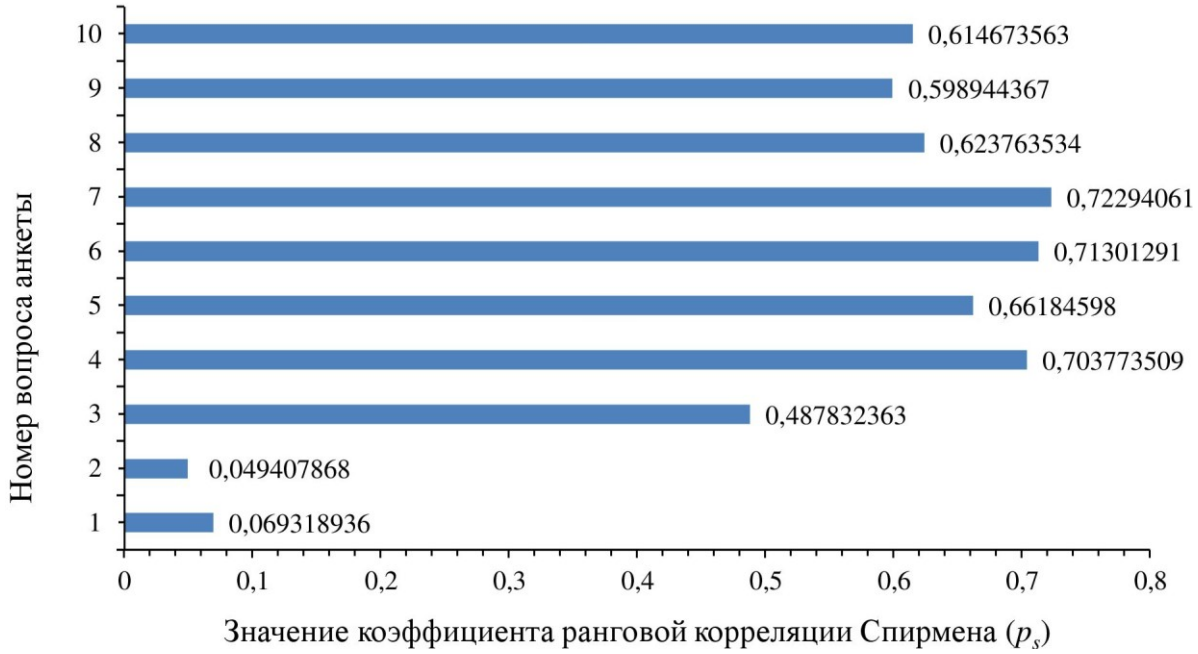


Рисунок 2 – Графическое изображение корреляционной связи между вопросами социально-биографической анкеты и итоговым уровнем КПБ

Выводы

В рамках проведенного исследования было показано, что все показатели социально-биографической анкеты, кроме возраста и стажа (вопросы 1 и 2), в большей или меньшей степени влияют на оценку уровня культуры производственной безопасности, и могут быть использованы для дальнейшего исследования.

Список литературы:

1. Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации – официальный сайт. – URL : https://mintrud.gov.ru/ (дата обращения 17.09.2026).

2. Глебова Е.В., Волохина А.Т., Вихров А.Е. Оценка эффективности управления культурой производственной безопасности в компаниях ТЭК // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 68–78. – DOI: 10.31897/PMI.2023.12.

3. Stanley Deetz, Ph. D. University of Colorado at Boulder Boulder, Colorado, USA. How to Build Strong Global Safety Culture in Practice. – URL : https://gnssn.iaea.org/NSNI/SC/WS_GSC/Presentations/28 %20Deetz_Stanley_Strong %20Global %20Safety %20Culture.pdf (дата обращения 19.09.2026).

4. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. – М. : Статистика, 1977 – 200 с.

УДК 666.291

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПИГМЕНТЫ ШПИНЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Барановская Екатерина Ивановна
Белорусский государственный технологический университет
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов
baranovskaya@belstu.by

Полховская Анастасия Олеговна
Белорусский государственный технологический университет
выпускница кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов

Аннотация. В настоящее время широко исследованы пигменты с кристаллическими решетками типа шпинели, корунда, циркона, граната. Их синтезируют при высоких температурах из оксидов и солей различных элементов. Такая технология делает керамические пигменты одним из наиболее дорогостоящих керамических материалов. Поэтому научно-исследовательские работы в области синтеза неорганических пигментов в последние годы направлены, главным образом, на расширение цветовой палитры и снижение энергозатрат. Основная сложность изготовления керамических красок – синтез пигментов, не теряющих цвета при высокой температуре, мало растворяющихся в высокотемпературном глазурном расплаве. Керамические материалы на основе корунда и шпинелей особенно востребованы в современной промышленности.

Ключевые слова: синтез, керамический пигмент, шпинель, калориметрические характеристики, чистота тона, доминирующая длина волны.

Актуальность исследований в области разработки составов и параметров синтеза высокотемпературных керамических пигментов на основе стабильных кристаллических структур обусловлена востребованностью керамических красок широкой цветовой палитры в фарфоро-фаянсовом производстве, а также в строительной отрасли. Из литературных и патентных источников известно, что наиболее устойчивыми и имеющими яркую окраску являются керамические пигменты шпинельного рода, группы гранатов и цирконового ряда. Актуальным направлением также является поиск новых путей снижения стоимости пигментов за счет совершенствования способов их получения и расширения сырьевой базы.

Шпинельные пигменты подразделяют на две группы: $X^{+2}Y_2^{+3}O_4$ и $X^{+2}Y_2^{+4}O$. Шпинельные пигменты $X^{+2}Y_2^{+3}O_4$ можно получать различными способами: прокаливанием смеси оксидов при температуре до 1700 °С, прокаливанием смеси оксидов в присутствии минерализаторов при температурах 1300–1350 °С, сплавлением соответствующих солей металлов с последующим прокаливанием смеси при температурах 1000–1200 °С, осаждением гидроксидов металлов из растворов солей и прокаливанием смеси при температурах 1000–1200 °С [1–2]. Особенностью шпинелей является легкость образования между собой твердых растворов [3–4]. Это обусловлено одинаковыми строениями кристаллического каркаса из анионов кислорода и сходством радиусов катионов металлов, элементы которых объединены в изоморфные ряды, определенные как ряды химических элементов, которые в природе дают изоморфные смеси аналогичных по химической формуле соединений. В работе [5] рассматривается синтез пигментов на основе шпинели $MgO – Al_2O_3$, в которой Al_2O_3 в эквимолекулярных количествах замещали на Cr_2O_3. Процесс образования пигментов данной системы завершается при 1300 ºС. Получены пигменты коричневого, оливкового и серовато-зеленого цвета. Установлено, что кислото- и щелочеустойчивость, а также стойкость пигментов к растворяющему действию флюсов и глазурей возрастает с увеличением молярного

содержания Cr_2O_3 в составе пигментов. При замене в системе $MgO – Al_2O_3$ оксида магния частично или полностью на оксид кобальта были получены пигменты шпинельного типа синего цвета.

Характерной особенностью шпинельных пигментов титанового и оловянного рядов является их большая кроющая способность и незначительная стойкость к растворяющему действию глазурей и флюсов при температуре выше 800 ºС. Но они хорошо действуют в легкоплавких надглазурных красках для фарфора и фаянса, а также в красках для стекла. Многие из этих красок отличаются высокой чистотой тона.

В качестве колориметрической системы, пригодной для однозначного числового выражения цвета, наибольшее распространение получила трехцветная система МКО (Международной комиссии по освещению). В основу этой системы положен тот факт, что аддитивным смешением трех выбранных основных видимых излучений можно возбудить зрительное восприятие любого цвета. Колориметрические количества этих излучений (координаты цвета) являются критерием, с помощью которого можно охарактеризовать любой цвет. [6–8]

В настоящей работе в качестве основных сырьевых материалов для синтеза керамических пигментов в системах $Al_2O_3 – Cr_2O_3$ были использованы: технический глинозем, оксид хрома и оксид цинка. С целью получения пигментов широкой цветовой гаммы и изучения хромофорных свойств пигментов при использовании различных видов модификаторов в смесь порошков исходных компонентов вводились оксиды ZnO, CaO. Выбор необходимого минерализатора осуществлялся из ряда соединений: ZnO, CaO, Li_2O, H_3BO_3.

Исходные компоненты тонко измельчали и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,001 г, просеивали через сито № 0056 (остаток на сите 0,5–1,0 %), тщательно перемешивали до однородного состояния и подвергали термообработке в электрической печи марки SNOL 6,7/1300 при температуре 1200 и 1250 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Допустимые отклонения температуры ±5 °С. При выходе за верхнюю границу фиксируется спекание шихты, что ухудшает дисперсность продукта. Снижение температуры до 1000 °С приводит к формированию пигментов с низким содержанием цветонесущей фазы, что подтверждается слабыми хромофорными свойствами. В рабочем диапазоне 1200–1250 °С получены порошки средней плотности, демонстрирующие насыщенную, яркую и однотонную окраску. Таким образом, поддержание заданного интервала является критическим параметром для обеспечения целевой интенсивности цвета и воспроизводимости свойств пигмента.

В зависимости от вида используемых оксидов в исследуемой системе были синтезированы пигменты розового, кофейного, сиреневого цветов.

Шихтовой состав розовых керамических пигментов оптимальных составов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Шихтовой состав керамических пигментов

Шифр состава	Содержание компонентов, мас. %			
	Cr_2O_3	Al_2O_3	ZnO	H_3BO_3 (сверх 100 %)
1н	5,0	95,0	–	3,0
2н	5,0	95,0	–	–
3н	10,0	65,0	25,0	3,0
4н	15,0	55,0	30,0	3,0
5н	20,0	55,0	25,0	3,0
6н	10,0	85,0	5,0	3,0
7н	5,0	75,0	20,0	3,0

Синтезированные пигменты оценивались визуально и для дальнейшего эксперимента отбирались составы, отличающиеся гомогенностью и яркостью окраски.

Для пигментов оптимальных составов исследованы хромофорные и физико-химические свойства. В работе определены основные колориметрические характеристики и доминирующая длина волны (таблица 2).

Таблица 2 – Колориметрические характеристики розовых пигментов

Шифр состава	Координаты цвета		Колориметрические характеристики			Цвет пигмента	Доминирующая длина волны, нм
	X	Y	L	a	b		
1н	7,0404	7,0153	32,0442	0,8726	–1,0498	Светло-кофейный	584
2н	6,9673	6,9236	31,8774	1,0560	0,4365	Розовый	577
3н	6,8768	6,8891	31,6692	0,5005	–0,3291	Розовый	584
4н	7,5893	7,5243	33,2617	1,2489	–0,9396	Сиренево-розовый	581
5н	7,0227	6,9656	32,0040	1,1878	–1,2022	Сиренево-розовый	580
6н	7,3841	7,3499	32,8137	0,9615	–1,7259	Сиренево-розовый	581
7н	8,2238	8,1983	34,5979	0,8854	–1,9209	Светло-розовый	577

Чистота тона керамических пигментов служит количественной колориметрической характеристикой для оценки насыщенности цвета и степени отклонения от эталонного цветового тона, что необходимо для контроля стабильности рецептур и режимов обжига. Расчет чистоты цвета (колориметрической частоты Р) производили по координатам цветности в системе трехцветных координат МКО и определяли расстояние от точки белого цвета (координаты $x_w = 0,3127$; $y_w = 0,3290$) до точки синтезированного пигмента относительно края спектральных цветов.

Значения чистоты тона для синтезируемых образцов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Чистота тона керамических пигментов

Шифр состава	Чистота тона, %
1н	24,6
2н	28,3
3н	25,7
4н	25,8
5н	25,0
6н	24,0
7н	23,9

В системе Al_2O_3 – Cr_2O_3 синтезированы пигменты, представляющие собой окрашенные корунды, характер кривых поглощения света которых аналогичен соответствующим кривым естественных рубинов. Введение добавки минерализатора – борной кислоты, приводит к увеличению показателя преломления и интенсивности окраски пигментов. Устойчивость пигментов при их использовании в составах подглазурной и надглазурной красок также возрастает.

Значения химической устойчивости керамических пигментов находятся в непосредственной зависимости от их фазового состава. Максимальной стойкостью к действию химических реагентов обладают пигменты с высоким содержанием оксида хрома.

Установлено, что разработанные составы керамических пигментов шпинельной структуры отличаются яркостью и насыщенностью окраски, устойчивостью к растворяющему действию глазурей и могут быть использованы в составах подглазурных и надглазурных красок.

Список литературы:

1. Пищ И.В. Керамические пигменты / И.В. Пищ, Г.Н. Масленникова. – Минск : БГТУ, 2005. – 236 с.

2. Акунова Л.Ф. Материаловедение и технология производства художественных керамических изделий / Л.Ф. Акунова, С.З. Приблуда. – М. : Высшая школа, 1979. – 216 с.

3. Третьяков Ю.Д. Твердофазные реакции Ю.Д. Третьяков. – М. : Химия, 1978. – 341 с.

4. Будников П.П. Реакции в смесях твердых веществ / П.П. Будников, А.М. Гинстлинг. – М. : Стройиздат, 1968. – 455 с.

5. Шпинельные пигменты, устойчивые к глазурным расплавам / Н.И. Русс, К.К. Квятковская, Р.Ю. Азаров [и др.] // Стекло и керамика. – 1988. – № 6. – С. 23–25.

6. Eppler R.A. Mechanism of Formaction of Zircon Steins // J. Amer Ceram. Soc. – 1970. – № 53 (8). – P. 457–462.

7. Джадд Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М. : Мир, 1978. – 147 с.

8. Eppler R.A. Zirconia – Based Colours for Ceramic Glases // J. Amer. Ceram. Soc. Bull. – 1977. – № 56 (2). – P. 213–215.

УДК 628.3

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ (КОС) Г. ДУШАНБЕ

Бобоев Х.Б. — **Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Республика Таджикистан**
канд. техн. наук, и.о. доцент кафедры «БЖД и Э»

Назруллоева А.А. — **Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ, Республика Таджикистан**
докторант (PhD) 2-го курса

Аннотация. В статье проанализирована действующая технология очистки сточных вод (далее СВ) на предприятии ГУП «Обу корези Душанбе», техническое состояние сооружений и оборудования, выявлены причины, которые мешали достигать требуемого уровня очистки воды, в результате чего предложен комплекс мероприятий по реконструкции (оптимизации) работы очистных сооружений, с целью повышение качества очистки стоков до установленных нормативов.

Ключевые слова: технология, сточные воды (СВ), очистка воды, очистные сооружения, реконструкциия.

Большинство действующих очистных сооружений по всей стране используют технологически сильно устаревшие методы и технологии очистки сточных вод (далее СВ), которых не позволяют должным образом очищать поступающие стоки. В связи с этим становится актуальной необходимость применения наиболее современных и научно-обоснованных технологий, которые позволяли бы добиться соответствия качества выпускаемой СВ установленным требованиям [1, 2].

Актуальность работы заключается в том, что, очистка СВ является одной из важнейших задач, решение которой влияет на качество окружающей среды и здоровья населения. Поэтому, причин недостаточного очищения СВ и определение наиболее эффективных технологических решений по очистке является целью работы.

Объект исследования: канализационные очистные сооружения ГУП «Обу корези Душанбе».

Предмет исследования: технического состояния и эффективность работы очистных сооружений предприятия ГУП «Обу корези Душанбе».

Цель работы:

– произвести анализ технического состояния канализационных очистных сооружений г. Душанбе;

– рассмотреть комплекс мероприятий по оптимизации, реконструкции существующих канализационных очистных сооружений, с целью снижения концентраций загрязняющих веществ в стоках и достижение степени очистки до предельно допустимых концентраций (ПДК). Методологической основой работы является теоретические методы, основанные на анализе научно-методической литературы.

Для организации процессов очистки производственных, поверхностных, бытовых СВ в г. Душанбе был построен комплекс очистных сооружений (рисунок 1).

Объект введен в эксплуатацию в 1972 г. Проектная мощность составляет 131 тыс. м³/сут. Согласно технологическому регламенту ежесуточно на городских канализационных очистных сооружениях обрабатываются более 67,3 тыс. м³ хозяйственно-бытовых, производственных и ливневых СВ, подающихся на очистку по общесплавной системе водоотведения, а фактические объемы образования осадков СВ достигают 10 тыс. т/год. После 90-х гг. техническое состояние канализационное очистное сооружение (КОС) г. Душанбе резко ухудшилось [3–5].

Канализационные очистные сооружения (КОС) г. Душанбе принимают сточные воды со всего города. КОС строились в три очереди:

– первая мощность – 120 тыс. м³/сут, введена в эксплуатацию в 1965–1969 годах;

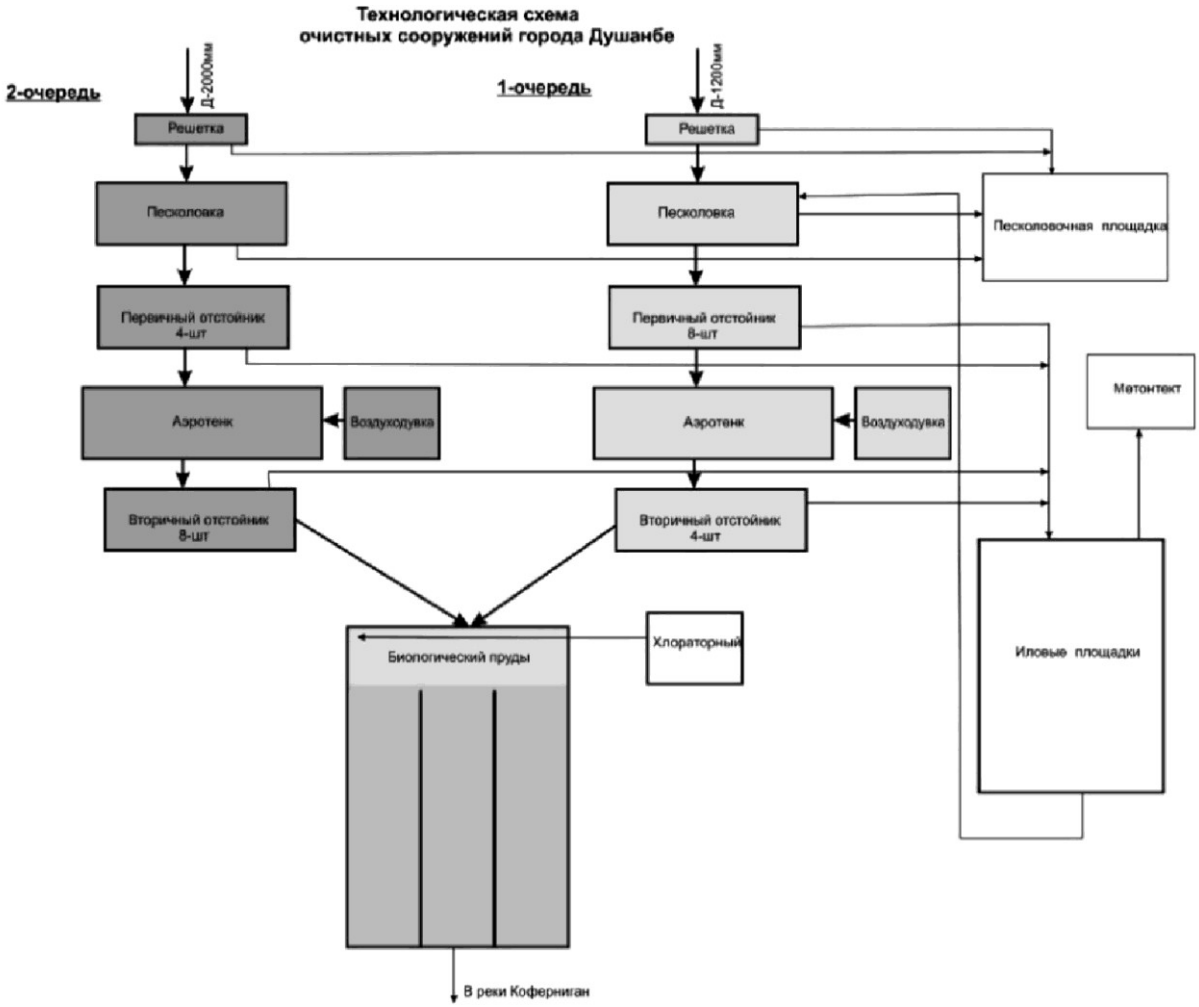


Рисунок 1 – Технологическая схема КОС г. Душанбе

– вторая мощность –164,5 тыс. м³/сут, введена в эксплуатацию в 1976-1984 годах;

– третья мощность – 215,5 тыс. м³/сут, строительство не завершено. Было введено только 10 тыс. м³/сут. мощности. Общая проектная мощность составил бы 500 тыс. м³/сут. В данный момент общая мощность КОС составляет 294,5 тыс. м³/сут. На КОС предусмотрена механическая очистка, полная биологическая очистка и доочистка в биологических прудах.

В состав сооружений входят:

– механизированные решетки;

– песколовки (аэрируемая горизонтально-прямоточная и с круговым движением воды); - первичные и вторичные радиальные отстойники;

– биологические пруды. Для обработки осадки предусмотрены:

– илоуплотнители;

– илоперегниватели;

– иловые площадки.

Анализ состояния КОС показывает, что в основном работают как отстойники и они сильно заилены. Техническое состояние комплекса механической очистки (решеток, песколовок, отстойников) и состояние аэротенков – неудовлетворительное. Присутствует физический износ оборудования. В процессе ознакомления и изучения материалов установлено, что часть оборудования находится в нерабочем состоянии, а часть оборудования отсутствует. Не обеспечиваются условия для интенсивной работы аэротенков, наблюдается неравномерная аэрация. Не эффективно работает биологическая очистка и поэтому низкий эффект очистки. За последнее 20 лет не производились капитальные ремонтные работы, износ самих сооружений составляет от 70 до 100 % и часть которого не подлежит ремонту, требует полной замены. Доочистка сточ-

ных вод осуществляется на биопрудах, которые заполнены осадком. Поэтому, для повышения эффективности очистки городских стоков нужна незамедлительная реконструкция следующих сооружений: блока механической очистки, блока доочистки, сооружений биологической очистки [3–5]. По вышеупомянутым причинам канализационные очистные сооружения не в состоянии выполнять эффективно очистка стоков до проведения капитального ремонта и замена оборудования, которые требуют значительных материальных затрат финансов. При комплексном подходе, особый акцент следует сделать на этапности проведения работ (рисунок 2) [6].

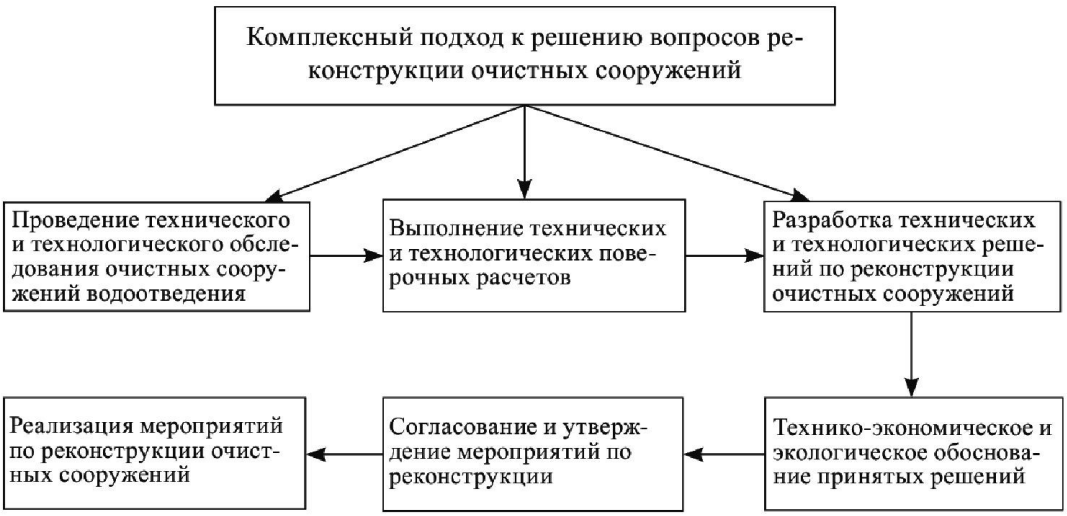


Рисунок 2 – Этапы проведения работ по реконструкции КОС

Проведение мероприятий по оптимизации (реконструкции) очистных сооружений позволит добиться более высокой степени очистки СВ, повышения энергоэффективности работы очистных сооружений, выполнить замену изношенного устаревшего технологического оборудования, восстановить строительные конструкции очистных сооружений. Для обоснования рекомендаций по выполнению реконструкции существующих очистных сооружений, требуется выполнение поверочных расчетов, с целью определения пропускной способности очистных систем и сооружений. Очистные сооружения после реконструкции имеют более высокую эффективность биологической очистки.

Заключение. Канализационные очистные сооружения г. Душанбе нуждаются в усовершенствовании и реконструкции до современных, такое длительное время эксплуатации привело к большому износу, а также их проектная мощность ниже, чем необходимо в данный момент, так как население г. Душанбе выросло.

Список литературы:

1. Большакова Н.Ю. Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2021. – С. 112.
2. Жмур Н.С. Технологические и биологические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М. : АКВАРОС, 2003. – 512 с.
3. Муродов П., Амиров О., Хужаев П.С. Очистка реки Кафирниган от загрязнений сточными водами // Бюллетень науки и практики. – 2020. – Т. 6. – № 11. – С. 126–131.
4. Катаганова Г.Б., Амирзода О.Х., Кобулиев З. Защита водных объектов от загрязнения сточными водами (на примере реки Кафирниган) // Сучасний рух науки: тези доп. XI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 8-9 жовтня 2020 р. – Дніпро, 2020. – Т. 2. – С. 55.
5. Ниёзов Ф.Р., Бобоев Х.Б., Кобули З.В. Оценка технологической эффективности работы КОС г. Душанбе // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – 2021. – № 1 (53). – С. 62–66.
6. Гогина Е.С. Подходы к созданию методологии реконструкции очистных сооружений // Вестник МГСУ. – № 10. – С. 199–205.

УДК 541.14

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ КОНСТАНТ ЗАТУХАНИЯ λj КАК ИНСТРУМЕНТ ДИАГНОСТИКИ КАТАЛИЗАТОРОВ И ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА СИНТЕЗА ФИШЕРА-ТРОПША

Вертепа Анастасия Вячеславовна
Казанский национальный исследовательский технологический университет
заведующий лабораторией кафедры общей химической технологии
anastasiya.v.95@mail.ru

Терещенко Константин Алексеевич
Казанский национальный исследовательский технологический университет
д-р хим. наук, профессор кафедры общей химической технологии
nucleurmind@yandex.ru

Улитин Николай Викторович
Казанский национальный исследовательский технологический университет
д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой общей химической технологии
ulitinnv@corp.knrtu.ru

Аннотация. Проведен анализ спектров констант затухания λ_j, полученных при аппроксимации 76 экспериментальных молекулярно-массовых распределений продуктов синтеза Фишера-Тропша универсальным уравнением, представляющим собой сумму экспоненциально затухающих компонент. Показано, что средние значения λ_j чувствительны к типу металла катализатора (Fe, Co), температуре, давлению, соотношению H_2/CO и конверсии CO. Установлено, что для Fe-катализаторов средние значения λ_j ниже, чем для Co-катализаторов, что согласуется с большей склонностью Fe к удлинению цепи. С ростом давления средние λ_j уменьшаются, а с увеличением конверсии CO – возрастают. Предложена физико-химическая интерпретация шести стадий, соответствующих компонентам спектра λ_j. Показано, что анализ спектров λ_j позволяет идентифицировать количество стадий, влияющих на реакционную способность растущей цепи, и может быть использован для направленного управления селективностью процесса.

Ключевые слова: синтез Фишера-Тропша, молекулярно-массовое распределение, константы затухания, спектр λ_j, катализатор, селективность, кинетическая модель.

Синтез Фишера-Тропша (СФТ) представляет собой каталитический процесс превращения синтез-газа (CO и H_2) в смесь углеводородов и кислородсодержащих соединений [1]. Молекулярно-массовое распределение (ММР) продуктов СФТ определяет их практическую ценность и экономическую эффективность процесса. Классическая модель Андерсона-Шульца-Флори (АШФ) предполагает единственный тип активных центров и постоянную вероятность роста цепи α, однако многие экспериментальные ММР демонстрируют систематические отклонения от этой модели [2]. В работах [1, 2] показано, что отклонения связаны с полицентровостью катализатора, вторичными реакциями и изменением реакционной способности растущей цепи.

Поскольку классическое распределение Андерсона-Шульца-Флори не описывает многие экспериментальные ММР продуктов СФТ, а общая теория, учитывающая изменение реакционной способности растущей цепи, до сих пор не построена, в настоящей работе для описания ММР использовано универсальное уравнение, полученное на основе представления роста цепи как марковского процесса с множеством возвратных состояний. Это уравнение имеет вид суммы экспоненциально затухающих компонент:

$$\frac{g_{q,n}}{n} \square \quad , \quad \underline{\underline{J}}_{j=1} A_{q,j} e^{-\lambda_j n} , \qquad (1)$$

где $g_{q,n}$ – это массовая доля q-го продукта (например, парафинов, олефинов, спиртов) среди всех продуктов, содержащих n атомов углерода, n – число атомов углерода, P – вектор вероятностей возвратных состояний, A_j – амплитуды, λ_j – константы затухания, J – количество компонент.

Каждая компонента соответствует отдельной стадии, влияющей на реакционную способность растущей цепи. Целью настоящей работы является анализ спектров констант затухания λ_j, полученных при аппроксимации 76 экспериментальных ММР, и выявление корреляций между средними значениями λ_j и условиями процесса.

Экспериментальные ММР продуктов СФТ аппроксимировались уравнением (1) с использованием двух численных алгоритмов. Алгоритм 1 основан на сегментации кривой ln g_n/n от n по локальным наклонам с последующим определением λ_j как средних наклонов сегментов. Алгоритм 2 дополнительно нормирует ось n к отрезку [0, 1] и минимизирует расхождение в логарифмическом масштабе с помощью итеративного метода наименьших квадратов. Для каждого из 76 экспериментальных ММР определялись значения J, A_j и λ_j.

Для анализа влияния условий процесса на спектры λ_j использовались следующие параметры: тип металла катализатора (Fe или Co), температура T (K), давление P (МПа), соотношение H_2/CO, конверсия CO (%). Для каждого экспериментального ММР вычислялось среднее значение λ_j по всем компонентам. Затем строились зависимости средних λ_j от указанных параметров.

На рисунке 1 представлены зависимости средних значений λ_j от температуры T, давления P, соотношения H_2/CO и конверсии CO для 76 экспериментальных ММР. Красными точками обозначены данные для Fe-катализаторов, синими – для Co-катализаторов.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 1, позволил установить следующие тенденции.

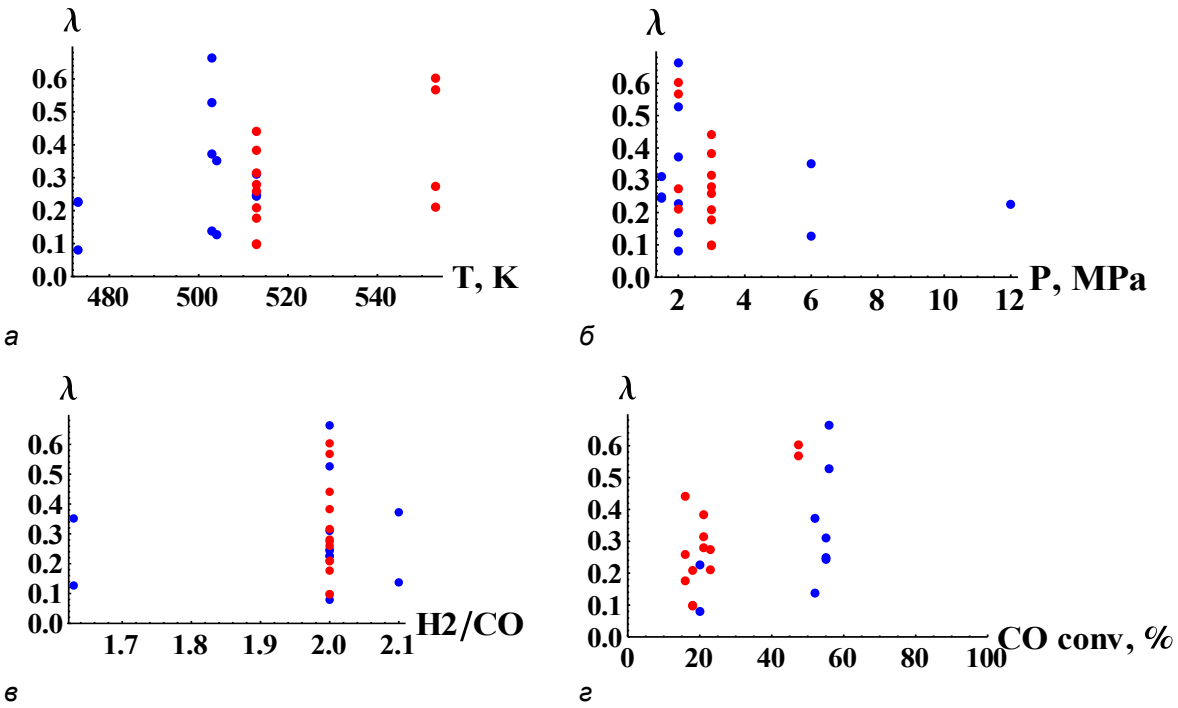


Рисунок 1 – Влияние температуры процесса T (а), давления процесса P (*б*), соотношения реагентов [H_2]/[CO] (в), конверсии CO (г) на средние значения λ_j в спектрах, полученных в результате аппроксимации экспериментальных ММР продуктов синтеза Фишера-Тропша

1. Влияние типа металла катализатора. Средние значения λ_j для Fe-катализаторов (красные точки) в среднем ниже, чем для Co-катализаторов (синие точки). Это согласуется с общепринятыми представлениями о различии этих металлов [2]. На Fe-катализаторах активные центры обладают большей склонностью к удлинению углеводородной цепи, чему способствуют вторичные реакции реадсорбции олефинов и особенности строения карбидных фаз. В результате вероятность роста цепи на Fe выше, распределение продуктов смещается в сторону тяжелых фракций, а затухание слагаемых в уравнении (1) становится более медленным, что дает меньшие значения λ_j. На Co, напротив, гидрирующая активность выше, цепь чаще обрывается, и слагаемые в уравнении (1) быстрее затухают, что проявляется в более высоких значениях λ_j.

2. Влияние температуры. С увеличением температуры T средние значения λ_j возрастают. Это объясняется тем, что повышение температуры увеличивает скорость обрыва цепи в большей степени, чем скорость роста, что приводит к уменьшению средней молекулярной массы продуктов и более быстрому затуханию компонент. Кроме того, при высоких температурах возрастает роль побочных реакций, в том числе образование метана, что также способствует увеличению λ_j.

3. Влияние давления. С увеличением давления P средние значения λ_j уменьшаются. Рост давления увеличивает концентрацию реагентов (CO и H_2) на поверхности катализатора, что благоприятствует продолжению роста цепи. Кроме того, высокое давление может стабилизировать растущие интермедиаты и затруднять их десорбцию, которая является одним из основных путей обрыва. В результате эффективная вероятность роста цепи возрастает, ММР становится более пологим, и среднее значение λ_j уменьшается. Этот эффект наблюдается как для Co, так и для Fe катализаторов.

4. Влияние соотношения H_2/CO. С увеличением соотношения H_2/CO средние значения λ_j возрастают. Это связано с тем, что избыток водорода способствует гидрированию растущей цепи и ее обрыву с образованием парафинов, что снижает среднюю молекулярную массу продуктов. При низких соотношениях H_2/CO преобладает β-элиминирование, приводящее к образованию олефинов, которые могут реадсорбироваться и встраиваться в растущую цепь, увеличивая эффективную вероятность роста.

5. Влияние конверсии CO. С увеличением конверсии CO происходит рост средних значений λ_j. По мере того как реагенты превращаются в продукты, в реакционной среде падает парциальное давление CO и H_2, что снижает отношение скорости роста цепи к скорости ее обрыва. В результате ММР становится более крутым, а среднее значение λ_j увеличивается. Таким образом, высокая конверсия CO, хотя и желательна с точки зрения производительности, ведет к снижению средней молекулярной массы продуктов синтеза.

В настоящей работе установлено, что в среднем для описания ММР продуктов СФТ требуется шесть компонент. Каждой компоненте соответствует определенная стадия, влияющая на реакционную способность растущей цепи. В таблице 1 приведена физико-химическая интерпретация этих стадий.

Таблица 1 – Стадии, соответствующие компонентам спектра λ_j

№	Стадия	Физико-химический смысл	Относительная величина λ_j
1	Краевой эффект ММР	Переход от реакционной способности мономера C_1 к таковой для растущей цепи; объясняет аномально высокое содержание CH_4 и пониженное C_2H_6, C_2H_4	максимальная
2	Изменение строения концевого звена	Переход алкил → алкенил или изо-структура, меняющий доступность концевой связи для следующей встройки мономера	высокая
3	Перестройка активного центра	Динамическое изменение локального окружения металлического центра под влиянием адсорбированных молекул (CO, H_2O)	средняя
4	Десорбция/реадсорбция	Отрыв цепи от поверхности и ее повторная адсорбция на другом активном центре, реинициирование	средняя
5	Стерические затруднения	Замедление адсорбции CO и H_2 вблизи активного центра при увеличении длины цепи	низкая
6	Обрыв цепи	Необратимая десорбция продукта, окончательная деактивация цепи	минимальная

Как видно из таблицы 1, компоненты с высокими значениями λ_j отвечают за короткоживущие промежуточные состояния или быстрые стадии, а компоненты с низкими λ_i отражают более длительные процессы. Вклад каждой стадии в кинетику роста цепи определяется ее амплитудой A_j.

С практической точки зрения анализ спектра λ_j позволяет идентифицировать количество стадий, что дает представление о сложности механизма роста цепи. Сравнение спектров λ_j для разных катализаторов позволяет объективно судить об изменении активности или селективности катализатора при модификации его состава. Оценка чувствительности спектров к изменению условий процесса (температуры, давления, соотношения реагентов) позволяет осуществлять поиск оптимальных режимов проведения синтеза Фишера-Тропша.

Предложенная методология может быть использована для прогнозирования ММР продуктов СФТ на основе параметров катализатора и условий реакции, что является важным шагом к созданию цифровых двойников каталитических процессов. Анализ средних значений λ_j является простейшим типом анализа спектра λ_j; более детальный анализ спектров на основе других статистических характеристик в дальнейшем может позволить установить дополнительные корреляции с условиями синтеза.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Молекулярный дизайн катализаторов с применением искусственного интеллекта», соглашение № 075-00021-26-00.

Список литературы:

1. Recent development in heavy paraffin synthesis from CO and H_2 / O.L. Eliseev, A.P. Savost'yanov, S.I. Sulima [et al.] // Mendeleev Communications. – 2018. – Vol. 28. – № 4. – P. 345–351.

2. Fischer-Tropsch: Product selectivity – The fingerprint of synthetic fuels / W.D. Shafer, M.K. Gnanamani, U.M. Graham [et al.] // Catalysts. – 2019. – Vol. 9. – № 3. – P. 259.

УДК 541.14

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОЛЕКУЛЯРНО-МАССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОДУКТОВ СИНТЕЗА ФИШЕРА-ТРОПША КАК МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛИЦЕНТРОВОСТИ КАТАЛИЗАТОРА

Вертепа Анастасия Вячеславовна
Казанский национальный исследовательский технологический университет
заведующий лабораторией кафедры общей химической технологии
anastasiya.v.95@mail.ru

Терещенко Константин Алексеевич
Казанский национальный исследовательский технологический университет
д-р хим. наук, профессор кафедры общей химической технологии
nucleurmind@yandex.ru

Улитин Николай Викторович
Казанский национальный исследовательский технологический университет
д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой общей химической технологии
ulitinnv@corp.knrtu.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке метода идентификации полицентровости гетерогенных катализаторов на основе спектрального анализа экспериментальных молекулярно-массовых распределений (ММР) продуктов синтеза Фишера-Тропша. Показано, что ММР может быть представлено в виде суммы экспоненциальных мод, число и параметры которых отражают кинетические характеристики активных центров. Предложен алгоритм совместной аппроксимации ММР различных гомологических рядов (парафинов, олефинов, кислородсодержащих соединений) с единым набором констант затухания λ_j. Введена мгновенная константа затухания, позволяющая визуализировать иерархию релаксационных процессов. На примере трех экспериментальных ММР показано, что анализ спектра λ_j дает количественную оценку степени иерархичности и изолированности состояний растущей цепи, что может быть использовано для классификации полицентровых катализаторов.

Ключевые слова: синтез Фишера-Тропша, полицентровый катализатор, молекулярно-массовое распределение, спектральный анализ, константы затухания, иерархическое квазиравновесие.

Синтез Фишера-Тропша (СФТ) – один из важнейших процессов получения синтетических углеводородов из синтез-газа. Молекулярно-массовое распределение (ММР) продуктов СФТ служит важнейшей характеристикой, определяющей их потребительские свойства. Классическое распределение Андерсона-Шульца-Флори (АШФ) часто не описывает экспериментальные данные: на линеаризованных зависимостях $\ln(g_n/n)$ от n (где g_n – массовая доля фракции с n атомами углерода; для АШФ эта зависимость линейна, а ее наклон определяется вероятностью роста цепи α) наблюдаются изломы, аномалии в области CH_4 и C_2, а параметр α различается для разных гомологических рядов [1]. Одной из главных причин отклонений является полицентровость катализатора – наличие множества активных центров, различающихся константами роста и обрыва цепи [2]. Для целенаправленного управления составом продуктов необходимо уметь количественно идентифицировать полицентровость, то есть определять число типов центров и их кинетические характеристики. В настоящей работе предлагается подход, основанный на спектральном анализе экспериментальных ММР, который позволяет извлекать информацию о кинетических модах непосредственно из формы распределения.

Ранее рост цепи в СФТ был описан цепью Маркова с несколькими возвратными состояниями, различающимися реакционной способностью. Вектор вероятностей нахождения растущей цепи в этих состояниях $P(n)$ подчиняется уравнению:

$$\frac{dP}{dn} = pP - P = \left(p - E\right)P, \tag{1}$$

где p – матрица переходных вероятностей, E – единичная матрица. Решение (1) имеет вид суммы экспонент:

$$P_q = \sum_{j=1}^{J} A_{q,j} e^{-\lambda_j n},\ \lambda_j \geq 0. \tag{2}$$

Массовая доля q-го продукта пропорциональна $P_{q,n}$, поэтому обобщенное ММР записывается как:

$$\frac{g_{q,n}}{n} = \sum_{j=1}^{J} A_{q,j} e^{-\lambda_j n}. \tag{3}$$

Уравнение (3) является универсальным: при $J = 1$ оно переходит в распределение Флори, а распределение АШФ – его предельный случай для длинных цепей. Число мод J соответствует числу независимых релаксационных процессов в системе. Константы затухания λ_i равны по модулю собственным числам кинетической матрицы (p-E) и характеризуют скорости установления квазиравновесий между состояниями. Если спектр λ_i строго иерархичен ($|\lambda_1| \gg |\lambda_2| \gg \ldots \gg |\lambda_J|$), то реализуется иерархическое квазиравновесие: быстрые моды затухают раньше, и при больших n все состояния сливаются в одно эффективное. Если же переходы между состояниями запрещены (изолированные состояния), каждая мода соответствует независимому распределению Флори.

Экспериментальные ММР продуктов СФТ аппроксимировались уравнением (3). Ключевая особенность методики – совместная аппроксимация кривых для разных гомологических рядов (парафинов, олефинов, кислородсодержащих соединений), поскольку они образуются на одних и тех же активных центрах и должны характеризоваться единым набором констант затухания λ_j. Алгоритм включал следующие этапы.

Задание числа мод J (перебор от 2 до 5) и начальных приближений λ_j. В качестве начальных значений использовались характерные константы, установленные нами ранее при рассмотрении катализаторов в приближении моноцентровости: 0.01, 0.1, 0.2, 1.0, 2.0.

Оптимизация λ_j и амплитуд $A_{q,j}$. Целевая функция включала сумму квадратов отклонений логарифмов экспериментальных и расчетных значений g/n, а также штраф за нарушение иерархичности спектра:

$$\sum_{q}^{Q}\sum_{n}^{N}\left(\ln\left(g_{q,n}/n\right) - \ln\sum_{j=1}^{J} A_{q,j} e^{-\lambda_j n}\right)^2 + P\cdot\max\left(0, 0.2 - \min\left(\frac{\lambda_{j+1} - \lambda_j}{\lambda_j}\right)\right)^2 \to \min, \tag{4}$$

Определение амплитуд $A_{q,j}$ методом наименьших квадратов при фиксированных λ_j.

Оценка качества аппроксимации по коэффициенту детерминации R^2. Из решений с $R^2 \geq 0.9$ выбиралось решение с наименьшим J.

Для анализа поведения спектра вводилась мгновенная константа затухания:

$$\tilde{\lambda}_n = \frac{\left|\partial \ln\left(\sum_{j=1}^{J} A_{q,j} e^{-\lambda_j n}\right)\right|}{\partial n}. \tag{5}$$

Если λ_n стремится к постоянному значению, в данной области n доминирует одна мода; немонотонное поведение λ_n указывает на конкуренцию нескольких мод.

Методика апробирована на трех экспериментальных ММР продуктов СФТ, полученных на катализаторах Co/Al_2O_3, Co/Al_2O_3 (коммерческий) и Co/TiO_2. Условия синтеза и источники данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия получения экспериментальных ММР и результаты аппроксимации

№	Катализатор	T, K	P, МПа	H_2/CO	J	R^2
1	Co/Al_2O_3	503	2.0	2.0	5	0.976
2	Co/Al_2O_3 (комм.)	503	2.0	2.1	3	0.981
3	Co/TiO_2	504	6.0	1.6	5	0.991

Для всех трех распределений коэффициент детерминации превысил 0.97, что свидетельствует о высокой точности уравнения (3). Число мод J оказалось различным: для катализаторов № 1 и № 3 потребовалось $J = 5$, для катализатора № 2 – $J = 3$.

Анализ мгновенной константы затухания (5) выявил качественно различные картины. Для катализатора № 1 кривые λ_n для парафинов, олефинов и кислородсодержащих соединений не выходят на общее плато и демонстрируют немонотонное поведение, что говорит об отсутствии строгой иерархии времен релаксации. Для катализатора № 2 кривые для парафинов и кислородсодержащих соединений стремятся к одной минимальной константе $\lambda_3 = 0.131$, а для олефинов – к $\lambda_2 = 0.604$, что указывает на частичную иерархию. Наиболее ярко иерархическое квазиравновесие проявляется для катализатора № 3: кривые λ_n для всех четырех продуктов (парафинов, олефинов, кислородсодержащих соединений и аминов) асимптотически стремятся к одной и той же минимальной константе $\lambda_5 = 0.198$. Это означает, что при больших n все состояния растущей цепи сливаются в одно эффективное, и ММР стремится к единому распределению Флори.

Таким образом, полученные результаты позволяют количественно охарактеризовать полицентровость катализатора.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Молекулярный дизайн катализаторов с применением искусственного интеллекта», соглашение № 075-00021-26-00.

Список литературы:

1. Glebov L.S., Kliger G.A. The molecular weight distribution of the products of the Fischer-Tropsch synthesis // Russian Chemical Reviews. – 1994. – Vol. 63. – № 2. – P. 185–195.

2. Dry M.E. FT Catalysts // Fischer-Tropsch Technology. Studies in Surface Science and Catalysis. Amsterdam: Elsevier. – 2004. – Vol. 152. – P. 533–600.

УДК 66.07

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ АДСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ И ОЧИСТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Гужель Юлия Александровна

Амурский государственный университет
канд. техн. наук, доцент
G-Yuliy-85@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена разработке верифицированной математической модели установки адсорбционной осушки и очистки природного газа от ртути, предназначенной для подготовки сырьевого газа к низкотемпературному разделению. В составе установки рассмотрены блоки осушки с комбинированной загрузкой адсорбента, демеркуризации на активированном серой адсорбенте, регенерации адсорбентов и вспомогательные системы. Моделирование выполнено в среде Aspen HYSYS с учётом компонентного состава газа, термобарических условий (давление 7,2–7,6 МПа, температура адсорбции 15 °C, регенерации 230 °C) и циклического режима работы адсорберов. Верификация модели проводилась путем сопоставления расчетных данных с проектными и эксплуатационными параметрами газоперерабатывающего завода. Установлено хорошее согласие по компонентному составу, остаточному содержанию влаги и метанола, давлениям, температурным режимам и материальному балансу. Результаты подтверждают адекватность модели для описания стационарных режимов и её пригодность для оптимизационных расчетов.

Ключевые слова: очистка газа, осушка, природный газ, модель, технологический процесс.

Подготовка природного газа к низкотемпературному разделению предъявляет жесткие требования к содержанию примесей: остаточная влага не должна превышать 0,1 ppmv, метанол – 10 ppmv, ртуть – 0,01 мкг/м³, механические примеси – 0,001 г/ст. м³ [1, 2]. Превышение этих норм приводит к замерзанию гидратов, коррозии оборудования, отравлению катализаторов и загрязнению товарной продукции. Наиболее эффективным и широко применяемым методом глубокой осушки и очистки от ртути является адсорбция на твердых сорбентах. Однако сложность процессов массо- и теплопереноса, циклический режим работы адсорберов (адсорбция – регенерация – охлаждение) и многофакторная зависимость от состава газа, давления и температуры делают экспериментальную отработку режимов дорогостоящей и длительной.

В связи с этим всё большее значение приобретает математическое моделирование, позволяющее прогнозировать поведение установки, проверять сценарии при различных возмущениях, оптимизировать продолжительность стадий и минимизировать энергозатраты. Современные симуляторы, такие как Aspen HYSYS, предоставляют широкие возможности для расчёта фазовых равновесий, адсорбционных изотерм и гидравлики слоя, однако требуют тщательной настройки и верификации на реальных промышленных данных.

Целью настоящей работы является разработка верифицированной математической модели установки адсорбционной осушки и очистки от ртути, адекватно описывающей стационарные режимы действующего газоперерабатывающего завода. Объектами моделирования выбраны адсорберы с комбинированной загрузкой, блоки демеркуризации, фильтры-сепараторы и рекуперативные теплообменники. В качестве инструмента использован пакет Aspen HYSYS, а верификация проведена сравнением расчетных параметров с проектными и регламентными данными. Достоверность модели позволяет в дальнейшем применять ее для оптимизации технологических режимов и повышения энергоэффективности установки.

Сырьевой газ под давлением 7,2–7,6 МПа поступает на фильтры-сепараторы для удаления механических примесей, капельной влаги, метанола и жидких углеводо-

родов. После подогрева до 15–45 °С паром низкого давления газ направляется в адсорберы осушки (4 аппарата, работающие попеременно: 2 – на адсорбции, 1 – на регенерации, 1 – на охлаждении). Адсорбция ведется в течение 12 часов, после чего сорбент регенерируется. Регенерация адсорбентов осуществляется прямым газом регенерации, который нагревается до 230 °С, и подаётся снизу вверх в регенерируемый адсорбер. Насыщенный влагой и метанолом отходящий газ охлаждается, конденсат отделяется в сепараторе, после чего газ выводится с установки.

Осушенный газ поступает в адсорбер удаления ртути, где элементарная ртуть химически связывается серой с образованием стабильного HgS. Адсорбент не регенерируется, по окончании срока службы – регенерируется. Далее газ очищается от цеолитовой пыли на фильтрах-сепараторах и направляется на последующие стадии переработки [3, 4].

Исходными данными для моделирования служат компонентный состав сырьевого газа (метан 84,20 % об., этан 4,00 % об., пропан 1,40 % об., бутаны 0,4 % об, азот 7,60., гелий 0,4 % об. и др.); содержание влаги (до насыщения при данных условиях), метанола (180,0 мг/кг) и ртути (следовые концентрации); мольный расход 500 000 м^3/ч; продолжительность стадии адсорбции – 12 ч, десорбции – 6 ч, охлаждения – 6 ч.

Спецификация схемы в части содержания ее материальных потоков приведена в форме таблицы 1.

Таблица 1 – Материальные потоки модели установки

№	Материальный поток
1,2	Сырьевой природный газ
3,4	Осушенный природный газ после стадии адсорбции
5	Осушенный газ, поступающий в блок очистки от ртути
6	Осушенный газ, поступающий в блок очистки от ртути, отделенный от цеолитной пыли
7,11,18, 32	Цеолитная пыль
8	Осушенный и очищенный природный газ
9	Отработанный адсорбент
10	Очищенный и осушенный газ на границу установки
12	Газ регенерации прямой
13	Газ регенерации прямой нагретый
14	Газ регенерации после стадии охлаждения
15, 28, 29, 30, 31	Водно-метанольная смесь
16	Охлажденный газ регенерации прямой
17	Газ регенерации прямой, отделенный от цеолитной пыли
19	Газ регенерации прямой на огневой подогреватель
20	Газ регенерации обратный
21	Газ регенерации обратный охлажденный
22	Газ регенерации обратный после стадии регенерации
23	Газ регенерации обратный, отделенный от цеолитной пыли
24	Газ регенерации обратный охлажденный
25	Газ регенерации обратный после АВО
26	Газ регенерации обратный на сепарацию
27	Газ регенерации обратный на границу установки

Параметры реализуемых на установке процессов приведены в таблице 2.

Для построения математической модели применены стандартные модули библиотеки: сепараторы (для удаления капельной жидкости и механических примесей), теплообменники (рекуперативные и подогреватели), адсорберы, реализованные как ступени равновесного контакта с заданными изотермами адсорбции (по воде – изотерма Ленгмюра

Таблица 2 – Параметры технологического режима

Технологический параметр	Значение
Температура в адсорбере А-1, А-2	15 °С
Давление в адсорбере А-1, А-2	7,3 МПа
Температура в адсорбере Р-1	230 °С
Давление в адсорбере Р-1	6,0 МПа
Температура в адсорбере О-1	200 °С
Давление в адсорбере О-1	5,0 МПа
Температура в адсорбере А-рт	15 °С
Давление в адсорбере О-1	7,3 МПа

для γ-Al_2O_3 и цеолита NaX, по метанолу – конкурентная адсорбция, по ртути – стехиометрическая хемосорбция). Циклическая работа четырех адсорберов осушки (два – на адсорбции, один – на регенерации, один – на охлаждении) смоделирована путем задания соответствующих температурно-давленческих режимов для каждого аппарата с переключением материальных и тепловых потоков согласно временной диаграмме (12 ч – адсорбция, 6 ч – регенерация, 6 ч – охлаждение), что позволило получить стационарные характеристики в усредненном за цикл представлении. Для блока демеркуризации принята нерегенерируемая загрузка, и процесс описан через необратимую реакцию Hg + S → HgS. Гидравлическое сопротивление слоев учтено в перепадах давления между входом и выходом аппаратов, а тепловые эффекты адсорбции – введением соответствующих тепловых потоков. Рекуперация тепла между прямым и обратным потоками регенерации реализована через противоточные теплообменники.

На рисунке 1 приведена принципиальная схема модели, отображающая все основные аппараты и материальные потоки с их нумерацией, соответствующей таблице 1.

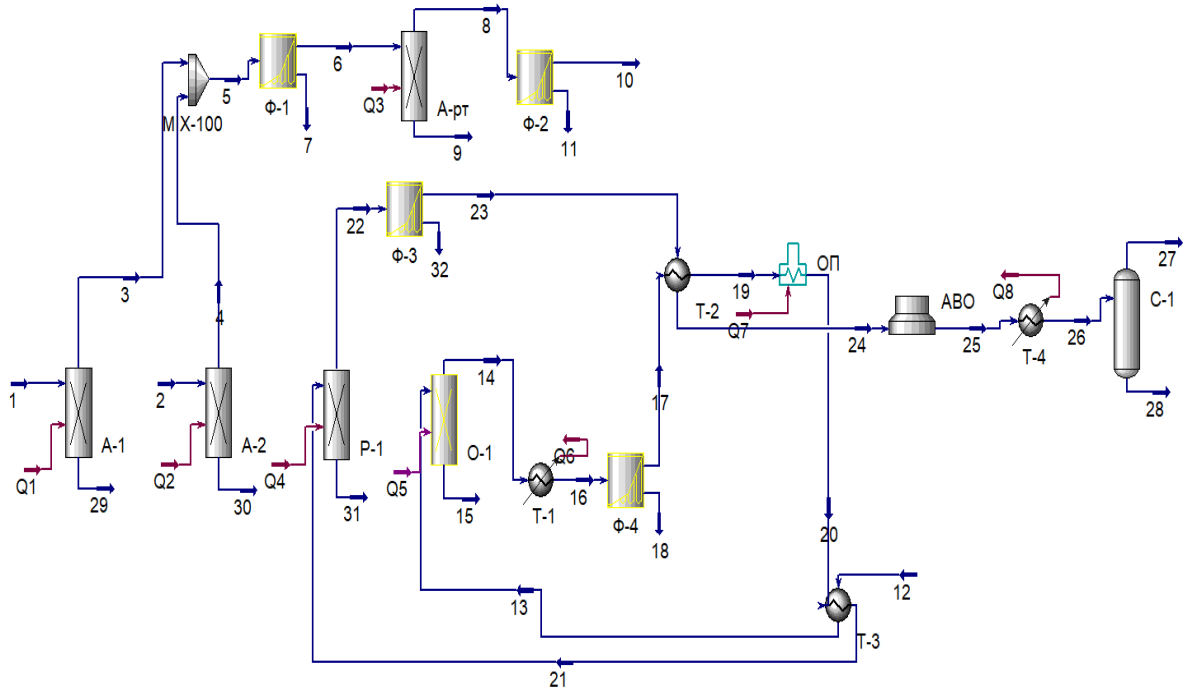


Рисунок 1 – Модель установки осушки и очистки природного газа

Модельные характеристики технологических потоков системы показаны данными таблицы 3.

Верификация разработанной математической модели установки осушки и удаления ртути проводилась путем сопоставления расчетных данных, полученных в среде моделирования, с проектными и эксплуатационными параметрами действующего газоперерабатывающего завода, а также с требованиями технологического регламента.

Таблица 3 – Модельные характеристики технологических потоков

Технологический поток	Характеристика потока			
	Состав, мол. доля	Мольный расход, $м^3/ч$	Молек. масса, г/моль	Плотность, $кг/м^3$
Осушенный и очищенный газ на границу установки	метан 0,8592; этан 0,0408; пропан 0,0143; бутаны 0,0041; азот 0,0776; гелий 0,0041; вода 0,0000; метанол 0,0000	490 000	18,07	65,90
Газ регенерации обратный	метан 0,8516; этан 0,0469; пропан 0,0158; бутаны 0,0041; азот 0,0776; гелий 0,0040; вода 0,0000; метанол 0,0000	50 000	18,21	67,69
Газ регенерации прямой	метан 0,8515; этан 0,0469; пропан 0,0158; бутаны 0,0042; азот 0,0776; гелий 0,0040; вода 0,0000; метанол 0,0000	50 000	18,21	67,69

При сопоставлении компонентного состава установлено, что модельные значения компонентного состава осушенного и очищенного газа на границе установки (метан 85,92 % об., этан 4,08 % об., пропан 1,43 % об., бутаны 0,41 % об., азот 7,76 % об., гелий 0,41 % об.) находятся в хорошем согласии с исходным составом сырьевого газа, что подтверждает корректность расчета фазовых равновесий и отсутствие значительных потерь целевых компонентов на стадии осушки. Модель предсказывает содержание влаги и метанола на уровне, не превышающем пределов, указанных в НД, что подтверждает адекватность выбранной изотермы адсорбции и корректность описания кинетики процессов массопереноса в слоях активного оксида алюминия и цеолита NaX. Модельные значения давлений в адсорберах (7,3 МПа на стадии адсорбции, 6,0 МПа на стадии регенерации) и температурных режимов (15 °C на адсорбции, 230 °C на регенерации) соответствуют проектным параметрам, что свидетельствует о корректном учете гидравлических сопротивлений и тепловых эффектов. Мольный расход осушенного газа на выходе (490 000 м³/ч) практически совпадает с расходом сырьевого газа на входе, а потери газа с потоками регенерации и водно-метанольным конденсатом не превышают допустимых значений. Это подтверждает сходимость материального баланса модели с погрешностью менее 1 %.

Таким образом, верификация показала, что разработанная модель адекватно описывает стационарные режимы работы установки осушки и удаления ртути в пределах проектных параметров ГПЗ и может быть использована для дальнейших оптимизационных расчётов.

Список литературы:

1. ИТС 50-2017 Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Переработка природного и попутного газа. – М. : Бюро НТД, 2017. – 222 с.

2. Фалькович М. Справочник процессов переработки газов // Нефтегазовые технологии. – 2006. – № 9. – С. 90–124.

3. Хужжиев М.Я. Очистка и осушка газов растворами гликолей / М.Я. Хужжиев, М.Н. Ризокулов // Наука и образование сегодня. – 2016. – № 3 (4). – С. 33–34.

4. Исследование применения отечественных адсорбентов в процессе адсорбционной осушки газа при производстве сжиженного природного газа / Э.Б. Гафарова, В.Б. Мельников, Е.Б. Федорова [и др.] // Научный журнал Российского газового общества. – 2023. – № 3(39). – С. 52–62.

УДК 66.011.52

ЭКСТРАКТИВНАЯ РЕКТИФИКАЦИЯ ЛЁГКОЙ МАСЛЯНОЙ ФРАКЦИИ ПОД ВАКУУМОМ

Долматов Борис Борисович
ООО «АСП-АКВА»
канд. тех. наук,
bb_dolmatov@asp-aqua.com

Нигматуллин Виль Ришатович
Уфимский государственный нефтяной технический университет
д-р техн. наук
wr_n@mail.ru

Аннотация. Проведены исследования экстрактивной ректификации лёгкой масляной фракции под вакуумом 40 мм.рт.ст. с использованием разделяющего агента N-метилпирролидона. По результатам проведённых исследований экстрактивной ректификации лёгкой масляной фракции получено рафината 62,9 % и экстракта 37,1 %. Ароматические углеводороды, сернистые соединения, смолы, кислород удаляются на 100 %, в то же время простые олефины не удаляются. Жидкостная экстракция уступает экстрактивной ректификации по качеству получаемых нефтепродуктов. Но на практике экстрактивная ректификации экономически уступает жидкостной экстракции.

Ключевые слова: Экстрактивная ректификация, колонна, разделяющий агент N-Метилпирролидон (N-МП), вакуум, ароматические нафтеновые, непредельные углеводороды, сернистые соединения, смолы, кислород.

Известно, что экстрактивная ректификация является эффективным методом для глубокой очистки нефтяных фракций и базовых минеральных масел от нежелательных примесей: ненасыщенных углеводородов (олефинов, диенов) и серосодержащих соединений [1, 2]. Суть метода в том, что в процесс добавляют специальный разделяющий агент, растворимый в масле, но избирательно взаимодействующий с нежелательными компонентами, снижая их летучесть и повышая относительную летучесть остальных компонентов масла. В результате в экстракционно-ректификационной колонне происходит разделение: на дистиллят (верхняя часть колонны), обогащенный целевыми, более летучими компонентами масла, очищенным базовым маслом, и кубовый остаток (нижняя часть колонны), содержащий смесь разделяющего агента и тех самых нежелательных примесей (ненасыщенных углеводородов, серосодержащих соединений). Затем следует регенерация: во второй колонне разделяющий агент отделяют от смеси с примесями и возвращают в процесс [3, 4].

В данной работе проведены исследования по очистке лёгкой масляной фракции от сернистых соединений и непредельных углеводородов экстрактивной ректификацией под вакуумом. Показатели качества масляной фракции: плотность при 20 °С – 870 кг/м³, кинематическая вязкость при 40 °С – 41 мм²/с, индекс вязкости – 95, молекулярная масса – 240 г/моль. В качестве разделяющего агента для изменения коэффициентов активности компонентов масляной фракции использовали полярный растворитель N-Метилпирролидон (N-МП). Исходили из того, что вакуум позволит реализовать процесс экстрактивной ректификации масляного дистиллята. Известно, что вакуумная перегонка на промышленных установках АВТ ведётся при остаточном давлении 20–60 мм рт. ст., что снижает температуры кипения масляных фракций на 80–120 °С: фракция с атмосферной температурой кипения 350 °С при остаточном давлении 40 мм.рт.ст кипит при 230–250 °С. Согласно расчетам при остаточном давлении 20–40 мм.рт.ст. фракция 300–350 °С полностью переходит в паровую фазу при 200–250 °С, при которых термически не разлагается [5, 6]. Основные показатели качества N-МП: температура кипения 202 °С при атмосферном давлении. При вакууме 40 мм.рт.ст. температура кипения N-МП снижается до 140 °С, т.е. при рабочей температуре ректификационной колонны 200–250 °С N-МП находится в

жидком состоянии, температура в колонне выше его температуры кипения под вакуумом и поступает в избытке, создавая жидкую фазу на насадке. Так как N-МП менее летуч, по сравнению с компонентами масляной фракции при том же давлении, его температура кипения на 90 °С ниже температуры кипения компонентов сырья, в колонне его кратность 5:1 по массе к сырью и он доминирует на насадках. N-МП не образует азеотропов с углеводородами, что является обязательным условием для экстрактивной ректификации. Необходимо отметить, что без растворителя для пары н-парафин – ароматический углеводород с близкими температурами кипения разделение практически невозможно [7]. Поэтому используется полярный растворитель, который меняет коэффициенты активности углеводородов, содержащихся в масляном дистилляте в растворителе, и при этом неполярные парафиновые углеводороды с N-МП практически не взаимодействуют. Слабополярные нафтеновые углеводороды незначительно взаимодействуют с N-МП. Ароматические углеводороды заметно взаимодействуют с N-МП. Сераорганические соединения взаимодействуют с N-МП минимально. Во всех взаимодействиях важную роль играет концентрация N-МП в масляном дистилляте [8].

На рисунке 1 представлена конфигурация схемы колонны экстрактивной ректификации под вакуумом.

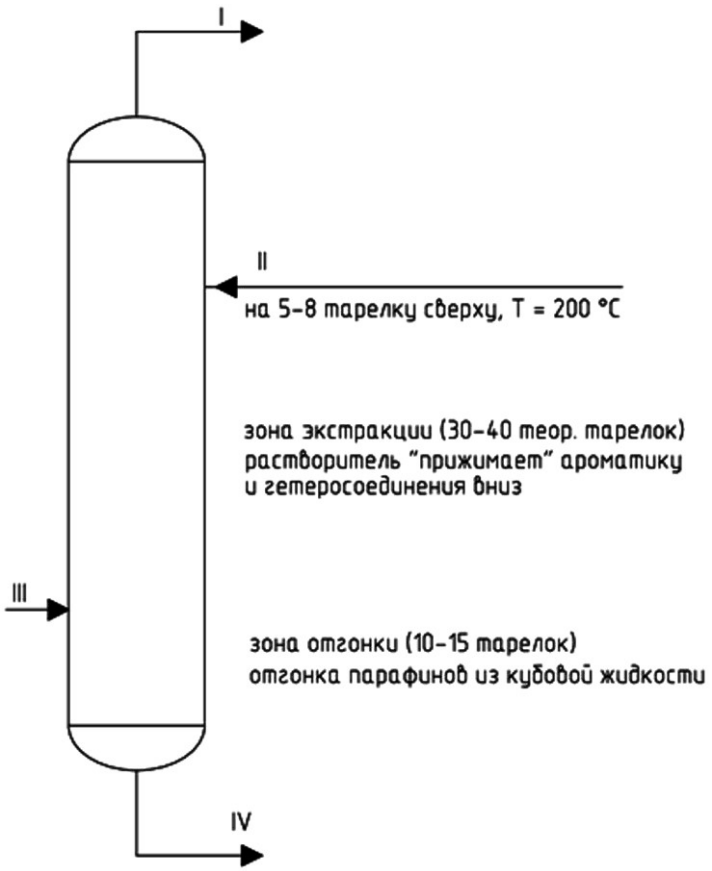


Рисунок 1 – Конфигурация схемы колонны экстрактивной ректификации под вакуумом: I – дистиллят: парафины + нафтены (очищенный рафинат); II – полярный растворитель N-МП; III – сырьё (фракция 300–350 °С), Т = 230–250 °С, Р = 3–5 кПа; IV – куб: ароматические углеводороды + сернистые + непредельные + растворитель, Ткуба ≈ 260–280 °С (под вакуумом 40 мм.рт.ст.)

Экстрактивная ректификация проходит следующим образом: Растворитель вводится на 5–8 тарелки (насадки) сверху колонны при температуре 200 °С; зона экстракции состоит из 30–40 теоретических тарелок, лёгкая масляная фракция вводится при температуре 240 °С, зона отгонки парафинов из кубовой жидкости состоит из 10–15 теоретических тарелок. Кубовая жидкость состоит из ароматических, непредельных углеводородов, сернистых соединений и растворителя. Температура в кубе 260–280 °С (под вакуумом 40 мм.рт.ст.). Дистиллят состоит из парафиновых, нафтеновых углево-

дородов (очищенный рафинат). Парафины, целевой компонент, уходит с дистиллятом с верха колонны. Чем больше кратность растворителя, тем чище дистиллят. Нафтены также являются целевым компонентом и уходят с дистиллятом с верха колонны, но имеют тенденцию частично «сжиматься» растворителем из-за более низкой летучести по сравнению с парафинами. Для достижения чистого разделения парафин-нафтен требуется большее число тарелок или более высокая кратность растворителя.

Ароматические углеводороды, сернистые соединения, непредельные углеводороды с растворителем остаются в кубе.

На рисунке 2 представлена конфигурация регенерации N-МП из кубового остатка, смеси ароматических углеводородов, сернистых соединений, непредельных углеводородов и N-МП в отдельной колонне.

Регенерация растворителя из кубовой жидкости проходит в отдельной колонне с двумя секциями, верхней из 20–30 теоретических тарелок и нижней 15–20 тарелок. Кубовая жидкость подается в маточник между двумя секциями. Регенерированный растворитель направляется на рецикл, а смеси ароматических углеводородов, сернистых соединений, непредельных углеводородов выводятся в товарный парк.

Так как N-МП менее летуч, чем ароматические углеводороды фракции 300–350 °С с примесями, они уходят с дистиллятом, а чистый N-МП на рецикл.

Разница летучестей растворителя и экстрагируемых компонентов под вакуумом составляет 80–120 °С, что позволяет использовать небольшое число теоретических тарелок (15–20) и низкое флегмовое число (1–3).

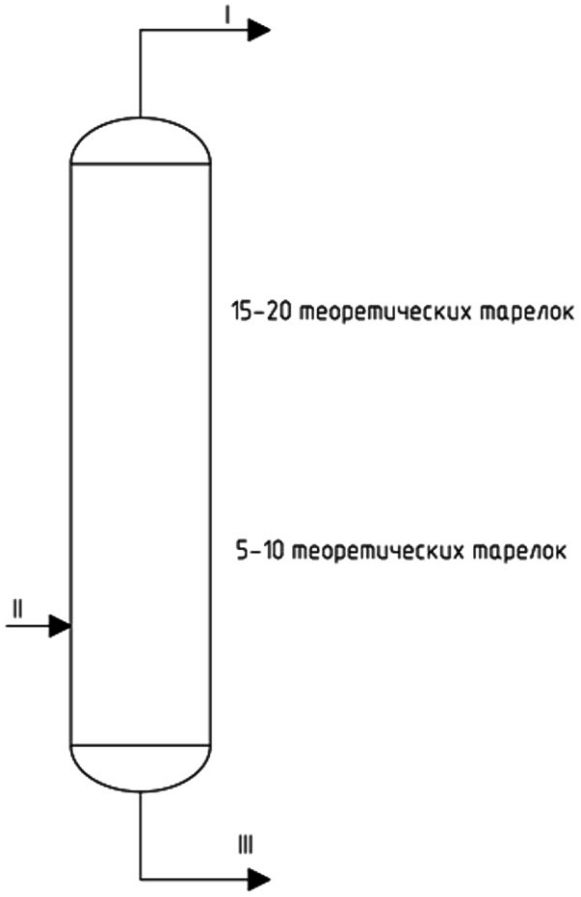


Рисунок 2 – Конфигурация регенерации N-МП из кубового остатка, смеси ароматических углеводородов, сернистых соединений, непредельных углеводородов и N-МП в отдельной колонне: I – дистиллят: ароматические, сернистые, непредельные углеводороды; II – сырьё: кубовый продукт колонны экстрактивной ректификации; III – куб: чистый N-МП (направляется на рецикл)

Материальный баланс экстрактивной ректификации масляного дистиллята фракции 300–350 °С приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Материальный баланс экстрактивной ректификации масляного дистиллята фракции 300–350 °С

Компонент	Сырьё, % мас.	Коэффициент активности в N-МП	Рафинат, % мас.	Экстракт, % мас.
Парафины н- (С16–С18), изо- (С16–С18)	33,0	52,0	33,0	0,0
Нафтены моноциклические, бициклические	31,7	20,0	26,7	5,0
Олефины простые	3,2	9,0	3,2	0,0
Ароматические углеводороды	23,0	4,3	0,0	23,0
Смолы лёгкие (непредельные)	2,1	3,0	0,0	2,1
Сернистые соединения	4,9	2,0	0,0	4,9
Кислородсодержащие соединения	2,1	1,5	0,0	2,1
ИТОГО	100,0	91,8	62,9	37,1

Выводы

Вакуум позволяет снизить температуры кипения компонентов на 150 °С, переводя их в паровую фазу. Разделяющий агент N-МП, стекая по насадке, повышает активность парафинов, умеренно у нафтенов и сохраняет низким для ароматических и гетероатомных соединений. В результате относительная летучесть возрастает до 1,5–4,0, и разделение становится технически реализуемым процессом. Ароматические углеводороды, сернистые соединения, смолы, кислород удаляются на 100 %, в то же время олефины простые не удаляются. Жидкостная экстракция уступает экстрактивной экстракции по качеству получаемых нефтепродуктов. Но на практике экстрактивная экстракция экономически уступает жидкостной экстракции.

Список литературы:

1. Долматов Б.Б. Области оптимальности исходных составов при экстрактивной ректификации : автореф. дис. … канд. техн. наук. – М., 2009. – 23 с.
2. Патент РФ 2213721 «Способ разделения С4-углеводородных фракций».
3. Патент РФ 2157360 «Очистка бензола от непредельных углеводородов».
4. Анохина Е.А. Энергосбережение в процессах экстрактивной ректификации // Вестник МИТХТ. – 2013. – Т. 8. – № 5. – С. 3–18.
5. Смазочные масла из нефтей восточных месторождений / Д.О. Гольдберг [и др.]. – М. : Химия, 1972. – С. 77–78.
6. Патент РФ 2141992 «Способ селективной очистки масляных фракций».
7. Гайле А.А., Сомов В.Е. Процессы разделения и очистки продуктов переработки нефти и газа. – СПб. : Химиздат, 2012. – 376 с.
8. Черножуков Н.И. Технология переработки нефти и газа. Ч. 3. – М. : Химия, 1978. – 424 с.

УДК 678.046:544.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕОЛИТОВ НА ПРОЦЕСС ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Дутова Варвара Сергеевна
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Аспирант
vary43791@yandex.ru

Валеева Алина Равилевна
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
канд. техн. наук, доцент
alinka.valeevaa@yandex.ru

Готлиб Елена Михайловна
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
д-р техн. наук, профессор
egotlib@yandex.ru

Галимов Энгель Рафикович
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
д-р техн. наук, профессор
kstu-material@mail.ru

Аннотация. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследовано влияние активированного (АЦ) и вулканического (ВЦ) цеолитов на кинетику отверждения эпоксидной смолы CYD 128 в присутствии отвердителя АФ-2. Установлено, что введение цеолитов смещает экзотермический пик в область более низких температур и приводит к появлению дополнительного пика, что свидетельствует о двухстадийном характере отверждения. Полученные данные коррелируют с уменьшением времени гелеобразования в наполненных композициях.

Ключевые слова: эпоксидная смола; цеолит; отверждение; ДСК; время гелеобразования.

Введение. Наполнители, как известно [1], влияют на процесс отверждения эпоксидных олигомеров, что определяет характеристики сетчатой структуры полимера и его эксплуатационные и технологические свойства. Одним из перспективных способов изучения процессов отверждения является применение дифференциально-сканирующей калориметрии [2]. Использование этого метода для оценки роли цеолитов в формировании пространственной структуры эпоксидных материалов открывает пути для создания композитов с заданными физико-механическими показателями.

Экспериментальная часть. Для получения наполненных композиций использовалась эпоксидная диановая смола CYD 128 производства Китайской компании Sinopec Bailing Petrochemical Co., Ltd. (CAS No.1675-54-3). Отверждение проводилось аминоалкилфенолом (АФ-2), (ТУ 2494-052-00205423-2004) при комнатной температуре 23-25 °С в течение 7 суток. В качестве дисперсных наполнителей применялись вулканический (ТУ 08.11.12-003-00327325428-2019) и активированный (ТУ 08.99.29-001-27325428-2019) цеолиты производства ООО «ЦЕО ГРУПП». Время гелеобразования (жизнеспособность) эпоксидных композиций определяли по ТУ 2494-511-00203521-94. Дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) проводили на приборе «DSC 204 F1 Phoenix» в температурном интервале от 25 до 400 °С со скоростью нагрева 10 К/мин в токе аргона.

Результаты и обсуждение. Цеолиты являются перспективными наполнителями полимеров, вследствие своей специфической пористой структуры [3], которая обеспечивает улучшение их эксплуатационных показателей [4].

Из данных следует, что активированный (АЦ) и вулканический (ВЦ) цеолиты сдвигают пики ДСК в область более низких температур, причем этот эффект проявляется в большей степени при применении АЦ. Это связано, на наш взгляд, с большей пористостью этого алюмосиликата, по сравнению с вулканическим цеолитом [3].

Таким образом, имеет место ускорение процесса отверждения при наполнении цеолитами. Каталитическое действие этих наполнителей может быть связано с селективной сорбцией их поверхностью и порами эпоксидного олигомера, что приведет к избытку отвердителя в системе и, следовательно, ускорению процесса отверждения.

Это коррелирует с данными по определению жизнеспособности наполненных эпоксидных композиций (таблица 1). Так, наполнение обуславливает уменьшение времени гелеобразования, более активно проявляющееся при введении активированного цеолита.

Таблица 1 – Жизнеспособность наполненных эпоксидных композиций

№ п.п.	Состав, мас.ч	Время гелеобразования, мин
1	CYD 128-100 АФ-2-30	27
2	CYD 128-100 ВЦ-20 АФ-2-30	30
3	CYD 128-100 АЦ-20 АФ-2-30	30

Гидроксильные группы на поверхности цеолитов и активные кислотные центры, связанные с алюминием в их каркасе, способны выступать в роли катализаторов, облегчать раскрытие эпоксидного кольца, тем самым снижая энергетический барьер реакции [5]. Это сдвигает начало активного выделения тепла в сторону более низких температур при исследовании композиций методом ДСК.

Особый интерес вызывает появление при наполнении цеолитами дополнительного более узкого и менее интенсивного пика или расщепление основного максимума, что свидетельствует [6] о том, что в граничном слое полимерная матрица – наполнитель реакция отверждения начинается позже.

Избирательная адсорбция компонентов эпоксидной композиции поверхностью цеолитов [7] приводит к локальному изменению их соотношения. Из-за этого сшивание протекает в два этапа с разными энергиями активации.

Возможным вариантом является также, что сначала идет реакция первичных аминов со смолой (первый пик), а затем, при более высокой температуре, активируется реакция вторичных аминов или протекает каталитическое раскрытие оставшихся эпоксидных групп под действием третичных аминов, образовавшихся в ходе реакции (второй пик) [6].

Еще одной причиной появления дополнительного пика ДСК может быть то, что после гелеобразования системы вблизи поверхности наполнителя движение полимерных цепей блокируется. Чтобы прореагировали оставшиеся изолированные функциональные группы, требуется дополнительный нагрев. Когда повышается температура, растет молекулярная подвижность и происходит взаимодействие остаточных групп, проявляющееся на ДСК в виде второго экзо-пика [7].

Заключение. Таким образом, цеолиты существенно ускоряют процесс отверждения эпоксидной смолы и делают его двухстадийным.

Список литературы:

1. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей. – М. : РАН, 2022. – 285 с.

2. Chiu M.H. Differential scanning calorimetry: An invaluable tool for a detailed thermodynamic characterization of macromolecules and their interactions / M.H Chiu, E.J. Prenner // Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences. – 2011. – Vol. 3. – № 1. – P. 39–59.

3. Кальций-магниевые и алюмосиликаты как наполнители полимерных и керамических материалов: учебное пособие / Е.М. Готлиб, Э.Р. Галимов, Т.Р. Сафиуллина [и др.]. – Казань, 2025. – 105 с.

4. Эпоксидные материалы, наполненные вулканическим и активированным цеолитами / В.С. Дутова, А.Р. Валеева, Е.М. Готлиб [и др.] // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18 – № 2. – С. 186–199.

5. Cure kinetics of epoxy resin-natural zeolite composites / B. Erdoğan, A. Seyhan, Y. Ocak [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2008. – Т. 94. – № 3. – С. 743–747.

6. Братасюк Н.А. Исследование кинетических параметров процесса стеклования полиуретан/эпоксидных композиций методом ДСК / Н.А. Братасюк, В.В. Зуев // Вестник Башкирского университета. – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 327–333.

7. Weitkamp J. Zeolites and catalysis // Solid State Ionics. – 2000. – Vol. 131. – № 1-2. – P. 175–188.

УДК 614.8

РИСК: ВЫЧИСЛЕНИЕ, АНАЛИЗ, ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Замилов Эмиль Рустемович
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
аспирант

Глебова Елена Витальевна
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой
emil-zamilov@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены методологические основы вычисления, анализа и представления риска безопасности производства. Обоснована вероятностная природа количественных показателей риска и необходимость анализа чувствительности для оценки устойчивости модели. Рассмотрено структурирование совокупного риска для выявления критических элементов. Систематизированы направления применения результатов на стадиях жизненного цикла опасного производственного объекта и методы визуализации.

Ключевые слова: риск, безопасность, частота инициирующих событий, матрица рисков, потенциальный риск, управление промышленной безопасностью.

Методологические основы вычисления риска

Методология интегрированной оценки риска строится на принципе пространственно-временного наложения зон поражения, получаемых при моделировании разнообразных сценариев аварий. Для каждого такого сценария вычисляется вероятность осуществления, а соответствующая область поражения наносится на карту местности с привязкой к конкретному инициирующему фактору (например, выходу из строя элемента оборудования). Пространственное положение зон корректируется с учетом метеоусловий, и в первую очередь – преобладающих направлений ветров, что приобретает решающее значение для ситуаций, сопровождающихся факельным горением, вспышками и взрывами. Расчетный алгоритм оценки риска предусматривает циклический перебор всех характерных погодных ситуаций с присвоением им вероятностных весов, что дает возможность учесть сезонную динамику на протяжении всего жизненного цикла предприятия, а также специфику плотности и типа застройки сопредельных территорий [1].

В ходе количественной оценки риска (далее – КОР) выполняется углубленный анализ каждого потенциального аварийного сценария с целью установления как степени тяжести последствий (в аспекте гибели людей, травмирования персонала и/или населения), так и ожидаемой частоты (вероятности) его наступления. Расчет последствий опирается на моделирование опасных факторов с учетом их пространственно-временного воздействия на людей, оказавшихся в зоне поражения, тогда как определение частоты базируется на статистических и вероятностных подходах, использующих сведения о надежности технических систем, условиях эксплуатации и итогах ретроспективного анализа подобных происшествий.

Показатели безопасности, получаемые по итогам анализа риска, носят вероятностный характер, что определяет их существенную зависимость от достоверности исходной информации. Наиболее значимым параметром, вносящим основной вклад в неопределенность конечных оценок, выступает частота инициирующих событий, являющаяся одной из ключевых входных переменных. На разных этапах жизненного цикла объекта – от начального проектирования до эксплуатационной фазы – уровень доступности и полноты информации неодинаков, что, в свою очередь, задает допустимую глубину проработки анализа риска. Такая поэтапная методология обеспечивает адаптацию применяемых инструментов к имеющемуся объему данных, достигая разумного баланса между тщательностью оценки и практической осуществимостью анализа на конкретной стадии проектных работ.

Риск представляет собой многогранную структуру, включающую в себя частоту возникновения и масштаб последствий аварии. Ввиду данной многогранности, целесооб-

разно описывать риск через совокупность показателей, отражающих как вероятность (или частоту) реализации аварийных сценариев, так и объемы потенциального ущерба – для здоровья человека, окружающей среды и, как сопутствующий ущерб бизнесу. Представление риска в виде сочетания периодичности и тяжести последствий обеспечивает более глубокое и наглядное понимание степени опасности, а также создает предпосылки для корректного сопоставления альтернативных технических решений, сценариев развития событий и стратегий управления безопасностью [2].

Анализ чувствительности и структурирование совокупного риска

Независимо от того, насколько полными и достоверными являются исходные данные, в процессе анализа риска необходимо проводить проверку устойчивости полученных результатов к возможным ошибкам, порождаемым неопределенностью входной информации. В основе такой проверки лежит численный анализ чувствительности, суть которого состоит в целенаправленном внесении случайных отклонений в исходные параметры модели (включая частоты инициирующих событий и параметры последствий) в диапазоне, достигающем ±100 % относительно базовых значений. Для каждой измененной конфигурации исходных данных выполняется полный расчетный цикл, результатом которого являются выходные КОР. Итогом данного этапа служит оценка разброса выходных величин относительно базового варианта (без внесения отклонений), фиксируемая в относительных процентах. Полученные сведения применяются для характеристики устойчивости расчетной модели и установления доверительных границ прогнозируемых значений.

Целесообразно проведение специализированной процедуры оценки чувствительности (устойчивости) итогов КОР, направленной на определение степени влияния изменчивости исходной информации на результирующие показатели безопасности. В рамках этой процедуры производится направленное варьирование ключевых входных величин в моделях развития аварий и распространения поражающих факторов в интервалах, соответствующих реально возможным физическим отклонениям. В число таких параметров входят температурный режим, свойства рабочих сред, направление и скорость ветра, а также частоты инициирующих событий.

Для каждой вариации входных параметров выполняется серия вычислительных прогонов с применением программных средств КОР. По множеству полученных результатов проводится статистическая обработка выходных данных, позволяющая установить характеристики распределения количественных мер безопасности (например, среднее арифметическое, среднеквадратичное отклонение, доверительные интервалы). Использование статистических критериев дает возможность аргументированно судить о чувствительности применяемых расчетных алгоритмов к возможным погрешностям или неполноте исходной информации, а также оценивать надежность и устойчивость получаемых выводов в рамках принятой модели риска.

Результаты КОР требуют интерпретации с позиций выделения доминирующих составляющих в структуре совокупного риска аварий. Путем прямого сопоставительного анализа вкладов отдельных сценариев, производственных участков и элементов технологических схем в общую величину риска представляется возможным ранжирование источников опасности по степени их влияния на конечный показатель. Такой подход дает возможность обнаружить зоны локализованных концентраций риска, а также технологические процессы с наибольшим потенциалом тяжелых последствий. Обнаруженные участки и элементы производственной инфраструктуры с повышенным уровнем риска должны рассматриваться в приоритетном порядке при разработке мероприятий по управлению промышленной безопасностью.

В рамках анализа риска может быть проведена идентификация потенциальных вариантов предотвращения аварийных ситуаций. Выявленные меры сопоставляются с исходными данными анализа риска с целью выбора оптимального с позиций безопасности и экономической эффективности решения. Подобный подход позволяет объективно обосновать выбор комплекса мер по снижению риска и способствует принятию рациональных управленческих решений на стадиях проектирования и эксплуатации объекта [1].

Когда идентификация дополнительных превентивных мер становится невозможной, полученный расчетный уровень риска принимается в качестве допустимого,

отвечающего критерию разумной достаточности. Данное решение фиксирует достижение баланса между затратами на снижение риска и достигаемым уровнем безопасности, что является типовой процедурой в практике риск-менеджмента. Таким образом осуществляется переход от фазы активного управления риском к его мониторингу и поддержанию достигнутого уровня безопасности в рамках установленных нормативных и технических требований.

Интерпретация, представление результатов и применение на стадиях жизненного цикла объекта

Данные о распределении и уровнях риска, полученные по итогам количественного анализа, способны служить обоснованием для пересмотра проектных решений уже на стадии технико-экономического обоснования. Если анализ выявляет сценарии, по которым индивидуальный и/или социальный риск превышает допустимые или приемлемые значения, полученные результаты становятся основанием для констатации неприемлемости уровня риска. Это, в свою очередь, влечет необходимость корректировки проектных решений – изменения компоновки оборудования, пересмотра технологических схем, внедрения дополнительных организационно-технических и других барьеров, а также оптимизации размещения объектов для снижения воздействия на персонал и население.

На стадии рабочего проектирования итоги количественного анализа риска используются для подтверждения того, что проектная документация соответствует принципу ALARP (As Low As Reasonably Practicable), то есть предусматривает все практически осуществимые и экономически обоснованные меры по снижению риска [3]. Проведенный анализ позволяет показать, что остаточный риск не превышает допустимых границ, а любые дополнительные меры повлекли бы несоразмерно высокие затраты по сравнению с достигаемым приростом уровня безопасности. Таким образом, КОР выполняет функцию доказательного инструмента при оценке полноты и достаточности проектных решений в части производственной безопасности на завершающей стадии проектирования.

На эксплуатационном этапе результаты анализа риска дают возможность количественно охарактеризовать фактический уровень безопасности производственного объекта, обеспечивая тем самым базу для его сравнения с установленными критериями приемлемого риска. Такое сопоставление служит объективной основой для принятия управленческих решений. Полученные сведения используются для обоснования программ сокращения внеплановых потерь, связанных с авариями, отказами оборудования и прочими нарушениями технологического режима. Поэтому КОР помогает идентифицировать наиболее уязвимые места производственной системы, устанавливать приоритетные направления внедрения профилактических и компенсирующих мер.

Расчет рисков является обязательным элементом эксплуатации техногенных объектов. В ходе эксплуатации необходим регулярный пересмотр и обновление оценки рисков с учетом изменения параметров, физического износа оборудования, зданий и сооружений, а также при поступлении новых данных о возможных угрозах. Оценка и управление рисками на эксплуатационной стадии обеспечивают поддержание его безопасности на требуемом уровне [2].

Для каждого производственного объекта может быть сформирован и внедрен комплекс технических и организационных мероприятий, ориентированных на предотвращение аварий и обеспечение эффективного реагирования при их возникновении. Результативность таких мероприятий подлежит объективной количественной оценке с использованием методов анализа риска, которые позволяют определить степень снижения вероятности реализации аварийных сценариев и уменьшения тяжести их последствий после внедрения конкретных защитных и компенсирующих мер. Тем самым анализ риска служит инструментом проверки действенности существующих барьеров безопасности и дает возможность обоснованно судить о необходимости и целесообразности дополнительных мер по дальнейшему снижению уровня риска.

Результаты анализа риска, вместе с перечнем предусмотренных инженерно-технических и организационных мер по снижению риска, включаются в проектную документацию для строительства, ввода в эксплуатацию и последующей эксплуатации

промышленных предприятий, зданий и сооружений. Фиксация этих данных в проектных материалах гарантирует выполнение требований нормативных правовых актов в области промышленной безопасности и служит базой для оценки соответствия проектных решений установленным критериям приемлемого риска. Кроме того, наличие анализа риска в проектной документации повышает прозрачность принимаемых решений, создает доказательную основу для государственной экспертизы и надзора, а также дает информационную поддержку для результативного управления рисками на всех стадиях жизненного цикла объекта [4].

Для визуализации и смысловой интерпретации результатов анализа риска применяются разнообразные способы их представления – от простейших табличных форм до сложных графоаналитических моделей. Одним из наиболее доступных и широко используемых подходов, особенно при оценке рисков производственного травматизма, служит матричное представление риска. В подобных таблицах производится классификация рассматриваемых видов работ по степеням вероятности наступления событий и тяжести вытекающих последствий, что дает возможность оперативно ранжировать риски и выявлять наиболее критичные виды деятельности. Данный метод обладает высокой практической значимостью при формировании программ обеспечения производственной безопасности и при планировании распределения ресурсов на профилактику.

Опасности, порождаемые реализацией проектных решений, могут распространяться не только на промышленный персонал, но и на население, проживающее в окрестностях объекта. Хотя процедуры КОР базируются на общих принципах моделирования сценариев и расчета вероятностей, способы представления и трактовки результатов дифференцируются в зависимости от целевой группы и характера воздействия. Применительно к населению наиболее распространенными показателями являются потенциальный и социальный риск. Указанные показатели позволяют оценить возможный ущерб для общества и используются при обосновании технических решений, определении размеров санитарно-защитных зон, установлении приемлемости размещения проектируемых объектов и т.п.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – Введ. 2020-03-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 52 с.

2. Enterprise Risk Management Integrating with Strategy and Performance, 2017.- 10 с. – URL : https://www.academia.edu/42188027/Enterprise_Risk_Management_Integrating_with_Strategy_and_Performance (дата обращения: 18.09.2026).

3. ГОСТ Р 70675-2023. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Руководство по оценке риска для здоровья работников. – Введ. 2023-12-01. – М. : Российский институт стандартизации, 2023. – 28 с.

4. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: утв. приказом Ростехнадзора от 03.11.2022 No 387. – М., 2022.

УДК 66.081.6

МОДЕРНИЗАЦИЯ РУЛОННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕМБРАННОГО АППАРАТА ДЛЯ ОЧИСТКИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Коновалов Дмитрий Николаевич
Тамбовский государственный технический университет
д-р. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта»
kdn1979dom@mail.ru

Лазарев Сергей Иванович
Тамбовский государственный технический университет
д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»
sergey.lazarev.1962@mail.ru

Михалев Сергей Сергеевич
Тамбовский государственный технический университет
аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»
ss.mihalev@mail.ru

Коновалов Дмитрий Дмитриевич
Тамбовский государственный технический университет
преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»
kdf2003dom@mail.ru

Аннотация. В работе представлена усовершенствованная конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа для разделения, концентрирования и очистки растворов в химической, машиностроительной, пищевой промышленности, аграрном секторе и прочих направлениях. Использование перспективной конструкции аппарата позволяет повысить качество и эффективность процесса разделения растворов при упрощении изготовления элементов аппарата.

Ключевые слова: разделение, очистка, концентрирование, раствор, аппарат.

Модернизация конструкций электромембранных аппаратов для очистки и концентрирования промышленных очистных систем остается высокоактуальной задачей ввиду растущей востребованности таких технологий на современных очистных сооружениях. Передовые инженерные решения в этой области позволяют организовать замкнутый цикл водооборота на предприятии: они обеспечивают как глубокую очистку оборотной воды, так и селективное извлечение ценных компонентов для их повторного вовлечения в технологический цикл.

За основу разрабатываемой конструкции принят электробаромембранный аппарат рулонного типа из патента [1].

На рисунке 1 представлен усовершенствованный электробаромембранный аппарат, который состоит из корпуса аппарата 1, перфорированной трубки 2, внешней трубки 3, крышки 4, уплотнительной прокладки 5, посадочной прокладки 6, турбулизирующего модуля 7 типа «улитка», разделяемого раствора 8, внешних отводных трубок 9, штуцеров для отвода ретентата 10, коллекторов для отвода прианодного, прикатодного пермеата 11, 12, электрических проводов 13, фиксирующей прокладки 14, перегородки 15, внутренней трубки 16, полимерных перфорированных перегородок 17 с дренажными сетками, анодом и катодом 18, 19, герметизирующей заливки 20, устройства для подвода электрического тока 21, подложки мембран 22, прианодных и прикатодных мембран 23, 24, торцевой прокладки 25, крестообразной перегородки 26 с перфорацией круглыми отверстиями, торцевой прокладки 27, штуцеров для отвода прикатодного, прианодного пермеата 29, 30, пленки 31, сетки-турбулизаторы охлаждающей воды 32, рулонных элементов 33, сетки-турбулизатора 34, резинового кольца 35, прижимного фланца 36, гаек и шайб 37, 38, 39, штуцеров для ввода и вывода охлаждающей воды 40, 41, антителескопической решетки 42, втулки 43, резиновой манжеты 44, гайки 45 для крепления к трубопроводу установки, герметизирующей прокладки 46.

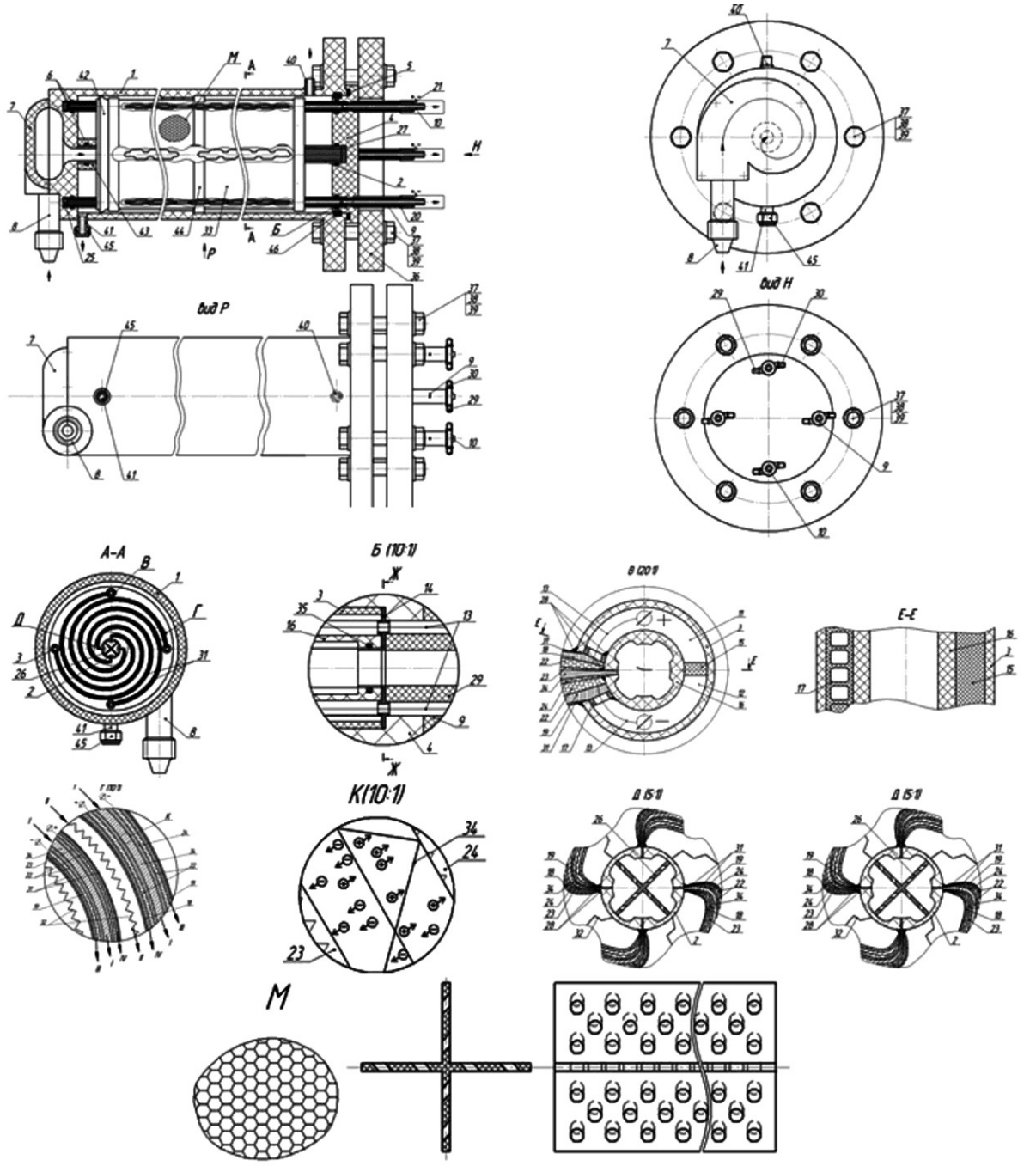


Рисунок 1– Электробаромембранный аппарат рулонного типа

Упрощение конструкции и снижение материалоемкости аппарата, уменьшение эффекта застойных зон, уменьшение гидравлического сопротивления в каналах для отвода ретентата и прианодного, прикатодного пермеата, улучшение турбулизации охлаждающей воды достигается за счет изменения конструкции аппарата.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов” (FEMU-2024-0011).

Список литературы:

1. Пат. 2826576 C1 Российская Федерация, СПК B01D 61/46, B01D 61/18. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / Д.Н. Коновалов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2023131085; заявл. 28.11.2023; опубл. 12.09.2024, Бюл. № 26.

УДК 669.15-194:621.78

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ СТРУКТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ УГЛЕРОДОМ И АЗОТОМ

Кудрявцев Алексей Сергеевич
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
д-р техн. наук, заместитель генерального директора по научной работе
Kudryavtsev@yandex.ru

Охапкин Кирилл Алексеевич
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
канд. техн. наук, заместитель начальника научно-производственного комплекса по научной работе
kirill.okhapkin@mail.ru

Аннотация. В работе исследована аустенитная сталь хромоникелевой композиции с различным содержанием углерода и азота. Термодинамический анализ фазового состава выявил значительное снижение содержания карбидной фазы без образования вторичных азотсодержащих выделений в опытном составе стали, легированной азотом по сравнению с базовой композицией, легированной углеродом. В результате исследований структуры с использованием оптической металлографии и растровой электронной микроскопии в исходном состоянии и после термического старения продолжительностью 15 000 ч при температуре 550 ºС показано, что сталь, легированная азотом, демонстрирует высокую стабильность структуры, а легированная углеродом подвержена значительной деградации структуры за счет большого количества вторичных выделений карбида хрома.

Ключевые слова: аустенитная сталь, легирование азотом, термическая стабильность структуры.

Введение

Основной особенностью эксплуатации конструкционных материалов в составе реакторных установок (РУ) на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем является длительное воздействие высоких (до 550 °С) температур [1]. Поэтому оборудование и трубопроводы изготавливаются из жаропрочных сталей хромоникелевой (09Х18Н9) и хромоникельмолибденовой (08Х16Н11М3) композиций [2]. Структура стали марок 09Х18Н9 и 08Х16Н11М3 после эксплуатации в составе парогенератора РУ БН-600 длительностью 195 000 ч при температуре ~ 515 °С характеризуется наличием вторичных выделений карбидов, образующих сплошную сетку по границам зерен эксплуатировавшегося металла, что приводит к деградации механических свойств основного металла и сварных соединений [3–6]. Снижение содержания углерода до значений менее 0,03 мас. % должно привести к существенному уменьшению количества карбидов, тем самым повысит стабильность структуры и свойств материала. Для предотвращения падения прочностных характеристик компенсировать снижение содержания углерода возможно за счет легирования азотом, при этом требуется подтвердить обеспечение структурной стабильности стали при длительном высокотемпературном воздействии.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ стабильности структуры в процессе длительного высокотемпературного старения аустенитной стали хромоникелевой композиции при легировании углеродом и азотом.

Материал и методика исследований

Для сравнительных испытаний по влиянию углерода и азота на структуру стали выплавлены экспериментальные составы с близким содержанием легирующих элементов

и примесей, на уровне средних значений интервалов, установленных в ГОСТ 5632-2014 «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки». Выплавка экспериментальных составов выполнена на ОАО «Челябинский металлургический комбинат» (ОАО «ЧМК») в вакуумно-индукционных печах с разливкой в изложницы с массой слитка ~ 500 кг. Ковка слитков после обточки проводилась на сутунку размером 50×190×1010 мм. Термическая обработка проводилась по режиму: аустенизация при температуре 1050 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Химический состав экспериментальных плавок представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав экспериментальных плавок хромоникелевой стали

Марка	Химический состав, мас. %						
	C	N	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
09Х18Н9	0,09	0,02	0,43	1,47	18,0	9,01	0,03
03Х18Н9	0,02	0,09	0,44	1,47	17,68	9,20	0,01
	W	V	Nb	Ti	Al	S	P
09Х18Н9	0,01	0,02	0,01	0,01	0,07	0,006	0,011
03Х18Н9	0,01	0,02	0,10	0,05	0,06	0,003	0,012

Фазовый состав стали в равновесном состоянии рассчитывался с помощью термодинамического моделирования [7] в программном пакете FactSage, совместно с разработанным Thermfact/CRCT (Монреаль, Канада) и GTT-Technologies (Аахен, Германия).

Вырезка образцов проводилась на установке «Brilliant». Изготовление и травление микрошлифов проводилось согласно РД 5.9555-74 «Металлы и сплавы. Изготовление и травление металлографических микрошлифов». Шлифовка и полировка металла проводилась на установке «Sapfir» с использованием абразивных суспензий. Электролитическое травление проводилось в 10 %-ом растворе щавелевой кислоты. Тепловое травление выполнено согласно методике [8] по режиму: нагрев до 550 °С, выдержка 3–10 мин.

Металлографические исследования проведены с использованием светового инвертированного оптического микроскопа Axio Observer. A1m Zeiss.

Исследования микроструктуры и определение элементного состава проведены на растровом электронном микроскопе Vega TESCAN, оснащенном рентгеновским энергодисперсионным спектрометром X-Max-50.

Обсуждение результатов

Фазовый состав стали в равновесном состоянии определен при температуре окончательной термической обработки 1050 °С и при рабочей температуре 550 °С. В таблице 2 представлены результаты термодинамического моделирования фазового состава. Следует отметить, что содержание неметаллических включений в стали, в том числе нитридов, оксидов, сульфидов и силикатов, не приведено, так как данные частицы формируются в высокотемпературной области при выплавке, и не растворяются при окончательной термической обработке, сохраняясь в течение всего периода эксплуатации материала.

Таблица 2 – Результаты термодинамического моделирования фазового состава

№ п/п	T, °C	Содержание вторичных фаз, мас. %			
		09Х18Н9		03Х18Н9	
		$M_{23}C_6$	σ–фаза	$M_{23}C_6$	σ–фаза
1	550	1,58	11,38	0,35	4,84
2	1050	0	0	0	0

Основной фазой в аустенитной хромоникелевой стали является γ-твердый раствор, поэтому различия стали при легировании углеродом и азотом выражены в количестве и составе выделений вторичных фаз: карбида хрома $Cr_{23}C_6$ и σ-фазы.

При уменьшении содержания углерода с 0,09 до 0,02 мас. %, содержание карбида хрома $Cr_{23}C_6$ уменьшается в ~ 4,5 раза. Равновесное содержание углерода в твердом растворе при температуре 1050 °С – 0,09 мас. %, а при 550 °С – 0,0003 мас. %, поэтому в процессе аустенизации весь углерод переходит в твердый раствор, а при длительной выдержке при температуре 550 °С твердый раствор становится пересыщенным и начинается выделение карбидов. Поэтому уменьшение содержания углерода в стали с 0,09 до 0,02 мас. % значительно повышает стабильность структуры. Содержание σ-фазы также снижается с 11,38 до 4,84 мас. %.

Азот может находиться в стали в качестве элемента внедрения, растворенного в γ-решетке, а также в виде неметаллических включений, формирующихся при выплавке. Равновесное содержание азота, которое может быть растворено в γ–решетке при температуре 1050 °С составляет 0,05 мас. %, оставшееся количество азота (0,04 мас. %) может быть связано примесями нитридообразующих элементов (алюминий, титан). При температуре 550 °С диффузионная подвижность азота невелика, поэтому содержание азота в количестве до 0,05 мас. % не приведет к образованию выделений вторичных фаз (нитридов хрома), что подтверждается данными моделирования диаграммы состояния системы Fe-Cr-Ni-N [9].

С целью проверки результатов термодинамического моделирования проведено термическое старение стали марок 03Х18Н9 и 09Х18Н9 при температуре 550 °С продолжительностью 15 000 ч. В стали марки 09Х18Н9 вторичные выделения образуют сплошную сетку по границам зерен, границы более широкие и темные по сравнению со сталью марки 03Х18Н9, где в отсутствии выделений их травимость ниже. Кроме того, в теле зерен стали марки 09Х18Н9 наблюдаются выделения, как структурно свободные, так и по двойникам, в отличие от структуры стали марки 03Х18Н9 (рисунок 1). Это подтверждает полученные результаты термодинамического моделирования в части количества вторичных выделений – в стали марки 09Х18Н9 их выявлено значительно больше. Вторичные выделения предположительно являются карбидами хрома $Cr_{23}C_6$, так как в результате исследования микрошлифов после теплового травления при температуре 550 °С установлено, что σ-фаза в структуре отсутствует.

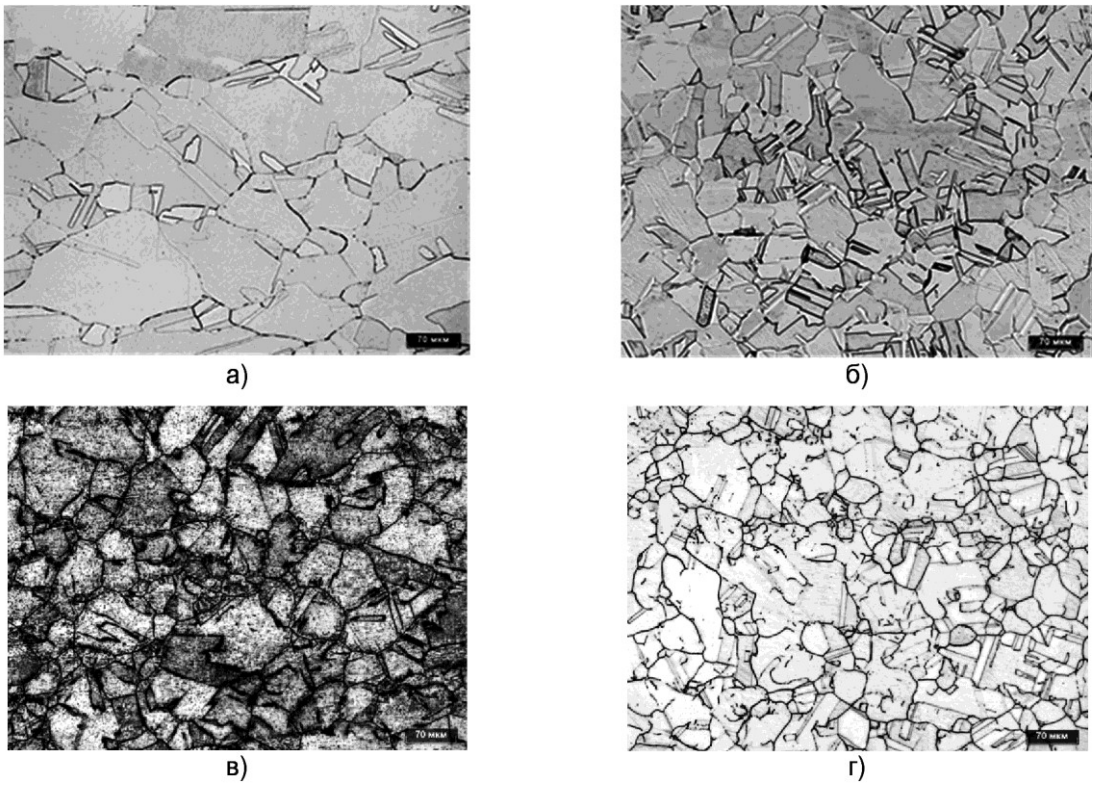


Рисунок 1 – Микроструктура аустенитной хромоникелевой стали с различным содержанием углерода и азота в процессе длительных выдержек при температуре 550°С после выдержки продолжительностью 15000 ч: а), б) исходное состояние стали марок 09Х18Н9 и 03Х18Н9 соответственно; в), г) микроструктура стали марок 09Х18Н9 и 03Х18Н9 соответственно

Результаты электронно-микроскопических исследований структуры стали марок 03Х18Н9 и 09Х18Н9 после тепловых выдержек подтвердили наличие вторичных выделений карбидов хрома типа $Cr_{23}C_6$ (рисунок 2). Вторичных азотсодержащих фаз в стали, легированной азотом, не обнаружено.

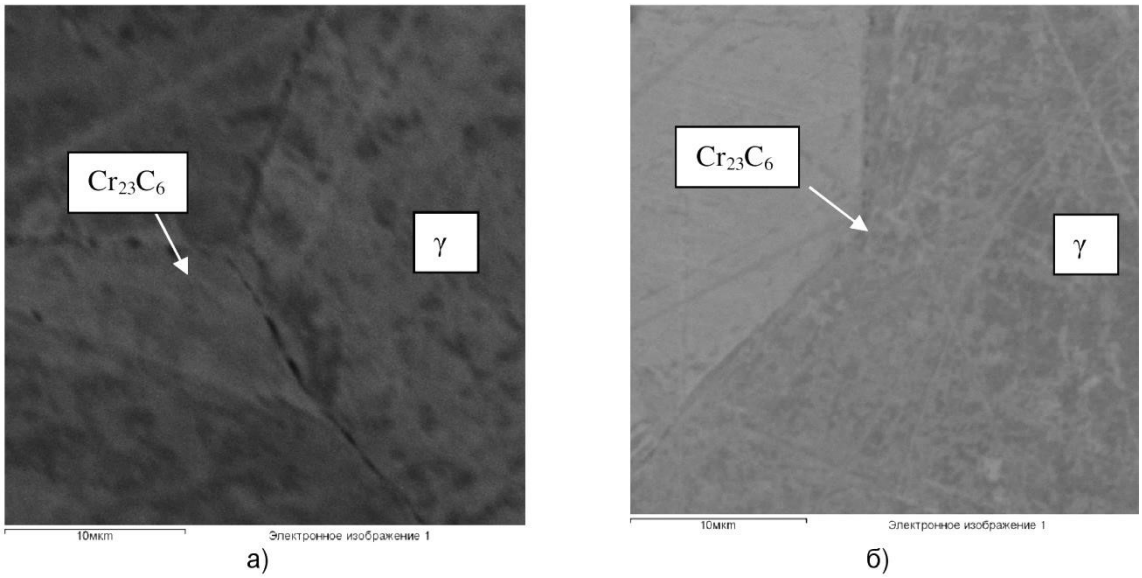


Рисунок 2 – РЭМ-структура стали марок 03Х18Н9 и 09Х18Н9 после термического старения продолжительностью 15 000 ч при температуре 550 °С: а – сталь марки 09Х18Н9; б – сталь марки 03Х18Н9

Заключение

1. По результатам термодинамического моделирования установлено, что в равновесном состоянии при снижении содержания углерода в аустенитной стали хромоникелевой композиции с 0,09 до 0,02 мас. %, содержание карбида хрома $Cr_{23}C_6$ при температуре 550 °С уменьшается в ~ 4,5 раза. Содержание σ-фазы также снижается с 11,38 до 4,84 мас. %.

2. При проведении сравнительного анализа результатов металлографических и электронно-микроскопических исследований структуры стали марок 03Х18Н9 и 09Х18Н9 после выдержки при температуре 550 °С продолжительностью 15 000 ч установлено, что сталь, легированная азотом, демонстрирует высокую стабильность структуры, а легированная углеродом подвержена значительной деградации структуры за счет большого количества вторичных выделений карбида хрома. Сигма-фазы при проведении исследований микрошлифов после теплового травления в структуре стали обоих химических композиций не обнаружено.

Список литературы:

1. Конструкционные материалы АЭС / Ю.Ф. Баландин, И.В. Горынин, Ю.И. Звездин [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.

2. Разработка конструкционных материалов для атомных энергетических установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем / Г.П. Карзов [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 2 (82). – С. 23–33.

3. Влияние длительного эксплуатационного старения на механические свойства и структуру аустенитной стали 10Х18Н9 и металла сварных швов / И.П. Курсевич [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 3 (71). – С. 109–125.

4. Кудрявцев А.С. Влияние длительного теплового старения в составе теплообменного оборудования реакторной установки на быстрых нейтронах на структуру и свойства аустенитной хромоникелевой стали / А.С. Кудрявцев, К.А. Охапкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 907–913.

5. Охапкин К.А. Исследование влияния длительной высокотемпературной эксплуатации на структуру и свойства аустенитной хромоникельмолибденовой стали / К.А. Охапкин, А.С. Кудрявцев // Письма о материалах. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 21–26.

6. Охапкин К.А. Особенности изменений структуры и механических характеристик аустенитного металла шва с различной исходной структурой в процессе высокотемпературной эксплуатации / К.А. Охапкин, Ф.С. Ермаков, Б.В. Федотов // Сварка и диагностика. – 2016. – № 5. – С. 25–29.

7. Голод В.М. Вычислительная термодинамика в материаловедении : учеб. пособие / В.М. Голод, К.Д. Савельев. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 218 с.

8. Практическое руководство по металлографии судостроительных материалов / А.И. Балуев [и др.] ; под ред. И.В. Горынина. – Л. : Судостроение, 1982. – 136 с.

9. Humbert J.C. Solubility of nitrogen in liquid Fe-Cr-Ni alloys / J.C. Humbert, J.F. Elliott // Trans. Met. AIME. – 1960. – № 218. – P. 1076–1088.

УДК 541.64+675.043.82

СОДЕРЖАНИЕ КАУЧУКА В ОТДЕЛЬНЫХ ОРГАНАХ РАСТЕНИЙ *LACTUCA L.* КОЛЛЕКЦИИ ВИР, ВЫРАЩЕННЫХ В УСЛОВИЯХ БАШКИРИИ

Николаева Е.Б. — **Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук**

Игумнова М.М. — **ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР)»**

Артемьева А.М. — **ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР)»**

Кулуев Б.Р. — **Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук**

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию содержания каучука в отдельных органах растений *Lactuca l.* коллекции ВИР, выращенных в условиях Башкирии

Ключевые слова: натуральный каучук, выделение и определение содержания каучука у некоторых сортов латука из коллекции ВИР.

Натуральный каучук – один из важнейших полимеров, вырабатываемых растениями в естественных условиях. Это стратегически важное сырье, которое используется в большом количестве товаров, в том числе и медицинских. Благодаря своей структуре и высокой молекулярной массе натуральный каучук обладает хорошими эксплуатационными свойствами, которые по некоторым параметрам могут опережать искусственно полученные полимеры. Эти высокоэффективные свойства включают прежде всего упругость, эластичность, стойкость к истиранию, эффективное рассеивание тепла (минимизирующее накопление тепла при трении) и ударопрочность. В настоящее время основным коммерческим источником каучука является гевея бразильская *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.), которую преимущественно выращивают в странах Юго-Восточной Азии [4]. Гевею бразильскую можно выращивать только в тропических лесах и при плантационном выращивании она уязвима к грибковым заболеваниям. Поэтому представляется актуальным поиск альтернативных источников высококачественного натурального каучука. Среди других растений широко известным источником высокополимерного натурального каучука является особый вид одуванчика кок-сагыз – *Taraxacum kok-saghyz* Rodin, который можно выращивать на обширных территориях с умеренным климатом [1]. Довольно много высокополимерного каучука накапливает также одуванчик осенний или крым-сагыз – *Taraxacum hybernum* Stev., произрастающий на полуострове Крым [5]. К сожалению, эти виды одуванчиков растут медленно, при выращивании на полях сильно подавляются сорняками, дают маленький урожай корней и в целом требуют многолетних работ по доместикации и окультуриванию. Из культурных растений одним из лучших продуцентов каучука является салат-латук (*Lactuca sativa* L.). У латука посевного много различных форм и сортов и не вызывает сомнения то, что они будут различаться по каучуконакоплению. Однако многочисленные сорта салата-латука пока ещё не анализировались на содержание в них каучука. В связи с этим, целью данной работы было выделение и определение содержания каучука у некоторых сортов латука из коллекции ВИР. Кроме того, большой интерес могут представлять также и другие виды рода *Lactuca* L., к примеру, *Lactuca saligna* L., произрастающий в степях и полупустынях южных регионов России, а также в Средней Азии [8].

В работе были использованы 9 образцов салата-латука, из которых 3 образца *L. sativa* отечественной селекции и пять образцов представлены экспедиционным материалом. Также был использован латук солончаковый *L. saligna*. В исследовании были использованы образцы латука, предположительно перспективные в качестве продуцентов каучука: листовые, быстро растущие с развитой мочковатой корневой системой.

Рассаду в течение месяца выращивали в световой комнате в горшках объёмом 500 мл на универсальном грунте при искусственном освещении (фотопериод 16/8 ч, освещенность 5000 люкс), температуре 23–25 °С и влажности 30–40 %. В начале июня 2024 г. растения пересадили на опытный участок ИБГ УФИЦ РАН (Уфа, Проспект Октября, 71), где культивировали в открытом грунте до наступления фазы массового цветения (июнь–июль). Условия вегетации характеризовались как жаркие и умеренно дождливые: температура варьировала от +10 до +33 °С, осадки обычно выпадали не реже одного раза в неделю; но при их отсутствии свыше недели проводили дополнительный полив.

Для исследования отобрали 9 образцов *Lactuca* L.; для каждого выращивали по 5 растений, которые впоследствии послужили материалом для выделения каучука (n = 5). Собранное сырьё сушили в проветриваемом помещении при комнатной температуре на протяжении 14 суток – за это время каучук полностью переходил в коагулированное состояние. Каждое растение разделяли на четыре органа (корни, стебли, листья, соцветия), измельчали с помощью аналитической мельницы IKA A11 basic и помещали растительный порошок в предварительно взвешенные микропробирки объёмом 2 мл – по две на каждый орган (две аналитические повторности). После взвешивания навесок приступали к выделению каучука.

Процедуру микровыделения, основанную на литературных методах и модифицированную авторами, проводили при комнатной температуре с использованием последовательно полярных (вода, этанол, ацетон), а затем неполярного (гексан) растворителей. На первом этапе к порошку добавляли 1 мл дистиллированной воды, перемешивали 30 мин, центрифугировали при 12 тыс об./мин в течение 20 мин и удаляли водный экстракт; операцию повторяли дважды. Далее аналогично проводили экстракцию этанолом (1 мл, 1 ч на встряхивателе «Ротамикс») и ацетоном (1 мл, 1 ч), отделяя соответствующие экстракты центрифугированием. Поскольку коагулированный каучук нерастворим в полярных растворителях, он сохранялся в осадке на протяжении всех трёх этапов. Заключительную экстракцию осуществляли 1 мл гексана при перемешивании в течение 16 ч; после центрифугирования надосадочную жидкость переносили в новые взвешенные микропробирки и высушивали в термостате при +50 °С в вытяжном шкафу 2,5 ч. Массу полученного сухого остатка – гексанового экстракта – выражали в процентах от сухой массы растительного материала.

Статистическая обработка включала 5 биологических и 2 аналитические повторности. Данные представляли в виде гистограмм со средними значениями и стандартной ошибкой среднего. Значимость различий оценивали с помощью двухфакторного дисперсионного анализа при $p < 0,05$; попарные сравнения выполняли по критерию Тьюки.

По некоторым данным каучук, выделенный в лабораторных условиях при помощи полярных и неполярных растворителей, может содержать около 20 % различных примесей [3], поэтому в дальнейшем для обозначения выделенного материала было решено преимущественно использовать термин гексановый экстракт, под которым подразумевается экстрагируемые гексаном вещества после удаления неполярных растворителей. В зависимости от используемого растворителя похожий термин использовали во многих литературных источниках, где определены массовые доли в % каучука в растительных тканях [2].

В ходе исследования максимальное содержание гексанового экстракта в корнях зафиксировано у сорта Умка (вр.к-3310, Россия) – в среднем оно составило 15,95 %. Схожий высокий уровень экстракта выявлен у испанского образца к-2265; статистически значимых различий между ним и сортом Умка не обнаружено.

Достаточно высокое содержание гексанового экстракта отмечено также в корнях салата Листовой № 22 (к-2360, Россия). При этом у сортов Розелла (к-2292, Россия), Salinas 88 Supreme (к-2166, Япония), Витаминный (к-2867, Россия) и безымянного образца к-2930 (Россия) уровень гексанового экстракта оказался существенно ниже по сравнению с сортом Умка и образцом к-2265.

Минимальные значения содержания экстракта в корнях зафиксированы для образцов вр.к-3340 (*L. sativa*) и к-2333 (*L. saligna*).

В стеблях максимальный уровень гексанового экстракта отмечен у сорта Умка – в среднем 16,36 %. У сорта Розелла и образца к-2265 содержание экстракта оказалось существенно ниже: 11,72 % и 12,55 % соответственно. Ещё более низкие показатели зафиксированы в стеблях образцов вр.к-3340, вр.к-2867, вр.к-2930, к-2333 и к-2360. Минимальное содержание экстракта в стеблях выявлено у сорта Salinas 88 Supreme (к-2166, Япония).

В листьях наиболее высокие значения гексанового экстракта были характерны для сорта Умка и образца к-2265. Статистически значимо более низкий содержание гексанового экстракта обнаружено у образцов вр.к-3340 и к-2360. Ещё меньшее количество экстракта выделено из листьев сортов Salinas 88 Supreme, Витаминный, безымянного образца (вр.к-2930, Россия) и *L. saligna*. Наименьший показатель в листьях зафиксирован у сорта Розелла (к-2292, Россия).

В соцветиях лидирующие позиции по содержанию гексанового экстракта также заняли сорт Умка и образец к-2265. У всех прочих образцов уровень экстракта достоверно уступал этим двум образцам. Минимальное количество экстракта в соцветиях отмечено у образца Листовой № 22.

Результаты проведённого исследования согласуются с опубликованными в литературе сведениями о том, что растения рода *Lactuca* L. – перспективные источники натурального каучука. При этом для экстракции каучука пригодны все органы растения.

Образцы из коллекции салата ВИР демонстрируют заметную вариабельность по уровню содержания каучука, что подчёркивает важность дальнейших поисков наиболее продуктивных форм. В рамках данной работы установлено, что максимальное накопление каучука в тканях характерно для отечественного сорта Умка и образца к-2265 испанского происхождения.

Максимальное содержание гексанового экстракта зафиксировано в стеблях и прикорневой части растений. В листовых пластинках содержание каучука была ниже, что коррелирует с физиологической ролью млечников как защитной системы растения.

Установлено, что пик накопления каучука приходится на фазу цветения. Это подтверждает гипотезу о том, что синтез данных соединений усиливается в период генеративного развития как ответ на стрессовые факторы среды.

Список литературы:

1. Гаршин М.В., Картуха А.И., Кулуев Б.Р. Кок-сагыз: особенности культивирования, перспективы возделывания и внедрения в современное производство // Биомика. – 2016. – № 4. – С. 323–333.

2. Ильин М.М. Каучуконосность флоры СССР // в кн. Каучук и каучуконосы / Под ред. Ильина М.М. – 1953. – Т. 2 – С. 9–104.

3. Келлер А.Б. Каучук и каучуконосы. – М.-Л., 1936. –Т. 1. – 487 с.

4. Натуральный каучук, его источники и составные части / Б.Р. Кулуев, Р.Р. Гарафутдинов, И.В. Максимов [и др.] // Биомика. – 2015. – № 4. – С. 224–283.

5. Молекулярно-генетическое исследование одуванчика осеннего (*Taraxacum hybernum* Steven) с использованием SSR-, RAPD- и ISSR-маркеров / Б.Р. Кулуев, А.В. Фатерыга, А.Р. Кулуев [и др.] // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2018. – Т. 22(1). – С. 102–107.

6. Поиск потенциальных каучуконосов во флоре Республики Башкортостан / Б.Р. Кулуев, А.А. Мулдашев, Н.Д. Минченков [и др.] // Растительные ресурсы. – 2019. – Т. 55. – № 3. – С. 317–333.

7. Кулуев Б.Р., Минченков Н.Д., Гумерова Г.Р. Кок-сагыз (*Taraxacum koksaghyz* Rodin): методы выделения каучука и перспективы использования биотехнологических подходов // Биотехнология и селекция растений. – 2019. – Т. 2(2). – С. 33–43.

8. Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. 10-е изд. – М. : Т-во научных изданий КМК, 2006. – 600 с.

УДК 621.671:622.276.53

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ТИПА ЦНС КАК ОСНОВА КРИТЕРИЯ ВЫВОДА В КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ

Петров Виктор Николаевич

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»
аспирант, научная специальность 2.5.21 «Машины, агрегаты и технологические процессы»
v.petrov@agni-rt.ru

Аннотация. Предложен методический подход к формированию комплексного критерия вывода в капитальный ремонт насосных агрегатов типа ЦНС/ЦНСн, эксплуатируемых на дожимных насосных станциях нефтяных промыслов. Подход объединяет оценку напорной характеристики, коэффициента полезного действия, удельных энергозатрат и вибрационного состояния. Показано, что прямое сопоставление текущих и базовых параметров без учета положения рабочей точки, вязкости и плотности перекачиваемой жидкости, цикличности режима и загрузки электропривода может приводить к ошибочной интерпретации ухудшения энергетических показателей как износа проточной части. Для сопоставимых режимов введены нормированные показатели напора k_H и КПД k_η, а также предложена оценка темпа их изменения по наработке. Сформирована последовательность принятия решения «продолжение эксплуатации – углубленная диагностика – капитальный ремонт» с учетом действующих производственных критериев и технико-экономической проверки. Работа носит методический характер; численные границы новых комплексных показателей должны быть установлены по результатам ретроспективного анализа и натурных испытаний насосов до и после капитального ремонта.

Ключевые слова: центробежный секционный насос; ЦНС; дожимная насосная станция; техническое состояние; напор; КПД; удельные энергозатраты; вибродиагностика; капитальный ремонт; остаточный ресурс.

Введение

Насосные агрегаты дожимных насосных станций (ДНС) работают при изменяющихся подаче, свойствах нефтесодержащей жидкости и гидравлическом сопротивлении промысловой сети. В этих условиях момент капитального ремонта (КР) должен определяться не только календарной или межремонтной наработкой, но и фактическим техническим состоянием. Производственная инструкция ПАО «Татнефть» ЕРБ 1987–2021 относит к критериям вывода насосов перекачки в КР снижение напорной характеристики, увеличение удельных энергетических затрат, ухудшение параметров вибрации и технико-экономическую целесообразность [1].

Для насосов системы сбора и подготовки нефти инструкция устанавливает, в частности, постепенное снижение развиваемого напора на 12 % и более относительно базовой характеристики либо одномоментное снижение развиваемого давления на 10 % и более при неизменном режиме. Для удельных энергозатрат предусмотрено превышение текущего уровня на 20 % относительно базового либо одномоментный рост потребления на 10 % и более при неизменном режиме [1]. Эти признаки практически значимы, однако их корректное применение требует сопоставимости базового и текущего режимов.

Методика расчета энергетических потерь показывает, что снижение эффективности насосного агрегата может быть обусловлено не только ухудшением технического состояния, но и работой вне рабочей зоны, повышением вязкости жидкости, циклическим режимом и несоответствующей загрузкой электродвигателя [2]. Следовательно, научная задача состоит в отделении собственно деградации насоса от режимных факторов и в объединении нескольких диагностических каналов в единую систему принятия решения.

Цель работы – разработать структуру комплексной оценки технического состояния насосных агрегатов ЦНС/ЦНСн на ДНС, позволяющую формировать обоснованный критерий вывода в КР по приведенным гидравлическим и энергетическим параметрам с независимым контролем вибрационного состояния. Новые универсальные численные пороги в настоящей работе не устанавливаются.

Материалы и методы

В качестве нормативно-методической базы использованы производственная инструкция по выводу насосов ДНС в КР [1], методика расчета потерь энергии насосных установок и агрегатов [2], методика оценки технического состояния высоконапорных ЦНС [3], а также результаты диссертационного исследования Г.И. Бикбулатовой по контролю состояния высоконапорных насосных агрегатов [4]. Объектом предлагаемого исследования являются насосы ЦНСн типоразмеров с номинальной подачей 105, 180 и 300 м³/ч. По приложенным справочным характеристикам их рабочие зоны подачи составляют соответственно 75–125, 130–220 и 220–360 м³/ч; конкретный напор определяется числом ступеней и исполнением насоса [5].

Базовой следует считать характеристику, полученную после приработки нового или капитально отремонтированного агрегата на фактически перекачиваемой среде. Такой подход соответствует производственной инструкции, где базовые характеристики связываются с испытаниями после 72-часовой и до 100-часовой наработки [1]. Для текущей диагностики необходим синхронный сбор подачи Q, давлений на входе и выходе p_1 и p_2, плотности ρ, температуры, вязкости, электрической мощности, параметров электродвигателя и вибрации.

Фактический напор насоса определяется из уравнения:

$$H = (p_2 - p_1)/(\rho g) + (v_2^2 - v_1^2)/(2g) + (z_2 - z_1), \quad (1)$$

где H – напор, м; p_1, p_2 – абсолютные или избыточные давления в согласованных сечениях, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g = 9,81 м/с²; v_1, v_2 – средние скорости в соответствующих сечениях, м/с; z_1, z_2 – геодезические отметки центров сечений, м.

Полезная гидравлическая мощность потока:

$$Pг = \rho g Q H, \quad (2)$$

где Pг – гидравлическая мощность, Вт; Q – подача, м³/с. При известной мощности на валу Pв КПД насоса определяется как ηн = Pг/Pв.

Если используется электрическая мощность Pэл на входе электродвигателя, получают КПД агрегата ηа = Pг/Pэл, включающий потери электродвигателя и передачи. Смешивать эти два показателя при оценке износа проточной части нельзя.

$$\eta н = Pг / Pв; \; \eta а = Pг / Pэл. \quad (3)$$

Удельный расход электрической энергии на перекачку единицы объема при установившемся режиме можно представить как:

$$e = Pэл / Qч, \quad (4)$$

где e – кВт·ч/м³ при Pэл в кВт и Qч в м³/ч.

Для длительного интервала предпочтительно отношение фактически потребленной энергии Wэл, кВт·ч, к объему перекачки V, м³: e = Wэл/V.

Для исключения влияния режима предлагается сравнивать не непосредственно измеренные H и η, а значения, приведенные к сопоставимой подаче и свойствам жидкости. Нормированные диагностические показатели имеют вид:

$$k_H(t) = H_{факт,прив}(Q,t) / H_{баз}(Q), \quad (5)$$

$$k_\eta(t) = \eta_{факт,прив}(Q,t) / \eta_{баз}(Q). \quad (6)$$

При исправном и сопоставимом состоянии показатели близки к единице. Их снижение отражает изменение относительно индивидуальной базовой характеристики конкретного агрегата. Для раннего выявления ускоряющейся деградации дополнительно используется средний темп изменения между двумя диагностиками:

$$r_x = [x(t_2) - x(t_1)] / (t_2 - t_1), \; x \in \{k_H, k_\eta, \text{VСКЗ}\}. \quad (7)$$

Знак и модуль r_x характеризуют направление и скорость изменения показателя за единицу наработки. Для k_H и k_η ухудшению соответствует отрицательный тренд; для виброскорости VСКЗ – положительный.

Таблица 1 – Диагностические признаки состояния насосного агрегата

Показатель	Физический смысл	Достоинство	Ограничение
Напор H	Интегрально отражает способность проточной части создавать энергию потока	Прямо связан с назначением насоса; имеется базовая характеристика	Зависит от подачи и вязкости; требует приведения режима
КПД η	Отражает совокупность гидравлических, объемных и механических потерь	Чувствителен к внутренним перетокам и износу проточной части	КПД агрегата дополнительно зависит от электродвигателя и передачи
Удельные энергозатраты e	Характеризуют энергетическую цену перекачки 1 м³	Непосредственно связаны с эксплуатационными затратами	Меняются при изменении напора сети, режима, вязкости и цикличности
Вибрация VСКЗ	Характеризует динамическое состояние ротора, опор и гидродинамические процессы	Позволяет выявлять механические дефекты без разборки	Не является прямым показателем гидравлической эффективности; нужен тренд и спектр

Результаты и обсуждение

Основным методическим результатом является разделение наблюдаемого ухудшения энергетических показателей на две составляющие: изменение, обусловленное техническим состоянием самого насоса, и изменение, вызванное внешними режимными факторами. Согласно методике энергетического анализа, для ДНС особенно существенны положение рабочей точки, вязкость нефтесодержащей жидкости и цикличность работы [2]. Поэтому снижение фактического КПД без нормализации режима не может автоматически интерпретироваться как основание для КР.

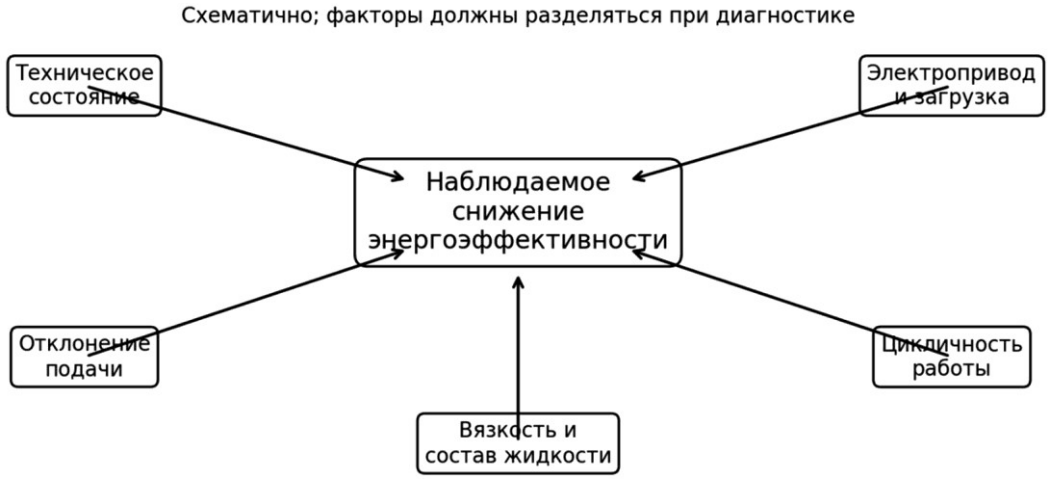


Рисунок 1 – Факторы, формирующие наблюдаемое снижение энергоэффективности насосного агрегата (схематично, не экспериментальные данные)

Вибродиагностика формирует независимый канал контроля механического состояния. В приложенной методике рекомендуется измерять виброскорость в четырех характерных точках агрегата – на заднем и переднем подшипниках электродвигателя и насоса – в трех взаимно перпендикулярных направлениях [3]. Производственные нормы предусматривают длительную эксплуатацию при СКЗ виброскорости до 4,5 мм/с; диапазоны 4,5–7,1 и 7,1–11,2 мм/с требуют учета режима, усиленного контроля и ограничений, а значения свыше 11,2 мм/с рассматриваются как недопустимые [1, 3]. При этом важен не только абсолютный уровень, но и скорость его роста.

В работе Г.И. Бикбулатовой показана принципиальная возможность использовать изменение напорной и энергетической характеристик для оценки состояния гидравлической части высоконапорных ЦНС, а степень восстановления гидравлического КПД после ремонта – для оценки качества КР [4]. Полученный для исследованных автором высоконапорных насосов вывод о нецелесообразности последующих ремонтов при снижении восстановленного гидравлического КПД более чем на 4 процентных пункта относительно паспортного значения нельзя непосредственно переносить на насосы ДНС: иные напоры, жидкости, режимы и экономические условия требуют самостоятельной проверки.

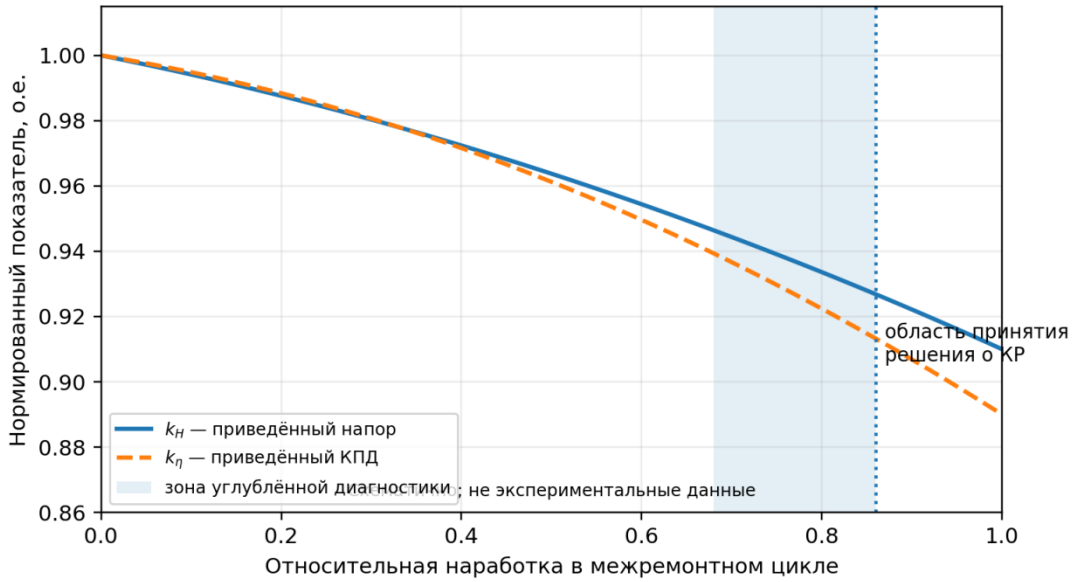


Рисунок 2 – Концептуальные тренды нормированных показателей k_H и k_η в межремонтном цикле (схематично, не экспериментальные данные; численные пороги не задаются)

Смысл совместного анализа k_H и k_η состоит в повышении диагностической определенности. Устойчивое снижение обоих показателей при сопоставимом режиме усиливает гипотезу о деградации проточной части. Снижение η при стабильном k_H требует проверки электропривода, положения рабочей точки и методики определения мощности. Снижение k_H при росте вибрации может указывать на развитие механико-гидродинамического дефекта. Таким образом, решение формируется не по одному измерению, а по совокупности уровней и трендов.

Таблица 2 – Предлагаемый алгоритм формирования решения о капитальном ремонте

Этап	Операция	Содержание
1	Сбор данных	Синхронные Q, p_1, p_2, ρ, v, T, $P_{эл}$, наработка, режим, вибрация
2	Контроль сопоставимости	Проверка приборов, установившегося режима, рабочей зоны, свойств жидкости
3	Приведение характеристик	Пересчет H и η к базовой подаче/вязкости или выбор сопоставимых точек
4	Расчет индикаторов	k_H, k_η, e и темпы изменения по наработке
5	Независимая диагностика	СКЗ виброскорости, тренд; при необходимости спектральный анализ
6	Проверка действующих критериев	Сопоставление с ЕРБ 1987-2021 и эксплуатационными ограничениями
7	Экономическая проверка	Сопоставление дополнительных эксплуатационных затрат и затрат на КР
8	Решение	Продолжить эксплуатацию / углубить диагностику / вывести в КР

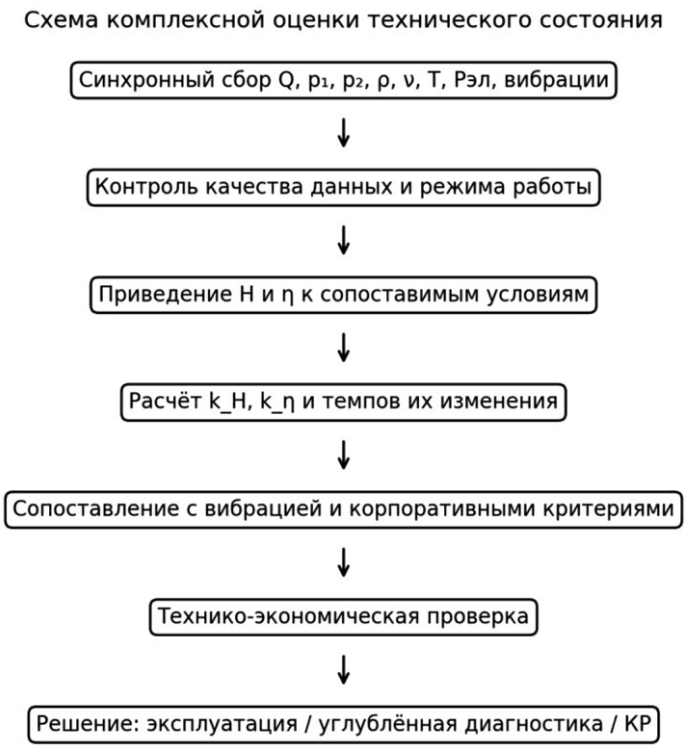


Рисунок 3 – Блок-схема комплексной оценки технического состояния и принятия решения (схематично)

Технико-экономическая часть не должна подменять технические ограничения безопасности. В ЕРБ 1987-2021 предусмотрено сравнение эксплуатационных затрат, связанных с дополнительной электроэнергией, техническим обслуживанием, диагностикой и текущими ремонтами, с затратами на демонтаж/монтаж, транспортирование, собственно КР и пусконаладочные работы [1]. В рамках диссертационного исследования этот подход целесообразно расширить сравнением трех альтернатив на едином горизонте: продолжение эксплуатации, очередной КР и приобретение нового насоса.

Для последующего определения рационального числа КР предлагается после каждого j-го ремонта фиксировать коэффициенты восстановления $R_{H,j} = H_0,j/H_{new}$ и $R_{\eta,j} = \eta_0,j/\eta_{new}$, а также длительность последующего межремонтного цикла T_j. Накопление таких данных позволит проверить гипотезу о снижении полноты восстановления и сокращении ресурса после повторных ремонтов. На данном этапе эти зависимости являются программой дальнейшего исследования, а не установленной закономерностью.

Практическая верификация должна выполняться раздельно для групп ЦНСн 105, 180 и 300 м³/ч и, по возможности, с учетом числа предыдущих КР. Минимальная структура выборки должна включать новый/не ремонтировавшийся агрегат, агрегаты после первого, второго и последующих КР, а измерения – проводиться в нескольких точках рабочей зоны. Это позволит оценить воспроизводимость k_H и k_η и статистически определить границы перехода от нормальной эксплуатации к углубленной диагностике и КР.

Ограничения исследования

Представленная статья имеет методический характер. Приведенные на рисунках тренды и зоны являются схемами и не основаны на искусственно сформированной экспериментальной выборке. Численные границы k_H и k_η не назначаются: их определение требует ретроспективных данных по наработке, ремонтам и отказам, а также натурных испытаний насосов до и после КР. Отдельной задачей остается метрологическая оценка применимости термодинамического метода определения гидравлического КПД на насосах ДНС с меньшим напором, чем у высоконапорных насосов ППД.

Заключение

1. Действующие производственные критерии вывода насосов ДНС в капитальный ремонт целесообразно использовать как обязательные ограничения, дополняя их анализом приведенных напорных и энергетических характеристик.

2. Для отделения износа проточной части от режимного снижения эффективности предложены нормированные показатели k_H и k_η, рассчитываемые относительно индивидуальной базовой характеристики при сопоставимых подаче и свойствах жидкости.

3. Совместный анализ напора, КПД, удельных энергозатрат и вибрации, дополненный оценкой их трендов, формирует основу последовательного решения «эксплуатация – углубленная диагностика – капитальный ремонт».

4. Экономический критерий момента КР и предельного числа ремонтов должен определяться на следующем этапе исследования путем сопоставления затрат на продолжение эксплуатации, очередной КР и приобретение нового насоса с учетом фактического восстановления характеристик после каждого ремонта.

Список литературы:

1. ЕРБ 1987-2021. Производственная инструкция по выводу в капитальный ремонт насосов перекачки на ДНС. ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина. – Бугульма, 2021.

2. Методика расчета потерь энергии в насосных установках и агрегатах: отчет о НИР «Анализ энергоэффективности объектов наземной промысловой инфраструктуры блока «РиД»». – Альметьевск : АГТУ ВШН, 2024.

3. Методика оценки технического состояния высоконапорных насосных агрегатов типа ЦНС. – Альметьевск, 2026.

4. Бикбулатова Г.И. Совершенствование методов контроля технического состояния высоконапорных насосных агрегатов : автореф. 05.02.13. – Уфа, 2005.

5. Справочные технические характеристики насосов ЦНСн 105, ЦНСн 180 и ЦНСн 300. Каталожные данные изготовителя.

6. ГОСТ 10407-88. Насосы центробежные многоступенчатые секционные. Типы и основные параметры.

7. ГОСТ 6134-2007. Насосы динамические. Методы испытаний.

8. ГОСТ 33967-2016. Насосы центробежные для перекачивания вязких жидкостей. Поправки к рабочим характеристикам.

9. ГОСТ Р 55265.7-2012 (ИСО 10816-7:2009). Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 7. Насосы динамические промышленные.

10. ГОСТ ISO 17769-1-2014. Насосы жидкостные и установки. Основные термины, определения, количественные величины, буквенные обозначения и единицы измерения. Часть 1. Жидкостные насосы.

11. ISO 9906:2012. Rotodynamic pumps – Hydraulic performance acceptance tests – Grades 1, 2 and 3.

12. Karassik I.J., Messina J.P., Cooper P., Heald C.C. Pump Handbook. 4th ed. – New York : McGraw-Hill, 2008.

УДК 665.775

ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ ПО СТАНДАРТНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Пискунов Иван Васильевич
Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
канд. техн. наук, доцент
piskunov.ivan.v@gmail.com

Антонов Андрей Сергеевич
Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
магистрант

Аннотация. Рассмотрены возможности прогнозирования реологических характеристик дорожных битумов по результатам стандартных испытаний. Сопоставлены физический смысл показателей и опубликованные данные о соответствии традиционных марок требованиям к маркам PG. Показано, что корреляции для верхней критической температуры пригодны для предварительной оценки в пределах исследованной совокупности образцов. Прогноз низкотемпературных свойств требует отдельных измерений и проверки модели с учётом происхождения битума. Сформулированы условия применения метода экспресс-оценки при производственном контроле на НПЗ.

Ключевые слова: дорожный битум, реологические свойства, пенетрация, температура размягчения, марка PG, прогнозирование качества.

Переход к классификации дорожных битумных вяжущих по температурному диапазону эксплуатации повышает требования к прогнозированию поведении материала при нагружении. В ГОСТ Р 58400.1-2019 марку PG устанавливают по результатам комплекса испытаний исходного и состаренного вяжущего [1]. На НПЗ в оперативном контроле сохраняют значение традиционные показатели, прежде всего пенетрация при 25 °С, температура размягчения по кольцу и шару, растяжимость и температура хрупкости. Их определение технологически доступнее полного комплекса реологических испытаний. Поэтому представляет интерес оценка того, в какой мере эти показатели позволяют предварительно прогнозировать свойства, необходимые для отнесения битума к PG-марке.

Цель настоящей работы – определить границы применимости такого прогноза на основе результатов проведенных исследований и сформулировать требования к математическим моделям для производственного контроля. Под прогнозом понимается оценка реологического показателя или вероятности выполнения соответствующего требования без проведения полного цикла испытаний. Расчётная оценка не заменяет необходимость полноценных испытания, предусмотренные стандартом для установления и подтверждения марки (паспортизации).

Причины неоднозначных зависимостей между показателями обусловлены особенностями состава и дисперсной структуры битума. Асфальтены, смолы и жидкие компоненты дисперсионной среды формируют систему, чувствительную к температуре и предыстории воздействий на систему. Изменение состава гудрона, глубины его отбора, условий окисления или рецептуры смешения компонентов способно изменить вязкоупругий отклик без пропорционального изменения пенетрации [2]. Следовательно, сходство по одному стандартному показателю не означает равенства набора эксплуатационных характеристик. Полученные модели должны учитывать происхождение образцов и диапазон условий, в котором получена исходная зависимость. При анализе необходимо разделять верхнюю и нижнюю границы температурного диапазона, поскольку они характеризуют разные механизмы деформирования вяжущего.

Для высокотемпературной области установлены практически полезные корреляции между характеристиками. В опубликованных исследованиях [2, 3] верхняя критическая температура PG имеет хорошую корреляцию с температурой размягчения, а динамическая вязкость при 60 °C сопоставлялась с сопротивлением сдвигу. По данным анализа отдельных совокупностей коэффициент детерминации зависимости верхней критической температуры от температуры размягчения составлял 0,75–0,87 [2, 3]. Эти значения характеризуют качество корреляций именно для рассмотренных образцов, но они не дают основания переносить полученные коэффициенты на иной НПЗ или на битумы, приготовленные по другой технологии.

Температура размягчения отражает изменение консистенции битума в условиях конкретного метода испытания. Высокотемпературный критерий PG устанавливают по реологическому отклику, в том числе с учётом изменения свойств после кратковременного старения [1]. При одинаковой температуре размягчения образцы могут различаться соотношением упругой и вязкой составляющих деформации. Поэтому уравнение, основанное только на температуре размягчения, целесообразно применять для отбора проб, требующих дополнительного анализа, и для предварительной оценки, когда расчётное значение удалено от границы марки. Вблизи границы марки PG возрастает значение ошибки измерения и ошибки модели.

Для низкотемпературной области ограничения выражены сильнее. Стандартные испытания на растяжимость или определение температуры хрупкости не воспроизводят непосредственно процедуру оценки жёсткости и скорости её изменения при деформировании состаренного вяжущего. В проанализированной литературе устойчивая связь нижней критической температуры PG с температурой хрупкости не обнаружена. Для растяжимости при 0 °C приведён пример слабой корреляции с нижней границей PG: коэффициент детерминации составлял 0,24 [2, 3]. Для повышения точности модели требуется проведение дополнительных исследований.

Показательна вариация свойств внутри одной традиционной марки. При исследовании 26 образцов БНД 70/100 получены шесть различных PG-марок в диапазоне от PG 58-16 до PG 64-34 [2, 3]. Следовательно, обозначение БНД 70/100 задаёт ограниченный интервал пенетрации, но не однозначно определяет температурный диапазон применения. Особенно существенным оказывается различие по низкотемпературной границе. При сопоставлении марок следует сравнивать фактические результаты испытаний и не трактовать обозначения традиционных марок как готовый перевод в классификацию PG.

Дополнительные данные получены при анализе 50 образцов трёх традиционных марок с двух НПЗ [4]. Для марки БНД 70/100 доля проб, удовлетворявших требованиям к некоторым PG-маркам, различалась между предприятиями (таблица 1). Отмеченные доли относятся к совокупностям проб соответствующего НПЗ. В публикации не приведено число проб БНД 70/100 в каждой из этих совокупностей, поэтому на основании указанных процентов нельзя оценивать статистическую значимость различий.

Таблица 1 – Доля образцов БНД 70/100, отвечающих требованиям к отдельным PG-маркам [4]

Требования марки PG	НПЗ № 1, % образцов	НПЗ № 2, % образцов
PG 58-28	100	71
PG 64-28	67	53

Различие между продуктами с разных НПЗ показывает зависимость результата сопоставления от параметров производства битума. Для проверки роли сырья и технологии нужны данные о составе и способе получения каждой партии.

Постановку задачи прогнозирования целесообразно разделить на два уровня. На первом оценивают непрерывную величину – например, критическую температуру выполнения высокотемпературного реологического требования. На втором по этому прогнозу предварительно оценивают соответствие установленным границам марки. Такая последовательность сохраняет информацию о расстоянии до порога, которая

теряется при прямом предсказании только обозначения PG. Для нижней критической температуры следует построить отдельную зависимость. Объединение верхней и нижней границ в один показатель без проверки точности каждой оценки может скрыть слабое звено прогноза.

Для построения модели нужны результаты стандартных и реологических испытаний одних и тех же образцов битума с указанием их происхождения и состояния после старения. Пропуски и несогласованные единицы измерения могут создавать ложные корреляции. Валидацию проводят на партиях, не использованных для подбора коэффициентов. Перенос между НПЗ требует отдельной проверки на продукции другого предприятия.

Коэффициент детерминации следует дополнять оценкой ошибки в градусах и частоты неверного отнесения к PG-марке. Особенно существенны ошибки вблизи температурной границы марки. Для производственного применения важно определить долю ложноположительных прогнозов, когда расчёт предсказывает выполнение требования, а реологическое испытание его не подтверждает.

Таким образом, прогноз по стандартным показателям может сокращать время предварительной оценки высокотемпературных свойств и помогать в текущем контроле качества. Для низкотемпературной границы простые корреляции недостаточны. Реологические испытания сохраняют обязательное значение при подтверждении PG-марки. Для предварительного контроля целесообразны математические модели, настроенные на определённое производство, проверенные на независимых партиях и сопровождаемые указанием области применимости.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 58400.1-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Технические условия с учётом температурного диапазона эксплуатации (с изм. № 1, 2025).

2. Piskunov I.V., Bashkirceva N.Yu., Emelyanycheva E.A. The mathematical modeling of bitumen properties interrelations (review) // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2022. – Vol. 57. – № 3. – P. 464–479.

3. Исследование корреляций свойств нефтяных дорожных битумов по методологии Суперпейв / О.Р. Паршукова, А.Г. Егоров, А.А. Андреев [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2020. – № 11. – С. 9–16.

4. Антонов А.С., Пискунов И.В. Взаимосвязь стандартных и реологических показателей битумных вяжущих // Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса: материалы XVIII научно-практической конференции. – М., 2026. – С. 104.

УДК 614.843.8

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ТУШЕНИИ ТУРБИННЫХ ОТДЕЛЕНИЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЕЙ

Попова Елена Викторовна
Уфимский государственный нефтяной технический университет
канд. техн наук, доцент, доцент кафедры «Пожарная и промышленная безопасность»
evpopova10@yandex.ru

Файзуллин Айдар Рамилевич
Уфимский государственный нефтяной технический университет
магистр кафедры «Пожарная и промышленная безопасность»
fayzullin_ar@bgkrb.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос возможности применения мобильных роботизированных средств при тушении пожаров в турбинных отделениях теплоэлектроцентралей. Грамотный подбор и организованное использование мобильных роботизированных средств позволит эффективно производить ликвидацию горения без создания угрозы жизни и здоровью личного состава пожарной охраны.

Ключевые слова: тушение пожаров, мобильные роботизированные средства, турбинное отделение, теплоэлектроцентраль.

Предприятия, входящие в топливно-энергетический комплекс, всегда были объектами повышенной пожарной опасности. Пожары на данных объектах осложнены наличием технологических устройств под высокими напряжениями, а так же большого количества горючих веществ, выделяющих в процессе горения много тепла. Для примера можно привести статистическую выкладку об авариях на объектах нефтегазовой отрасли за период 2020-2024 годов, когда за пятилетний период было зарегистрировано порядка 250 аварий, из которых около 60 сопровождались пожаром или взрывом [1].

Учитывая высокую пожарную опасность объектов топливно-энергетического комплекса, очень важным является своевременная локализация и ликвидация пожара, при максимальном обеспечении безопасности личного состава пожарной охраны. Всего этого невозможно добиться, не имея на вооружении современных пожарно-технических средств тушения пожара [2]. Например, в настоящее время при тушении пожаров в резервуарных парках, при использовании пеноподъемников необходимо производить подачу в начале пены низкой кратности для сбития турбулентного режима горения, а потом подавать пену средней кратности для окончательной ликвидации горения. Для самого пеноподъемника, на всем протяжении тушении пожара, необходимо обеспечить охлаждение его стрелы и устройства подачи огнетушащего вещества. При необходимости подачи стволов на тушение пожара в обваловании резервуара увеличивается риск получить ожоги у личного состава, так как при пожарах в резервуарах наблюдается высокая мощность теплового потока [3].

Кроме воздействия опасных факторов пожара при локализации и ликвидации горения на объектах топливно-энергетического комплекса личному составу пожарной охраны во время ведения боевых действий могут угрожать оборудование под высоким напряжением, взрывы сосудов под давлением, обрушения конструкций и иные негативные события [4]. Данные опасности снижают скорость процесса тушения пожара, что в некоторых ситуациях приводит к его распространению. В настоящее время для решения трудных пожаров и решения опасных задач по эвакуации людей и материальных ценной из областей с высокой концентрацией опасных факторов пожара все чаще стали использовать наземные роботехнические комплексы. При этом важно пра-

вильно подобрать вид роботехнического средства и организовать процесс ликвидации горения, в частности процесс взаимодействия между несколькими мобильными средствами.

Далее в работе подробнее рассмотрим тактические особенности тушения турбинных отделов теплоэлектроцентралей путем применения мобильных роботизированных установок пожаротушения (далее МРУП). Турбинное отделение представляет собой трехэтажное строение с высотой потолков 6-7 метров. На первом этаже находится насосное хозяйство, на втором – турбогенераторы и их щиты управления, на третьем – диаэраторы. Следовательно, использование МРУП оправдано наличием технических устройств под напряжением, и осложнено необходимостью доставки МРУП на верхние этажи объекта.

Тушение насосного хозяйства, располагающегося на первом этаже турбинного отделения теплоэлектроцентрали, путем применения МРУП сводится к использованию передвижной пожарной техники, которую необходимо разместить на водоисточниках на безопасных расстояниях. Подъезд МРУП к очагу пожара при тушении на первом этаже возможен через входную группу объекта (преимущественно через ворота). Принципиальная схема использования МРУП при тушении турбинного отделения теплоэлектроцентрали приведена на рисунке 1.

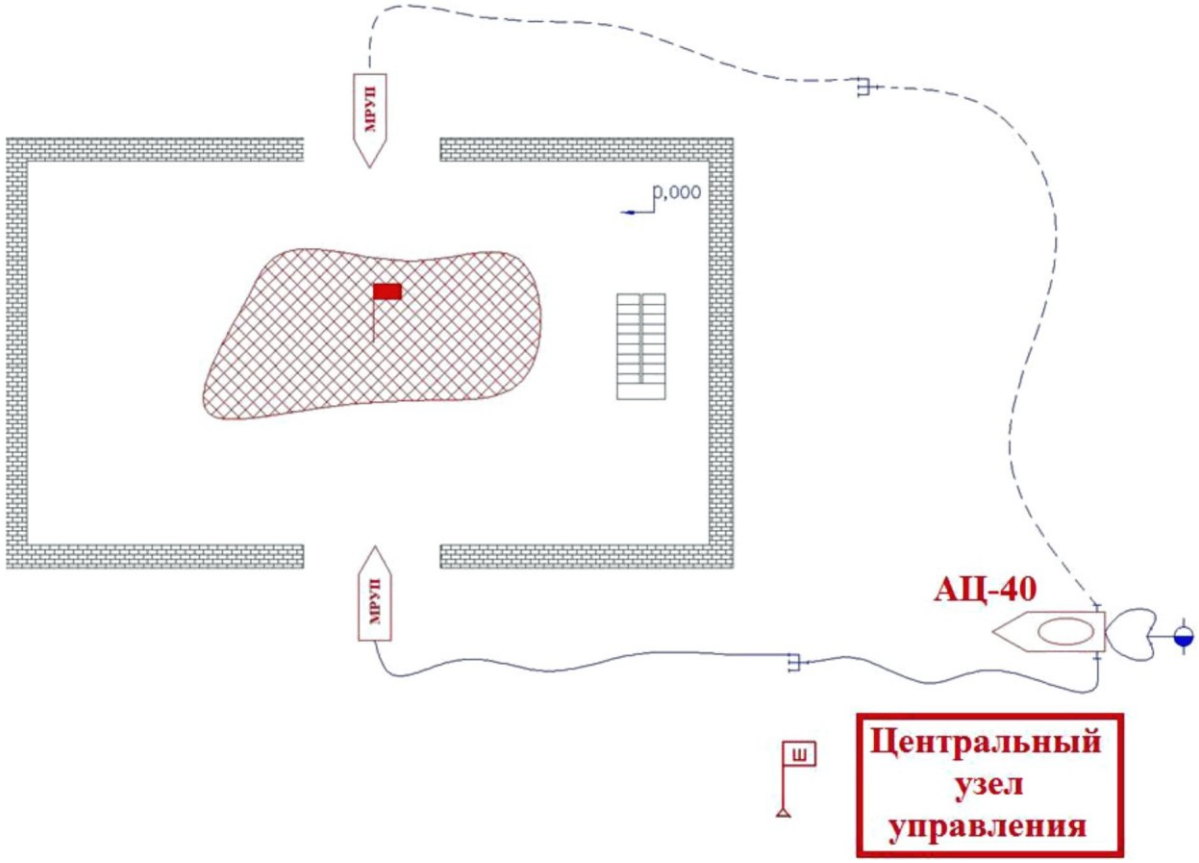


Рисунок 1 – Принципиальная схема использования МРУП при тушении первого этажа турбинного отделения теплоэлектроцентрали

Тушений помещений второго и третьего этажа турбинного отделения теплоэлектроцентрали путем применения МРУП затрудняется их доставкой. Поэтому в данной ситуации рационально использовать МРУП малой массой – не более 110 кг, что позволит осуществлять их подъем по общим лестничным клеткам ручным методом силами личного состава пожарной охраны, либо при помощи различных подъемных механизмов.

В случаях угрозы взрыва или обрушения конструкций МРУП необходимо использовать для укрытия личного состава пожарной охраны. Для этих целей МРУП располагают на верхнем этаже турбинного отделения в наивысшей точке, что позволяет

подпереть несущие конструкции покрытия здания, тем самым обеспечив максимальную защиту строительных конструкций.

Проблемный вопрос начала подачи пожарных стволов на тушение пожара электрооборудования под напряжением в турбинных отделениях теплоэлектроцентрали решается легко при использовании МРУП путем их использования с заранее заземленными компонентами, соединенными с передвижной техникой (например, насосы пожарных автоцистерн).

При тушении любых пожаров в турбинных отделениях теплоэлектроцентрали, операторы МРУП являются ключевым звеном, отвечающим за эффективность ликвидации горения. Эффективность управления МРУП напрямую зависит от обзора обстановки от лица оператора, и она будет достигать максимума, если оператор находится вблизи очага пожара, что возможно достичь путем использования камер видеонаблюдения или беспилотных летательных аппаратов разведывательного типа.

Сравнительные расчеты сил и средств на тушение турбинного отделения теплоэлектроцентрали показали перспективность использования МРУП. Расчетами получено сокращение времени ликвидации пожара на 25–40 % (в зависимости от этажа тушения), снижение числа личного состава в среднем на треть, что способствует снижению угрозы для жизни и здоровью пожарных.

Список литературы:

1. Василькин В.М. Современные методы анализа риска аварий и пожаров на объектах нефтегазовой отрасли // Вестник науки. – 2025. – Т. 4. – № 4 (85). – С. 902–907.

2. Хафизов И.Ф. Универсальная насадка пожарных стволов для защиты личного состава и пожарных автомобилей / И.Ф. Хафизов, А.В. Краснов, А.Д. Ключникова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2026. – № 4. – С. 7–23.

3. Заузанов М.Н., Бородин В.А. Проблемы тушения пожаров в вертикальных стальных резервуарах // Актуальные вопросы пожаротушения. Сборник материалов Всероссийского круглого стола. – 2020. – С. 50–52.

4. Шарафутдинов А.А. Исследование поведения стеновых сэндвич-панелей, орошаемых дренчерной завесой, при одностороннем тепловом воздействии / А.А. Шарафутдинов, А.В. Краснов, А.М. Газизов // Безопасность труда в промышленности. – М., 2022. – № 2. – С. 27–31.

УДК 66.074.332

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО CO_2 В ЗАМКНУТЫХ ОБИТАЕМЫХ ОБЪЕКТАХ ТЕХНОСФЕРЫ

Рукавицин С.Н. | **АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения» (АО «НИИхиммаш»)**
главный конструктор – начальник отделения
rukavitsinsergey@mail.ru

Бутылкин Ю.П. | **АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения» (АО «НИИхиммаш»)**
кандидат технических наук, начальник отдела

Конькова Т.В. | **Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева**
д-р техн. наук, профессор

Аннотация. Замкнутый обитаемый объект в данной статье рассмотрен как предельное состояние техносферы, требующее контроля за поддержанием в нем требуемых параметров атмосферы с целью безопасности жизнедеятельности человека. Температура регенерации сорбента представлена в качестве ключевого параметра, влияющего на энергоэффективность системы концентрирования диоксида углерода. Достижение максимального ресурса сорбента без уменьшения значений его поглотительной способности в процессе эксплуатации предлагается авторами в качестве первостепенной задачи для обеспечения максимальной автономности обитаемого объекта техносферы.

Ключевые слова: адсорбция, концентрирование, диоксид углерода, регенерация.

Техносфера представляет собой часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (ресурсы, здания, дороги, механизмы, сооружения и др.), становящиеся частью ноосферы с целью удовлетворения социально-экономических потребностей. [1] Учитывая определение данного термина, замкнутые обитаемые объекты представляют собой предельное состояние и особую часть техносферы, в которой круговорот энергии и материи организуется и управляется человеком, являющегося по своей сути основным элементом данной сложной технологической системы. По уровню автономности изолированные объекты можно разделить на три категории: абсолютно изолированные (герметичные объекты, например, космические аппараты, глубоководные объекты), частично изолированные (объекты, требующие периодической доставки ресурсов и утилизации отходов, например, полярные станции) и временно изолированные (объекты, переходящие в режим изоляции при определенных условиях (например, убежища, больничные боксы). С учетом процесса жизнедеятельности живого организма и протекающих в нем сложных биохимических процессов с выделением продуктов метаболизма, в том числе диоксида углерода, наличие систем жизнеобеспечения является обязательной частью замкнутых (изолированных) обитаемых объектов. Применяемые системы жизнеобеспечения обеспечивают поддержание необходимых значений парциального давления кислорода и диоксида углерода, а также обеспечение очистку атмосферы от микропримесей.

Метаболический диоксид углерода является одним из веществ в атмосфере объекта, концентрация которого подлежит обязательному контролю со стороны человека с целью поддержания его предельно допустимой концентрации в требуемом диапазоне. На одного человека приходится выделение около 1 кг углекислого газа в сутки в режиме покоя, в режиме активной деятельности данное значение значительно увеличивается. [2, 4]

Ранее подробно рассматривалось влияние CO_2 на самочувствие различных космических экспедиций и оценено влияние значения парциального давления углекислого газа на космонавта при жизнедеятельности в условиях замкнутого пространства. [3] Нормативные документы устанавливают допускаемые значения по диоксиду углерода не только для пилотируемых космических аппаратов [2], но и для подводного флота. В настоящее время значение парциального давления в атмосфере Международной космической станции поддерживается на уровне 3,0 мм рт. ст. (0,4 %). На борту подводных объектов, в частности атомных подводных лодок, условия обитания для экипажа более жесткие: поддерживаемый уровень парциального давления углекислого газа составляет около 6,0 мм рт. ст. (0,8 %). [4] Таким образом, вне зависимости от назначения обитаемого замкнутого объекта и его местоположения требуется строгий контроль значений парциального давления CO_2 с целью сохранения жизни и здоровья экипажа.

Очистка атмосферы замкнутого объекта от углекислого газа может производиться различными методами, одним из которых является поглощение углекислого газа адсорбентами с последующим его концентрированием. Данный способ позволяет сохранять атмосферу в замкнутом объекте и обеспечить его дальнейшую переработку. Благодаря простоте конструктивного оформления процесса адсорбция является наиболее распространенным методом очистки атмосферы в невесомости.

На практике в замкнутых обитаемых комплексах применяются различные виды поглотителей углекислого газа: цеолиты, аминовые сорбенты, неорганические поглотители на основе щелочных металлов, и т.п. В зависимости от назначения изолированного объекта применяются как нерегенерируемые, так и регенерируемые поглотители. Применение регенерируемых поглотителей предъявляет определенные требования к оформлению технологического процесса адсорбции: например, равномерность прогрева, отсутствие загрязнений воздуха, возможность десорбции углекислого газа с максимальной концентрацией и т.п. Существует несколько методов десорбции углекислого газа из регенерируемых сорбентов: регенерация сорбента с нагревом, термовакуумная десорбция, регенерация водяным паром.

Основным преимуществом получения концентрированного углекислого газа является его применение в качестве исходного сырья для последующей переработки (например, в реакторах Боша или Сабатье), что является ценным преимуществом для замкнутых обитаемых объектов. Так как переработка диоксида углерода является преимущественно каталитическим процессом, то к концентрату предъявляются повышенные требования по чистоте во избежание преждевременного отравления применяемых катализаторов. Также этап концентрирования является одним из самых энергозатратных при подготовке и переработке углекислого газа, часто при разработке систем предъявляются требования по их энергопотреблению. Анализ показал, что одним из энергоэффективных методов концентрирования с помощью регенерируемых поглотителей является адсорбция поглотителем на основе гидратированного диоксида циркония, регенерируемого водяным паром (значение энергопотребления составляет порядка 10 Вт·ч/л CO_2). [5]

Для техносферного объекта с длительным пребыванием человека важным критерием является стойкость адсорбента системы концентрирования углекислого газа к внешним воздействующим факторам, определяющая как ресурс поглотителя, так и автономность объекта. Перед оценочным анализом ресурса регенерируемых сорбентов целесообразно обозначить ключевой параметр для обеспечения энергоэффективности процесса, не менее важного для обеспечения автономности объекта техносферы – значение температуры десорбции адсорбента. Во-первых, относительно низкая температура регенерации (до 110°С) позволяет минимизировать расходы энергии на распределение и передачу тепла. Во-вторых, снижение термодеструкции адсорбента в процессе десорбции обеспечивает максимально длительный жизненный цикл изделия. В-третьих, низкая температура позволяет значительно упростить конструкцию системы, а также минимизировать массу и габариты аппаратов и, соответственно, тепловую инерцию.

На основании вышеизложенного был проведен экспертный анализ и сравнение ресурса наиболее часто упоминаемых аминосодержащих сорбентов и композитных металлорганических каркасов с ресурсом сорбента на основе гидратированного диок-

сида циркония (таблица 1). Сравнивая наработку сорбентов, установлено, что регенерируемый сорбент на основе гидратированного диоксида циркония не уступает по ресурсу упомянутым выше видам сорбентов.

Таблица 1 – Оценочный ресурс сорбентов с низкотемпературной регенерацией (до 110 °С)

№ п/п	Адсорбент	Тип сорбции	Ресурс, циклы
1	Аминомодифицированные сорбенты (PEI/TEPA)	Хемосорбция	100–1000 [6]
2	Композитный сорбент, металлорганический каркас (ZIF-8)	Физическая	~ 40 [7]
3	Сорбент на основе гидратированного диоксида циркония	Хемосорбция	более 1000

В 2025 году в АО «НИИхиммаш» испытаны опытные партии новых модификаций регенерируемого сорбента на основе гидратированного диоксида циркония с целью оценки влияния наработки поглотителя на емкостную характеристику. Испытания партий данного сорбента показали ресурс более 1000 циклов, обеспечивая требуемую поглотительную способность выше 10,0 л CO_2/л поглотителя. Полученные данные позволяют ставить данный адсорбент в один ряд с такими перспективными материалами, как металлорганические каркасы и твердые амины, для разработки систем концентрирования диоксида углерода в изолированных пространствах.

Сложность систем концентрирования и переработки одновременно предъявляет особые требования к автоматизации процессов и интеграции систем в обитаемые комплексы (например, требования в Российской Орбитальной Станции) в целях исключения влияния человеческого фактора на работоспособность системы.

Замкнутые обитаемые отсеки постепенно становятся неотъемлемыми частями техносферы, в которых решение задачи поддержания определенного состава атмосферы становится одним из перспективных направлений для потенциального научно-инженерного и технического развития, а системы очистки газовой среды от углекислого газа – обязательной составляющей комплекса. С учетом требований, предъявляемых к системам, применяемые в замкнутых техносферных объектах методы очистки атмосферы должны обеспечивать получение концентрированного углекислого газа, а составные части систем обладать максимальным ресурсом и минимальным энергопотреблением. Таким образом, поиск возможных вариантов переработки концентрированного углекислого газа в замкнутом объекте является перспективным и востребованным направлением для научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 52104-2003. Ресурсосбережение. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 50804-95 Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования.
3. Поддержание допустимой концентрации углекислого газа в атмосфере обитаемых гермомодулей космических станций / А.С. Гузенберг, А.В. Юргин, С.Ю. Романов [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. – 2021. – № 2(39). – С. 35–59.
4. Аврущенко А.Е., Гаранин О.П., Знаменщиков А.Р. Системы электрохимической регенерации воздуха отечественных АПР I–III поколений. В двух частях. Часть 1. – Санкт-Петербург, 2024.
5. Рукавицин С.Н., Бутылкин Ю.П., Конькова Т.В. Энергоэффективность регенерируемых сорбционных концентраторов диоксида углерода в замкнутых обитаемых объектах // Материалы XVI Международной научной конференции «ТТС-25». В 2-х т. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2025. – Т. 1. – С. 68–72.
6. Elif Erdal Ünveren, Bahar Ozmen Monkul, Serife Sarıoglan, Nesrin Karademir, Erdogan Alper: Solid amine sorbents for CO2 capture by chemical adsorption // A review, Petroleum. – 2017. – № 3. – С. 37–50.
7. Fatemeh Bahmanzadegan, Ahad Ghaemi, Reza Norouzbeigi. Ecofriendly novel hydrophobic core-shell zeolite@MOF nanoadsorbent for CO2 capture // Journal of CO2 Utilization. – 2025. – № 100.

УДК 691.175.2

РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ ПЕНОПЛАСТА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Смирнов Евгений Александрович
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)
аспирант, ассистент кафедры химии и химических технологий
sea2001_18@mail.ru

Михайлова Анна Алексеевна
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)
студентка 3 курса
anna.mihaylova.01.10.@list.ru

Аннотация. Показана возможность производства полимерных композитов путем рециклинга и введения отходов полистирола вспененного (ПСВ) в ПВХ-матрицу с наполнением композита песком горячим прессованием Установлено, что параметры находятся в сложной взаимосвязи с составом и свойствами материалов. Установлено, что холодным прессованием композиты на основе ПВХ и пенопласта получить невозможно. Для отображения и поиска оптимальных свойств полученных образцов, а также анализа влияния различных факторов на конечный результат и сокращения числа реальных экспериментов использовался план Бокса-Бенкина. По результатам исследований получен композит со следующими максимальными значениями – плотность больше 2000 кг/м^3, прочность при сжатии – почти 68 МПа, водопоглощение – меньше 0,5 %, ударная прочность – больше 7 кДж/м^2. Разработанный продукт возможно внедрить в авиа – и автомобильную промышленность, дорожное строительство, промышленность строительных материалов.

Ключевые слова: композиты, полимербетоны, отходы пенопластов, поливинилхлорид, холодное и горячее прессование, план Бокса-Бенкина

Кафедра «Химия и химические технологии» ВлГУ и другие российские университеты достаточно продолжительное время проводят исследования по получению ПВХ-композитов по прессовой технологии [1–5].

В начале исследовалась возможность получения композитов с помощью холодного прессования без включения в состав отходов пенопласта. В таблице 1 отображены различные вариации составы образцов, полученных холодным прессованием.

Таблица 1 – Состав композиций, полученных методом холодного прессования

№ образца	Состав композиции, мас.ч.		
	ПВХ	КП	Наполнитель
1	100	40	400
2	100	50	400
3	100	45	400
4	100	55	400
5	100	40	200
6	100	50	200
7	100	45	200
8	100	55	200
9	100	40	100
10	100	45	100
11	100	50	100
12	100	55	100
13	100	40	-
14	100	45	-
15	100	50	-
16	100	55	-

Опыты, проведенные выше, доказали, что первичный ПВХ тяжело переходит в вязкотекучее состояние и не поддаётся холодному прессованию, поэтому в дальнейшем было принято решение о получении образцов горячим прессованием и благодаря чему разработали 5 образцов с разным составом и свойствами (рисунок 1, таблицы 2 и 3).



Рисунок 1 – Внешний вид образцов

Таблица 2 – Состав образцов, разработанных горячим прессованием

№ образца	Состав композиции, мас.ч.			
	ПВХ	ПСВ	КП	Наполнитель
1	100	–	55	–
2	100	–	50	200
3	100	20	50	–
4	100	20	50	200
5	100	20	50	400

Таблица 3 – Результаты испытаний

№ образца	Плотность, кг/м^3	Водопоглощение, %	Ударная прочность, кДж/м^2	Прочность на сжатие, МПа
1	1470	0,19	5,8	72,2
2	1650	0,3	3,3	29,7
3	1200	0,22	7,9	32,6
4	1620	0,22	5,5	46,7
5	2410	0,62	5,5	37,1

Полученные горячим прессованием образцы не рассыпались и удовлетворяют требованиям по вышеприведенным видам испытаний.

Далее для хорошей сходимости и сопоставимости результатов, а также малой рассеяности погрешности применён метод математического планирования эксперимента по плану Бокса-Бенкина размерности К = 3 [6].

С помощью данного метода по стандарту реализуются 17 опытов на трех уровнях варьирования (для построения поверхности отклика при меньшем числе опытов, минимизации ресурсов и времени). Зафиксированными параметры являлись температура, время изготовления образцов и давление прессования.

Ниже приведена расчётная матрица по плану Бокса-Бенкина (таблица 4).

Таблица 4 – Расчётная матрица плана Бокса-Бенкина

№	Кодированные переменные			Натуральные переменные		
	X1	X2	X3	ПВХ С70	ПСВ	Наполнитель
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	0	100	40	500
2	1	–1	0	100	20	500
3	–1	1	0	60	40	500
4	–1	–1	0	60	20	500

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7
5	1	0	1	100	30	600
6	1	0	–1	100	30	400
7	–1	0	1	60	30	600
8	–1	0	–1	60	30	400
9	0	1	1	80	40	600
10	0	1	–1	80	40	400
11	0	–1	1	80	20	600
12	0	–1	–1	80	20	400
13	0	0	0	80	30	500
14	0	0	0	80	30	500
15	0	0	0	80	30	500
16	0	0	0	80	30	500
17	0	0	0	80	30	500

Ниже на рисунках 2 и 3 отображены полученные экспериментальные образцы.



Рисунок 2 – Внешний вид образцов (цилиндры), разработанных по плану Бокса-Бенкина



Рисунок 3 – Внешний вид образцов (балочки), разработанных по плану Бокса-Бенкина

Заключение

В результате проведенного исследования обоснована технологическая целесообразность рециклинга отходов пенопласта при производстве полимерных композитов на основе поливинилхлорида

Экспериментально доказано, что введение измельченных отходов пенопласта в ПВХ-матрицу позволяет получить композиционные материалы с регулируемыми физико-механическими свойствами. Установлено, что оптимальное содержание вторичного пенопласта в обеспечивает сохранение и улучшение прочностных характеристик при одновременном снижении плотности и себестоимости конечного изделия.

Внедрение отходов пенопласта решает сразу две важные задачи: утилизацию трудноразлагаемых отходов и расширение сырьевой базы для производства строительных и отделочных материалов для снижения экологической нагрузки на окружающую среду и соответствует принципам экономики замкнутого цикла.

Список литературы:

1. Шаравара А.М., Христофорова И.А. ПВХ-композиции и их применение // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2019. – Вып. 2(80) – С. 84–86.

2. Христофорова И.А. Полимербетоны на основе термопластов // Строительные материалы. − 2005. − № 4. − С. 56–57.

3. Горячева В.А. Полимербетоны на основе поливинилхлорида, модифицированного силановыми добавками / В.А. Горячева, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Строительство и реконструкция. – Орёл. – № 5 (73). – 2017. – С. 102–107.

4. Мухин Ю.Ф. Разработка полимерных композиций пониженной горючести на основе пластифицированного поливинилхлорида и полистирола дис. … канд. техн. наук: 05.26.03: утв. 01.07.99. – М., 1999. – 137 с

5. Разработка модифицированных композиций на основе вторичного полистирола / И.Е. Мжачих, Д.Р. Орозбекова, П.Н. Шель [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2018. – Т. 32. – № 6 (202). – С. 89–91.

6. Берикашвили Б.Ш., Оськин С.П. Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы. – М. : Юрайт, 2018. – 263 с.

УДК 66.081.6-278

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОВОЛОКОННЫХ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ЗАДАЧИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Смородин Кирилл Александрович
Новомосковский институт Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева
младший научный сотрудник
smorodin.k.a@muctr.ru

Савельева Дарья Олеговна
Новомосковский институт Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева
младший научный сотрудник
saveleva.d.ol@muctr.ru

Казарина Ольга Викторовна
Новомосковский институт Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева
заведующий лабораторией ионных материалов, кандидат химических наук
kazarina.o.v@muctr.ru

Аннотация. В работе были исследованы газотранспортные характеристики коммерчески доступных половолоконных мембран на основе полисульфона (ПСФ) и полиэфиримида (ПЭИ) для индивидуальных газов H_2 и CO_2. Для мембраны из ПСФ проницаемость H_2 и CO_2 составила 127.2 и 56.0 GPU, для мембраны на основе ПЭИ – 77.5 и 13.1 GPU соответственно. Идеальная селективность H_2/CO_2 составила 2.3 для мембраны из ПСФ и 5.9 для мембраны на основе ПЭИ.

Ключевые слова: мембранное газоразделение, половолоконная мембрана, полисульфон, полиэфиримид, водород, диоксид углерода, проницаемость.

Введение

Водород широко используется в химической и нефтехимической промышленности и рассматривается как перспективный энергоноситель. Значительная часть промышленного водорода производится в процессах конверсии углеводородного сырья, при которых формируются газовые потоки, содержащие CO_2, H_2 и другие примесные компоненты [1]. Поэтому выделение и очистка водорода остаются актуальными задачами химической технологии.

Сегодня для разделения и очистки газовых потоков применяются абсорбционные, адсорбционные, криогенные и мембранные методы. Интерес к мембранному газоразделению обусловлен отсутствием в данном методе фазовых переходов, компактностью оборудования, модульностью и возможностью подбора материала для конкретной задачи разделения [2, 3].

Сегодня существует несколько основных вариантов конструктивного оформления мембранных аппаратов: плоскорамные, рулонные и половолоконные. Наиболее широкое распространение получили половолоконные модули, характеризуемые высокой удельной площадью мембраны и возможностью размещения значительной поверхности газоразделения в сравнительно небольшом объеме аппарата. При этом эффективность работы мембранного модуля определяется не только его конструкцией, но и газотранспортными свойствами используемого мембранного материала. В качестве таких материалов широко применяются стеклообразные полимеры, к которым относятся, в частности, полисульфон и полиэфиримид [4].

Целью настоящей работы является исследование газотранспортных характеристик коммерчески доступных половолоконных мембран на основе ПСФ и ПЭИ для индивидуальных газов H_2 и CO_2.

Материалы и методы

В работе были исследованы газотранспортные характеристики коммерчески доступных половолоконных газоразделительных мембран на основе ПСФ и ПЭИ производства Hangzhou Kelin Aier Qiyuan Equipment Co., Ltd. (Китай). Использовали чистые газы H_2 (99,99 об. %), CO_2 (99,9995 об. %) и Ar (99,999 об. %). Аргон применяли в качестве внутреннего стандарта масс-спектрометра.

Для проведения экспериментов изготавливали лабораторные мембранные модули на основе трубки из нержавеющей стали AISI 316; полые волокна помещали внутрь корпуса, а торцы герметизировали эпоксидным компаундом на глубину около 5 мм.

Газотранспортные характеристики определяли на экспериментальном стенде с масс-спектрометрическим детектированием (рисунок 1). Полость высокого давления мембранного модуля соединяли с линией подачи исследуемого газа, полость низкого давления – с вакуумным постом и масс-спектрометром. Газораспределительную систему между экспериментами продували гелием. Запись масс-спектра проводили в программном обеспечении PV MassSpec.

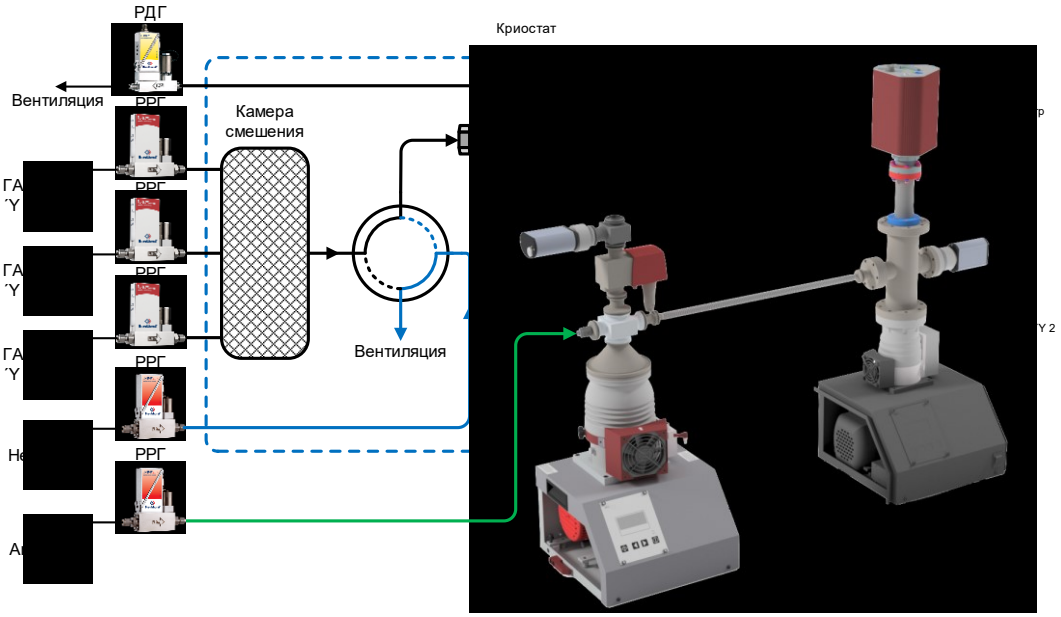


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для определения газотранспортных характеристик мембраны в сопряжении с масс-спектрометром

После достижения стабильного сигнала исследуемый газ подавали в полость высокого давления. Проникший через мембрану газ поступал в подмембранное пространство и далее на масс-спектрометр.

Проницаемость мембраны рассчитывается согласно формуле:

$$Q = \frac{J_i}{\Delta p \cdot A}, \quad (1)$$

где J_i – объемный поток компонента i в пермеате, см^3 мин$^{-1}$; Δp – разница парциальных давлений газа через мембрану, см. рт. ст.; A – площадь мембраны, см^2.

Программное обеспечение масс-спектрометра позволяет преобразовывать сигнал каждого определяемого компонента в величину его парциального давления. Объемный поток исследуемого газа определяли относительно известного потока аргона:

$$\frac{J_i}{J_{Ar}} = \frac{p_i}{p_{Ar}}, \quad (2)$$

где J_{Ar} – объемный расход аргона, см^3 мин$^{-1}$; p_i – парциальное давление компонента i в пермеате, см. рт. ст.; p_{Ar} – парциальное давление аргона в пермеате, см. рт. ст.

Селективность по паре газов H_2/CO_2 рассчитывали по формуле:

$$\alpha_{A/B} = \frac{P_A}{P_B}, \quad (3)$$

где Q_A – проницаемость компонента А, $Q_Б$ – проницаемость компонента В.

Результаты и обсуждение

В результате определения газотранспортных характеристик мембран для индивидуальных газов были получены значения проницаемости по H_2 и CO_2 и рассчитана идеальная селективность по паре H_2/CO_2. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Газотранспортные характеристики половолоконных мембран для индивидуальных газов H_2 и CO_2

Мембрана	$Q(H_2)$, GPU[a]	$Q(CO_2)$, GPU[a]	$\alpha(H_2/CO_2)$
ПСФ	127.2	56.0	2.3
ПЭИ	77.5	13.1	5.9

[a]1 GPU = 1 10^{-6} см^3 см$^{-2}$ с$^{-1}$ см.рт.ст.$^{-1}$

Из представленных результатов видно, что мембрана на основе ПСФ характеризуется более высокими значениями проницаемости по обоим исследуемым газам. Проницаемость по водороду составляет 127.2 GPU для ПСФ и 77.5 GPU для мембраны из ПЭИ. Для диоксида углерода значения составляют 56.0 и 13.1 GPU соответственно. Таким образом, при переходе от ПСФ к ПЭИ снижение проницаемости по CO_2 выражено значительно сильнее, чем по H_2. Различие в изменении проницаемости компонентов приводит к увеличению идеальной селективности по паре H_2/CO_2. Для мембраны на основе ПСФ ее значение составляет 2.3, тогда как для мембраны из ПЭИ – 5.9. Более высокая селективность мембраны из ПЭИ обусловлена существенно меньшей проницаемостью диоксида углерода при сохранении сравнительно высокого значения проницаемости по водороду.

Таким образом, исследуемые материалы характеризуются различным соотношением проницаемости и селективности: ПСФ обладает более высокой проницаемостью индивидуальных газов, тогда как ПЭИ характеризуется более высокой идеальной селективностью по паре H_2/CO_2. Полученные данные позволяют провести первичное сравнение исследуемых мембранных материалов для задач разделения водородсодержащих газовых сред.

Заключение

Для половолоконных мембран на основе ПСФ и ПЭИ были определены значения проницаемости индивидуальных H_2 и CO_2 и рассчитана идеальная селективность по паре H_2/CO_2. Мембрана на основе ПСФ характеризуется более высокой проницаемостью обоих газов, тогда как для мембраны на основе ПЭИ наблюдается более высокая идеальная селективность – 5.9 против 2.3. Более высокая селективность ПЭИ связана с существенно меньшей проницаемостью CO_2 при сохранении сравнительно высокой проницаемости H_2..

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта лаборатории "Лаборатория ионных материалов" (ЛИМ), проект № FSSM-2024-0006.

Список литературы:

1. Ganguli A., Bhatt V. Hydrogen production using advanced reactors by steam methane reforming: a review // Frontiers in Thermal Engineering. – 2023. – Т. 3. – P. 1143987. – DOI: 10.3389/fther.2023.1143987.

2. Membrane technologies for decarbonization / A.Yu. Alent'ev, A.V. Volkov, I.V. Vorotyntsev [et al.] // Membranes and Membrane Technologies. – 2021. – Т. 3. – № 5. – С. 255–273. – DOI: 10.1134/S2517751621050024.

3. 50th anniversary perspective: polymers and mixed matrix membranes for gas and vapor separation: a review and prospective opportunities / M. Galizia, W.S. Chi, Z.P. Smith [et al.] // Macromolecules. – 2017. – Т. 50. – № 20. – С. 7809–7843. – DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01718.

4. CO2-induced plasticization phenomena in glassy polymers / A. Bos, I.G.M. Pünt, M. Wessling [et al.] // Journal of Membrane Science. – 1999. – Т. 155. – № 1. – С. 67–78. – DOI: 10.1016/S0376-7388(98)00299-3.

УДК 691.322:666.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ЗОЛЫ УГЛЯ НА СВОЙСТВА ГИПСО-ЗОЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО

Субхонов Далержон Косимович

Институт химии им. В.И.Никитина НАН Таджикистана
г. Душанбе, Республика Таджикистан
научный сотрудник
sdqn@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние тонкости помола золы угля на свойства гипсо-зольного вяжущего. Установлено, что тонкомолотая зола с размером частиц менее 0,075 мм снижает водопотребность и влияет на прочность и водопоглощение гипсового камня. Оптимальным является содержание золы 5–20 %, при котором прочность повышается. При содержании золы до 30 % прочность сохраняется на уровне контрольного состава или превышает его. Коэффициент водостойкости составляет 0,88–0,98.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее, зола угля, тонкость помола, размер частиц, водопотребность, прочность, водопоглощение, водостойкость, гипсовый камень.

Введение

Одним из перспективных направлений совершенствования строительных материалов является использование техногенных минеральных отходов в качестве компонентов вяжущих композиций. Применение золы угля в составе гипсовых вяжущих позволяет одновременно снизить расход гипса и обеспечить рациональное использование отходов теплоэнергетической промышленности. Возможность применения золы в качестве наполнителя гипсовых композиций ранее была подтверждена исследованиями, в которых установлено, что введение золы в оптимальном количестве способствует снижению водопотребности, повышению прочности и улучшению водостойкости гипсового камня [1].

Свойства порошкообразных вяжущих во многом определяются дисперсностью их компонентов. Увеличение удельной поверхности твердых частиц изменяет условия взаимодействия материала с водой и влияет на формирование структуры затвердевшего камня [2]. Поэтому при использовании минеральных наполнителей важное значение имеет не только их химический и минералогический состав, но и гранулометрический состав.

Гипсовые вяжущие относятся к материалам, для которых водопотребность является одним из важнейших показателей, непосредственно связанных с формированием поровой структуры и прочностью затвердевшего камня. Требования к качеству гипсовых вяжущих и методы определения их основных свойств регламентируются соответствующими нормативными документами [3, 4].

Ранее при исследовании золы угля Фан-Ягнобского месторождения основная часть частиц золы после дополнительного помола имела размер менее 0,14 мм [1]. В настоящем исследовании поставлена задача установить влияние дальнейшего повышения дисперсности золы на свойства гипсо-зольного вяжущего.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований использовали полуводный гипс и золу угля. Золу подвергали дополнительному тонкому помолу с целью уменьшения размера ее частиц. Полученный материал характеризовался преимущественным содержанием частиц размером менее 0,075 мм.

Гранулометрический состав тонкомолотой золы представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав тонкомолотой золы угля

Зола угля тонкого помола	Размер отверстий на ситах, мм				
	≤ 0.075	0.14	0.315	0.63	≥ 0.63
Остаток, %	94.66	3.63	1.67	0.02	0.02

Из данных таблицы 1 следует, что 94,66 % золы имеет размер частиц не более 0,075 мм, а около 98 % частиц – менее 0,14 мм. Таким образом, исследованная зола характеризуется значительно более высокой дисперсностью по сравнению с золой, применявшейся в предыдущем исследовании [1].

Для получения гипсо-зольного вяжущего золу вводили взамен части полуводного гипса в следующих соотношениях: полуводный гипс : зола = 95:5, 90:10, 85:15, 80:20, 70:30, 60:40 и 50:50 мас. %. Определение основных физико-механических характеристик проводили в соответствии с методами испытаний гипсовых вяжущих [4].

На рисунке 1 приведена зависимость водопотребности гипсового вяжущего от содержание золы в его составе для получения гипсового теста нормальной консистенции. Как обычно, с увеличением содержание золы в составе гипсо-зольного вяжущего водопотребность вяжущего снижается и при содержаниях золы от 40–50 % она стабилизируется на уровне 54.3 %. В целом, при замены 50 % полуводного гипса на эквивалентное количество золы угля водопотребность гипсо-зольного вяжущего снижается на 5.7 %.

Снижение водопотребности гипсо-зольного вяжущего положительно влияет на его прочность: при содержаниях золы до 20 % в его составе прочность его камня возрастает, это возрастание составляет до 14.6 % по сравнению прочности полуводного гипса, затем при дальнейшем увеличение содержания золы в составе вяжущего его прочность снижается. Такая закономерность наблюдалась и в зависимостей рис.1, такое совпадение свидетельствует о том, что оптимальное содержание золы угля в составе гипсо-зольного вяжущего является в пределах 5–20 % массы вяжущего. Этому также подтверждают показатели водопоглощения гипсового камня, приведённые на рисунке 2.

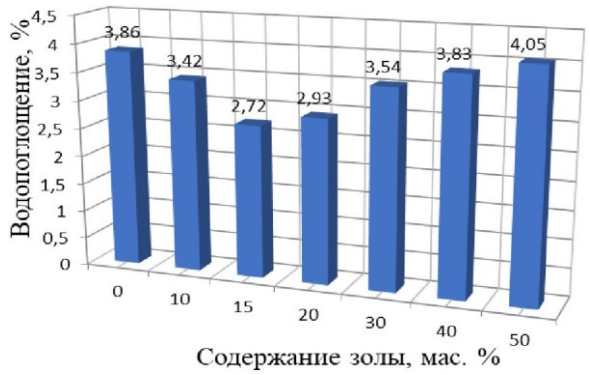


Рисунок 1 – Зависимость изменения водопотребности гипсо-зольного вяжущего от соотношения количеств полуводного гипса и золы угля в его состава

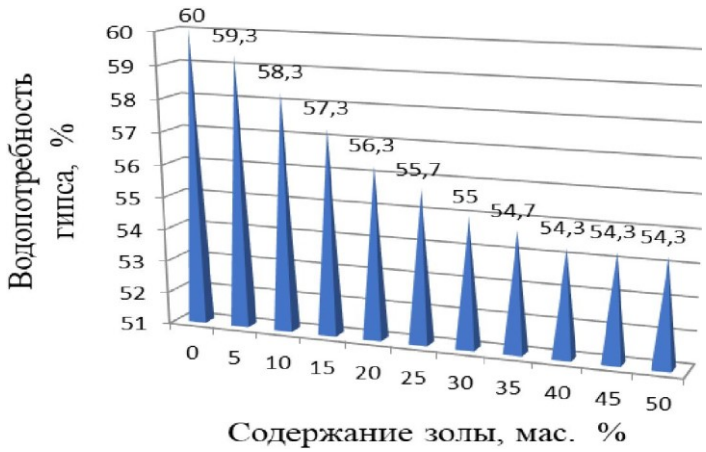


Рисунок 2 – Зависимость водопоглощения гипсового камня от соотношения количеств полуводного гипса и золы угля в составе гипсо-зольного вяжущего

На рисунке 3 приведена зависимость прочности гипсо-зольного вяжущего от содержание золы в его составе. До 30 % гипсового вяжущего можно заменить на золу угля без ущерба в показателе прочности вяжущего. При этом, прочность гипсо-зольного вяжущего даже до 8 % выше показателя прочности гипсового вяжущего.

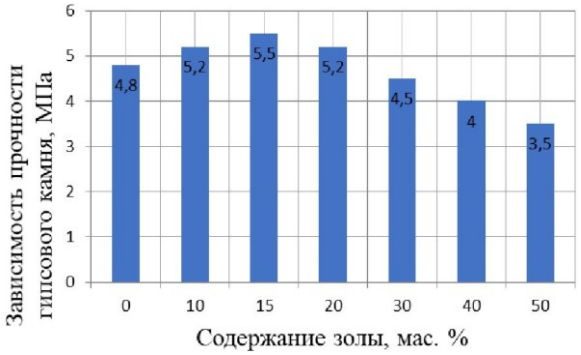


Рисунок 3 – Зависимость прочности гипсо-зольного вяжущего от содержание золы в его составе

При содержаниях золы угля в составе гипсового вяжущего до 30 % водопоглощение гипсового камня снижается, это снижение составляет до 29.5 %, затем с увеличением содержание золы в составе вяжущего водопоглощение гипсового камня возрастает,но это возрастание не превышает 4.7 % при содержание золы 50 % в составе гипсо-зольного вяжущего.

Изменения прочности гипсового камня в водонасыщенном состояние от содержание золы в составе вяжущего (рисунок 4) имеет такой же характер:для гипсового вяжущего с содержанием золы 5–30 % прочность камня в водонасышенном состояние выше или равно с прочностью камня из вяжущего без золы, затем с повышением содержание золы до 50 % прочность водонасыщенного гипсового камня снижается.

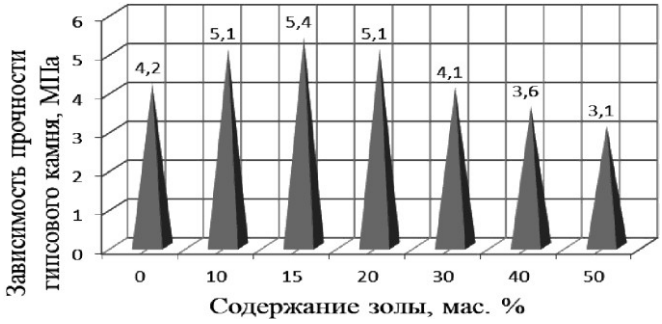


Рисунок 4 – Зависимость прочности гипсового камня в водонасышен-ном состояние от соотношения количеств полуводного гипса и золы угля в составе гипсо-зольного вяжущего

Независимо от изменяющегося характера зависимостей прочности и водопоглощения гипсо-зольного вяжущего от содержание золы в его составе, можно отметить, что водостойкость камня для всех составов гипсо-зольного вяжущего изменяется в прелелах 0.88–0.98 (рисунок 5) и соответствует стандартным требованиям. Следовательно, предлагаемое гипсо-зольное вяжущее с содержанием золы в количествах до 50 % своей массы вполне пригодно для приготовления водостойких строительных изделий и конструкций.

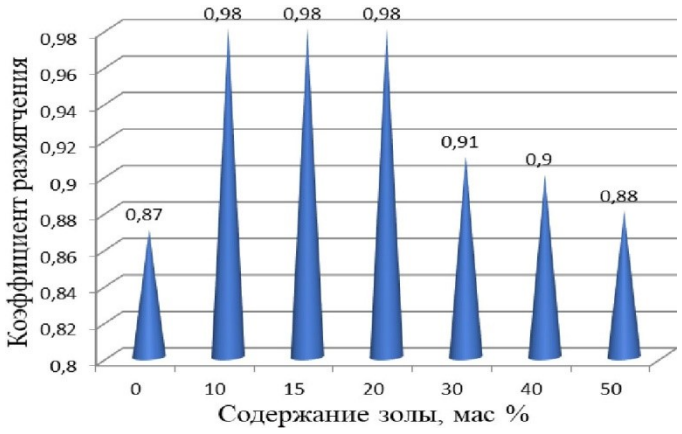


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента водостойкости гипсового камня от соотно-шения количеств полуводного гипса и золы угля в составе гипсо-зольного вяжущего

Заключение

Проведенные исследования показали, что тонкость помола золы угля оказывает существенное влияние на свойства гипсо-зольного вяжущего.

Установлено, что после дополнительного помола 94,66 % частиц золы имеют размер менее 0,075 мм, а около 98 % частиц – менее 0,14 мм. Повышение дисперсности золы способствует снижению водопотребности гипсо-зольного вяжущего: при замене 50 % полуводного гипса золой снижение водопотребности составляет 5,7 %.

Наиболее благоприятные показатели прочности наблюдаются при содержании золы до 20 %, при этом увеличение прочности достигает 14,6 % относительно контрольного гипсового вяжущего. При содержании золы до 30 % существенного снижения прочности не наблюдается.

Введение золы до 30 % способствует снижению водопоглощения гипсового камня, максимальное снижение составляет 29,5 %. При дальнейшем увеличении содержания золы водопоглощение возрастает, однако при 50 % золы увеличение не превышает 4,7 %.

Прочность гипсового камня в водонасыщенном состоянии при содержании золы 5–30 % остается выше либо на уровне контрольного состава. Коэффициент водостойкости всех исследованных составов находится в пределах 0,88–0,98.

Таким образом, результаты исследования подтверждают возможность эффективного применения тонкомолотой золы угля в составе гипсо-зольных вяжущих. С точки зрения комплекса исследованных свойств наиболее рациональным является содержание золы в пределах 5–30 % массы вяжущего, тогда как с учетом экономии гипса возможно увеличение ее содержания до 50 % без резкого ухудшения водостойкости материала.

Список литературы:

1. Использование золы угля Фан-Ягнобского месторождения в качестве наполнителя композиций из гипсовых вяжущих / А. Шарифов, Д.К. Субхонов, Г.Г. Шодиев [и др.] // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2016. – Т. 59. – № 9. –10. – С. 413–417.

2. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия: технология, свойства, применение. – М. : Стройиздат, 1974. – 328 с.

3. ГОСТ 125-2018. Вяжущие гипсовые. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

4. ГОСТ 23789-2018. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2018. – 18 с

5. Ферронская А.В. (ред.). Гипсовые материалы и изделия: производство и применение: справочник. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. – 485 с.

6. ГОСТ 25818-2017. Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2017. – 19 с

УДК 699.812.3

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОГНЕЗАЩИТНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТИПИРЕНОВ И ИХ СМЕСЕЙ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ ДРЕВЕСИНЫ

Шугаева Арина Романовна
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
лаборант кафедры техносферной безопасности
shugaeva.a.r@muctr.ru

Мельников Никита Олегович
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
канд. техн. наук, доцент кафедры техносферной безопасности
melnikov.n.o@ muctr.ru

Аннотация. В работе исследована огнезащитная эффективность диаммонийфосфата и карбамида как индивидуальных антипиренов, так и их смесей при различных поглощениях по ГОСТ 30028.3-2022. Получены зависимости потери массы образцов при горении от общего поглощения исследуемых антипиренов и их смесей в соотношении 1 : 1, 1 : 2, 2 : 1. Дополнительно методом дифференциально-термического анализа исследовано влияние антипиренов на термическое разложение древесины и определены кинетические параметры основной стадии процесса.

Ключевые слова: древесина, огнезащита, антипирен, диаммонийфосфат, карбамид, смесь антипиренов, огнезащитная эффективность, термический анализ.

Введение. Древесина широко применяется в строительстве благодаря доступности, относительно низкой плотности, технологичности обработки и высоким эксплуатационным характеристикам. Вместе с тем высокая горючесть древесины существенно ограничивает область её применения и определяет необходимость использования эффективных способов снижения пожарной опасности. Одним из наиболее распространённых способов химической защиты является пропитка древесины растворами антипиренов [1, 2].

Наибольше распространение на практике получили азот-фосфорсодержащие соединения, которые изменяют процесс термического разложения древесины. При нагревании они разлагаются с образованием аммиака и фосфорной кислоты, которая катализирует выход углистого остатка и укрепляет его [3]. При этом применение индивидуальных антипиренов не всегда обеспечивает требуемую эффективность при экономически обоснованном расходе. Перспективным направлением является создание многокомпонентных составов, в которых отдельные вещества способны взаимно усиливать действие друг друга.

Целью настоящей работы являлось исследование огнезащитной эффективности диаммонийфосфата (ДАФ), карбамида и их смесей при различных общих поглощениях.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования были выбраны следующие антипирены:

– диаммонийфосфат $(NH_4)_2HPO_4$ по ГОСТ 8515-75 [4];
– карбамид $H_2N\text{-}CO\text{-}NH_2$ по ГОСТ 2081-2010 [5].

В экспериментальной серии исследовали также смеси диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 1 : 1, 1 : 2, 2 : 1, далее – ДК-11, ДК-12, ДК-21.

Образцы подвергали глубокой пропитке водными растворами исследуемых веществ методом «вакуум – атмосферное давление» в соответствии с ГОСТ 30028.3-2022 [6]. Вследствие глубокой пропитки, образцы заболони сосны полностью пропитываются раствором. По окончании сушки, защитные средства равномерно распределяются внутри древесины.

Огнезащитную эффективность оценивали по потере массы древесины после огневого воздействия. Для каждого варианта обработки определяли среднее значение потери массы по серии образцов. Результаты экспериментов представлены на рисунке 1.

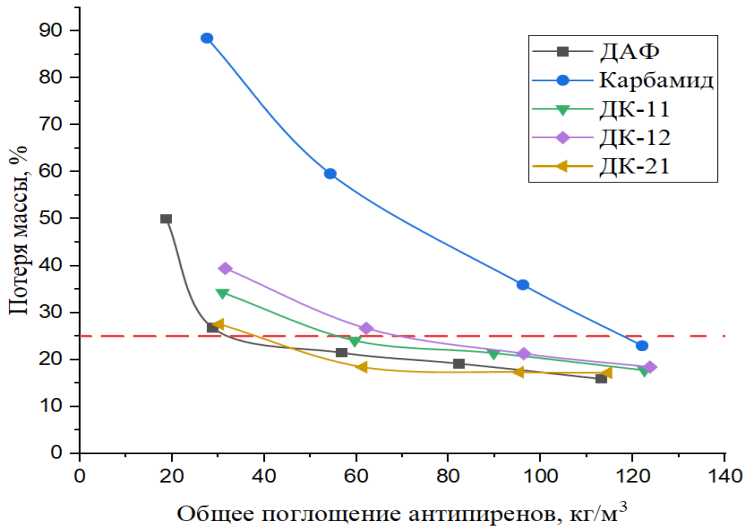


Рисунок 1 – График зависимости потери массы образца (%) от общего поглощения (кг/м^3) антипиренов

Для диаммонийфосфата потеря массы 25 % достигается при поглощениях 29 кг/м^3, что в соответствии с требованиями [6] обеспечивает I класс огнезащитной эффективности, для карбамида при 118 кг/м^3 III класс, а для смесей ДК-11, ДК-12, ДК-21 класс огнезащитной эффективности III, III и II, соответственно при 69, 56 и 37 кг/м^3.

Для исследования влияния антипиренов на термическое разложение использовали дифференциально-термический анализ. Испытания проводили в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 °С/мин. По полученным ТГ- и ДТГ-кривым определяли температуру максимальной скорости потери массы, величину потери массы на основной стадии разложения, выход несгораемого остатка и рассчитывали кинетические параметры процесса. Термический анализ и расчеты проводили по методике, описанной в [3, 7]. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты термического анализа и кинетические параметры разложения пропитанной древесины

Поглощение, кг/м^3	T_{max}, °С	A_{max}, %/мин	Δm, %	Остаток, %, при 500 °С	ΔT, °С	E_a, кДж/моль	k_0, 1/с
1	2	3	4	5	6	7	8
Непропитанная древесина							
0	315	3,2	54,4	17,6	180–360	95,7	$8{,}3\cdot10^{10}$
Диаммонийфосфат							
28,8	260	3,6	38,0	29,8	150–320	112,4	$6{,}4\cdot10^{13}$
56,8	240	4,1	36,8	32,4	140–280	122,4	$1{,}2\cdot10^{15}$
82,2	240	4,3	35,2	33,8	150–280	125,7	$2{,}1\cdot10^{15}$
113,1	240	4,5	33,4	34,6	150–280	136,5	$2{,}9\cdot10^{16}$
Карбамид							
27,5	300	3,5	49,8	23,3	230–370	103,5	$2{,}8\cdot10^{11}$
54,3	300	3,4	44,4	22,7	240–360	124,7	$2{,}7\cdot10^{14}$
96,1	300	3,1	41,6	20,7	250–350	138,3	$1{,}1\cdot10^{15}$
121,5	300	2,9	36,7	18,4	260–340	146,6	$5{,}9\cdot10^{15}$
ДК-11							
30,9	250	4,7	40,4	28,7	180–320	156,4	$1{,}9\cdot10^{18}$
59,6	250	4,5	34,2	28,3	185–290	186,4	$4{,}0\cdot10^{21}$
89,8	250	4,3	33,0	25,0	210–280	240,5	$1{,}3\cdot10^{27}$
122,5	250	4,2	31,2	24,8	220–290	252,4	$1{,}8\cdot10^{28}$
ДК-12							
31,5	260	4,4	38,8	32,5	190–320	148,3	$8{,}5\cdot10^{16}$
62,1	260	4,0	36,5	31,1	190–310	156,6	$3{,}6\cdot10^{17}$
96,3	260	3,7	35,0	30,3	200–310	160,0	$1{,}4\cdot10^{18}$
123,7	255	3,6	32,6	29,1	190–290	200,9	$1{,}5\cdot10^{22}$

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
ДК-21							
30,3	260	4,4	40,0	27,8	180–320	143,5	$4{,}6\cdot10^{16}$
61,4	260	4,3	35,9	28,5	180–300	163,7	$7{,}3\cdot10^{18}$
95,4	260	4,0	30,8	33,0	195–300	182,1	$7{,}4\cdot10^{20}$
114,6	260	3,9	25,6	35,5	220–280	232,9	$3{,}4\cdot10^{25}$

Для диаммонийфосфата и карбамида с увеличением поглощения потеря массы уменьшается, энергия активации увеличивается, температура максимума скорости потери массы не изменяется, максимальная скорость потери массы и несгораемый остаток для диаммонийфосфата увеличивается, а для карбамида – уменьшается. Для смесей диаммонийфосфата и карбамида видно, что с увеличением поглощения потеря массы уменьшается, энергия активации увеличивается, температура максимума скорости потери массы для всех смесей почти не изменяется. Несгораемый остаток при 500 °С для смеси в соотношении 1 : 1 и 1 : 2 уменьшается, а для соотношения 2 : 1 увеличивается.

Заключение. Проведено сравнительное исследование огнезащитной эффективности диаммонийфосфата, карбамида и их смесей при различных общих поглощениях. Установлено, что диаммонийфосфат обладает существенно большей индивидуальной огнезащитной эффективностью по сравнению с карбамидом: потеря массы 25 % достигается при поглощении около 29 кг/м³ для диаммонийфосфата и более 118 кг/м³ для карбамида. Наибольшую огнезащитную эффективность проявляет смесь диаммонийфосфата и карбамида в соотношении 2:1 при поглощениях от 40 кг/м^3 до 100 кг/м^3. Данные термического анализа также подтверждают этот факт наибольшим выходом несгораемого остатка и увеличением энергии активации процесса терморазложения древесины.

Список литературы:

1. Акинин Н.И. Вопросы снижения пожарной опасности древесины / Н.И. Акинин, Н.О. Мельников, С.А. Максименко // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 3(25). – С. 28–31.

2. Пожарная опасность новых видов лесоматериалов / С.А. Максименко, Ю.В. Кривцов, Н.А. Максименко [и др.] // Пожарная безопасность. – 2013. – № 2. – С. 74–77.

3. Мельников Н.О. Влияние антипиренов на термическое разложение древесины / Н.О. Мельников, Н.И. Акинин // Химическая промышленность сегодня. – 2022 – № 5. – С. 52–57. – DOI: 10.53884/27132854-2022-5-52.

4. ГОСТ 8515-75. Государственный стандарт союза ССР. Диаммонийфосфат. Технические условия. Издания официальное. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1977.

5. ГОСТ 2081-2010 Межгосударственный стандарт. Карбамид. Технические условия. Издание официальное

6. ГОСТ 30028.3-2022. Межгосударственный стандарт. Средства защитные для древесины Экспресс-метод определения огнезащитной эффективности Издание официальное. – М. : Российский институт стандартизации, 2010.

7. Исследование термического разложения огнезащищенной древесины / Ю.В. Кривцов, Н.И. Акинин, С.А. Максименко [и др.] // Пожарная безопасность. – 2010. – № 2. – С. 85–88.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 62-03

ОСОБЕННОСТИ РЕМОНТА ПРОБОИН СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гончаренко Владимир Иванович
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)
д-р техн. наук, профессор военного учебного центра
vladimirgonch@mail.ru

Лукашенко Игорь Евгеньевич
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)
преподаватель военного учебного центра
lukashenko1962-84@yandex.ru

Резниченко Вячеслав Иванович
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)
канд. техн. наук, доцент
kmit38@mail.ru

Аннотация. Композитные сотовые конструкции широко применяются в составе планера летательного аппарата, в том числе в панелях фюзеляжа, крыла, руля высоты, руля направления, элементах механизации крыла, предкрылках, закрылках, спойллерах, интерцепторах, створках шасси. В процессе эксплуатации возможны различные виды повреждений. Одной из задач воостановления исходных данных прочностных и аэродинамических характеристик является применение технологии ремонта путем постановки ремонтной детали (заплаты) с использованием препрегов, пленочных и пастообразных клеев с обеспечением необходимой температуры и давления для формования или приклеивания ремонтной детали. Оценка преимуществ и недостатков предлагаемых способов ремонта показывает, что все предлагаемые способы предназначены для ремонта повреждений в пределах 150 мм диаметром, однако для ремонта больщих площадных повреждений (более 150 мм) вышеуказанные способы не подходят, так как при различных нагрузках отремонтированная конструкция теряет устойчиврость в зоне отверстия. Предложенный авторами способ ремонта обеспечивает и прочность и устойчивость в зоне отверстия свыше 150 мм. Кстати, предложенный способ ремонта может использоваться для трехслойных конструкций с пенопластовым заполнителем.

Ключевые слова: ремонт, композиционные материалы, углепластик, сотовые конструкции, термокомпрессионная технология.

Ускорение научно-технического прогресса в авиации – это в первую очередь значительное расширение номенклатуры применяемых материалов и технологий. Большой эффективностью за счет снижения массы летательного аппарата (ЛА) и упрощения технологии его производства обладают современные высокопрочные полимерные композиционные материалы (ПКМ), угле-, стекло-, базальто- и органопластики, а также сотовые конструкции на их основе [1].

Композитные сотовые конструкции широко применяются в составе планера ЛА, в том числе в панелях фюзеляжа, крыла, рулях направления, предкрылках, закрылках, спойлерах, интерцепторах и др.

Целью исследования данной работы является создание технологии ремонта композитных конструкций из состава вышеперечисленных, в том числе трехслойных конструкций, к которым могут быть отнесены элементы механизации, рули высоты, рули направления и другие элементы ЛА. Основное условие при проведении ремонта в авиации – восстановление исходных данных прочностных и аэродинамических характеристик ЛА.

В полной мере это может быть достигнуто применением технологии постановки ремонтной детали (заплаты) с использованием препрегов, пленочных и пастообразных клеев с обеспечением необходимой температуры и давления для формования или приклеивания ремонтной детали.

Рассматриваемые технологии изготовления ремонтной детали позволят изготовить деталь из тех же материалов с обеспечением заданной схемы армирования, что и применяемые на ремонтируемом агрегате. В некоторых случаях, используя описанные технологические процессы ремонта и изготовив соответствующее оснащение, можно осуществлять ремонт конструкции, не снимая ее с ЛА (в цехах сборки, на аэродроме и т.п.), что позволит снизить затраты и сократить цикл выполнения ремонта [2–5].

Учитывая, что первоначальной, простейшей технологией отверждения композиционных материалов было «вакуумное формование», а именно помещение собранного пакета слоёв в вакуумный мешок и его полимеризация при нагреве до высоких (свыше 120 °С) температур, целесообразно рассмотреть возможность применения препрегов в данной технологии для ремонта каких-либо агрегатов планера в «полевых» условиях: в ремонтном ангаре аэропорта или аэродрома.

Обоснованием актуальности темы данного исследования может служить потенциальное сокращение временных и материальных затрат на ремонт агрегата, связанных с его ремонтом методом термокомпрессионного формования и совмещения его с вакуумным формованием из сухих тканей и двухкомпонентных связующих по сравнению с отправкой агрегата на завод-изготовитель для ремонта автоклавным способом из препрегов.

Научная проблема данного исследования заключается в том, что на сегодняшний день ремонт композиционных агрегатов ЛА производится либо методом вакуумного формования при помощи сухих тканей и двухкомпонентных связующих (типа ЭДТ-69Н) с низкими температурами отверждения и низкими физико-механическими свойствами, либо методом автоклавирования при помощи препрегов с высокими затратами, кроме того предлагаемые способы ремонта предназначены для ремонта повреждений не более 150 мм. Возможно ли ремонтировать агрегаты, диаметры повреждений которых больше 150 мм, избегая характерных недостатков изложенных выше методов ремонта?

В данном исследовании авторы попытаются на примере одного из агрегатов планера показать, что распространенные в эксплуатации повреждения можно устранить специальными методами ремонта, уменьшить время и затраты, по сравнению с традиционными способами ремонта.

Задачи:

– описать и систематизировать общепринятые категории повреждений, традиционные технологии ремонта композиционных агрегатов;

– сделать вывод о применимости предлагаемой технологии ремонта.

Увеличение объема применения современных высокопрочных ПКМ требует разработки новых и совершенствования существующих технологий ремонта. В процессе эксплуатации выявляются скрытые дефекты, которые не были обнаружены при производстве конструкций. Поэтому основное условие при проведении ремонта в авиации – восстановление исходных данных прочностных и аэродинамических характеристик ЛА. В полной мере это может быть достигнуто применением технологии постановки ремонтной детали (заплаты) с использованием тканей со связующим, пленочных и пастообразных клеев с обеспечением необходимой температуры и давления для формования или приклеивания ремонтной детали. Традиционные технологии изготовления ремонтной детали позволяют ее делать из аналогичных

материалов с обеспечением заданной схемы армирования, что и применяемые на ремонтируемом агрегате. Этот выбор, т.е. доступность ремонта, определяется такими факторами, как легкость съема поврежденной конструкции, время вынужденного простоя самолета, наличие запасных частей, возможность доступа к повреждению с двух сторон или только с одной стороны.

В практике материал, из которого производится изготовление компенсирующей накладки, приклеивается к изделию, при этом соединение имеет недостаточно высокие прочностные показатели при сдвиге в тех случаях, когда оно применяется в качестве клея при соединении двух отвержденных обшивок или при соединении отвержденной обшивки и препрега. Для увеличения сдвиговой прочности, обеспечения равномерности передачи нагрузки предпочтительным является косое соединение ремонтируемой обшивки с компенсирующей заплатой (рисунок 1).

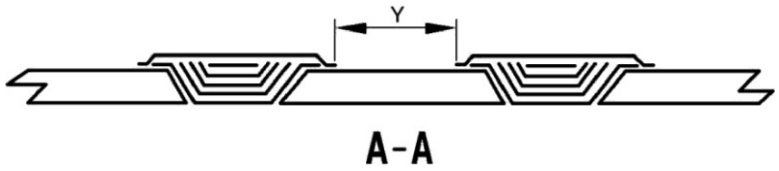


Рисунок 1 – Косое соединение ремонтируемой обшивки с накладкой

Технические условия на ремонт силовых элементов планера требуют сохранения не менее 90 % их исходной прочности.

Удар посторонним предметом представляет собой предмет особого беспокойства для большинства конструкций из ПКМ, требующий внимания при оценке возможности повреждения от потенциальных ударов, включая неровности и обломки взлетно-посадочной полосы (ВПП), град, падение инструмента и столкновения с птицами и транспортными средствами.

Группа небольших зон повреждений, которые расположенны в непосредственной близости друг от друга могут быть определены, как одна область повреждения.

Размер зоны смежных повреждений (двух и более) определяется наибольшей величиной повреждения, допускаемой в данной зоне агрегата разработчиком ЛА (рисунок 2).

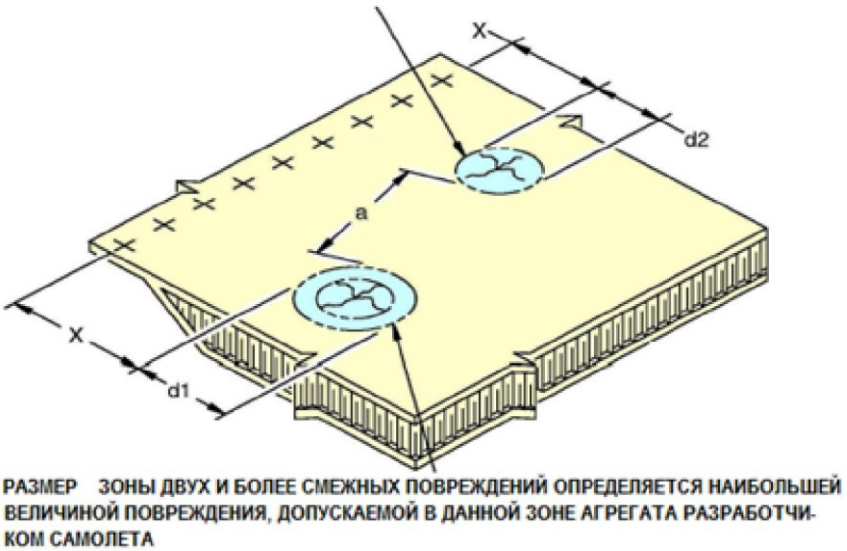


Рисунок 2 – Размеры и расстояния между зонами повреждений на панелях:
X – минимально допустимое расстояние от кромки или ближнего ряда крепежей до границы начала повреждений; d1 – наибольший диаметр двух смежных зон повреждений. Величина d1 должна быть меньше либо равна максимальному значению D; d2 – наименьший диаметр двух зон повреждений, расположенных рядом друг с другом; D – максимально допустимый диаметр для каждой видимой зоны повреждения или расслоения; a – расстояние между зонами повреждения

При ремонте плоских трехслойных панелей, имеющих поверхностные дефекты, используют следующий технологический процесс: фрезерованием удаляют поврежденные несущий слой и сотовый заполнитель, затем в обработанное пространство устанавливают вкладыши, вставки, заплаты, перемежая их пленочным клеем. Вставку сотового заполнителя в ремонтируемую панель приклеивают пленочным вспенивающимся клеем. Выкладку заплаты выполняют из заготовок-полуфабрикатов, состоящих из двух слоев углеродной ленты, вырезанных по шаблону с пленочным клеем ВК-36. Толщину заплаты обеспечивают необходимым количеством слоев углеродной ленты, а их механические характеристики ее ориентацией. Причем для создания оптимального содержания заполнителя на два слоя углеродной ленты приходится укладывать один слой пленочного клея ВК-36. Давление, необходимое для склеивания и формования углепластика КМУ-6-36, создается местным вакуумированием.

Последовательность проведения ремонта плоской трехслойной панели показана на рисунке 3.

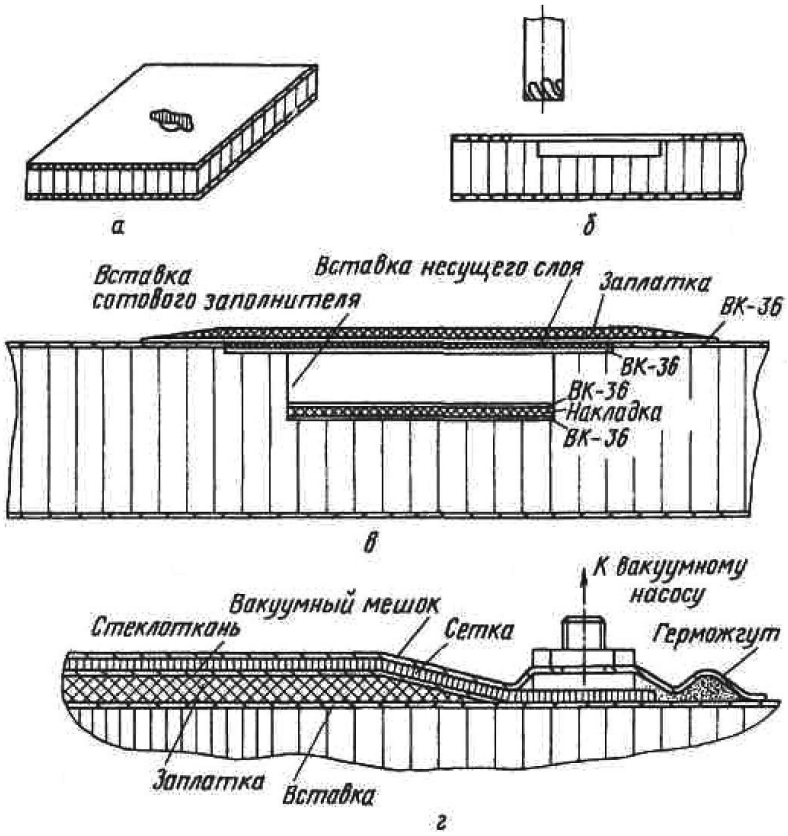


Рисунок 3 – Последовательность проведения ремонта плоской трехслойной панели: а) поврежденная панель; б) удаление поврежденных слоев; в) порядок сборки; г) контурная герметизация

Нагрев до температуры формования проводят специальными нагревателями, вмонтированными в прижимы. Режим формования и склеивания следующий: температура +165 ± 5 °С; давление, – 0,5 МПа; время выдержки – 1 ч; охлаждение под вакуумом – до +40 °С.

В «полевых» условиях возможно применение термоодеял, внутри которых находится не только нагреватель, но и силиконовый вкладыш, который позволяет создать давление до 0,5 МПа.

Марки материалов для выполнения ремонтных работ определяются разработчиком воздушного судна (ВС) либо согласуются с ним в установленном порядке.

При изготовлении агрегатов современных ЛА используются современные композиционные материалы, такие как КМКУ-2м, КМКУ-3м, КМКС-2м, КМУ-11тр в отечественной авиационной промышленности и Hexcel M21E, Hexcel 8552, Cycom 970-2 в зарубежных образцах.

Для ремонта некоторых композиционных агрегатов можно применить новый препрег АСМ102 производителя «Препрег-СКМ». Его отличительной особенностью являются высокие механические свойства при отверждении автоклавным и безавтоклавным способом, а также температура стеклования, превосходящая температуру отверждения. В таблице 1 и таблице 2 приведены свойста пластиков, отвержденных автоклавным способом для целей изготовления и безавтоклавным способом для целей ремонта агрегатов для сравнения с рассмотренными ранее типами ПКМ.

Таблица 1 – Свойства углепластиков АСМ-102

Марка материала	γ	$\sigma_в^0$	$\sigma_в^0$	$E_в^0$	$G_{0,90}$	$\tau_{0,90}$	δ^1
	г/см^3	кгс/мм^2	кгс/мм^2	кгс/мм^2	кгс/мм^2	кгс/мм^2	мм
АСМ-102, автоклав	1,5	210	110	14000	550	9	0,12
АСМ-102, ремонт	1,5	180	95	12200	480	8	0,12

Таблица 2 – Составы ПКМ на основе АСМ-102

Марка материала	Тип и марка наполнителя	Марка связующего	Режим полимеризации	Интервал рабочих температур
АСМ-102, автоклав	Углелента 130 г/м^2	АСМ-102	130 ± 5°С (3 часа)	–60...+150°С
АСМ-102, ремонт	Углелента 130 г/м^2	АСМ-102	130 ± 5°С (3 часа)	–60...+150°С

Классификация дефектов и повреждений в конструкциях из КМ показана на рисунке 4.

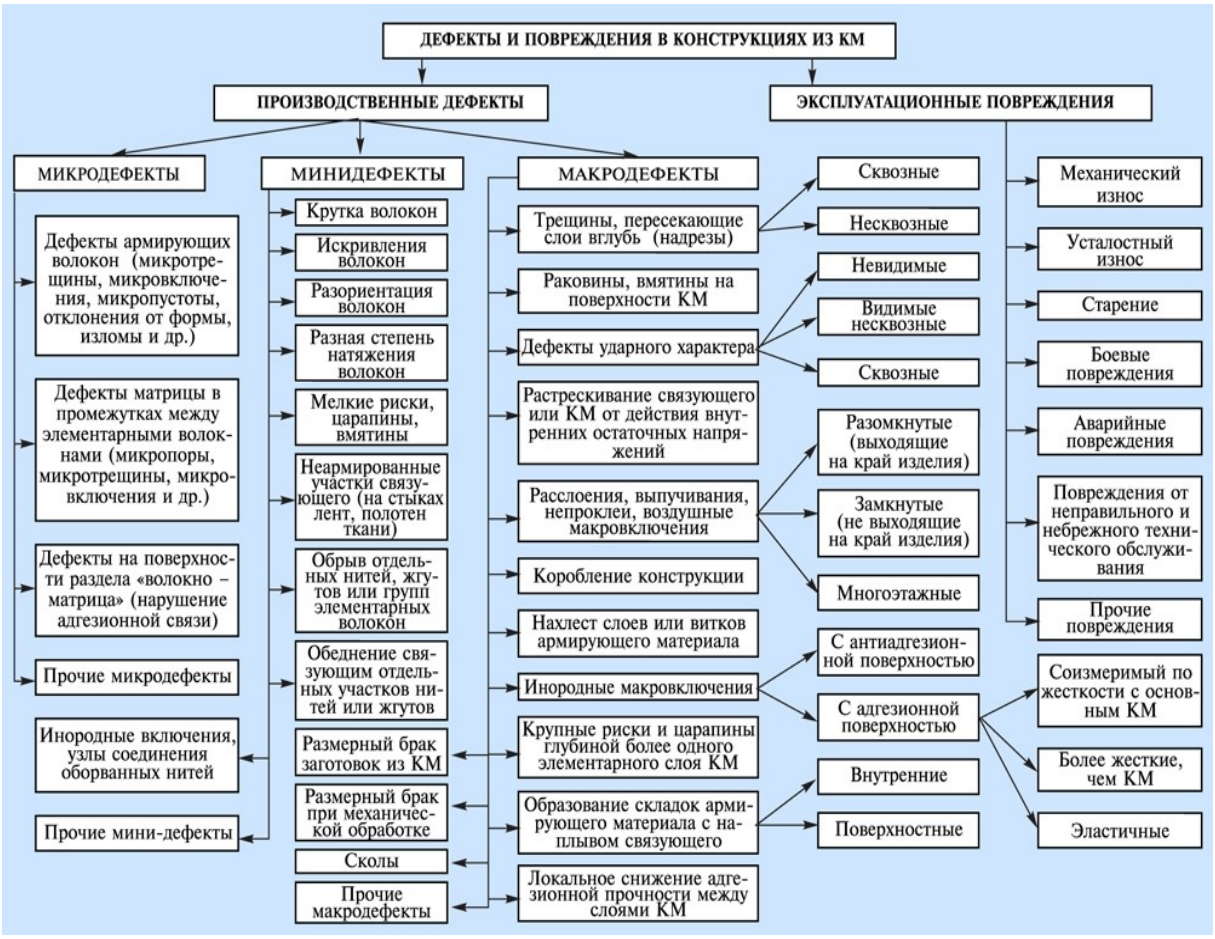


Рисунок 4 – Классификация повреждений в конструкциях из КМ

Рассмотрим некоторые виды повреждений агрегатов ЛА представленных в таблице 3.

Таблица 3 – Виды повреждений в агрегатах из ПКМ

Наименование повреждения	Место расположения повреждения (зона агрегата)	Причина возникновения повреждения	Характеристика повреждения
Царапины	По всему полю изделия	Небрежная транспортировка, хранение, эксплуатация	Щелевое повреждение ЛКП, матрицы
Неглубокие царапины в связующем (матрице)	По всему полю изделия		
Глубокие царапины			Щелевое повреждение наполнителя
Вмятины	По всему полю изделия	Небрежное обслуживание в эксплуатации, столкновение с посторонними предметами, град	–
Вмятины мелкие	По всему полю изделия		Деформация монолитной детали из ПКМ на глубину не более 0,5 мм
Вмятины глубокие	По всему полю изделия		Деформация монолитной детали из ПКМ на глубину более 0,5 мм
Отрыв поверхностного слоя монолитной детали из ПКМ	По всему полю изделия	Использование сверла с неправильной заточкой	Отслоение внешнего слоя монолитной детали из ПКМ при механическом повреждении
Отрыв поверхностного слоя при механообработке	По всему полю изделия	Использование свёрл с неправильной заточкой	Отслоение внешнего слоя монолитной детали из ПКМ при выходе инструмента из монолита ПКМ
Повреждение молниезащитного слоя	По всему полю изделия	Порывы или порезы молниезащитного слоя	Разрушение молниезащитного слоя и прилегающих к нему слоев ПКМ
Раковины	По кромке изделия	Углубление в матрице без оголения наполнителя	Сферическое углубление или несколько выбоин по кромке отверстия
Расслоение	По всему полю изделия	Некачественная пропитка и формование	Нарушение межслойных связей в ПКМ
Забоины, задиры	По кромке изделия	Нарушение техпроцесса при мех. обработке, взаимное трение деталей на ВС	Вырыв материала по кромке
Неправильно просверленное отверстие	По всему полю изделия	Небрежная механическая обработка	Повреждение с образованием отверстия
Прокол	По всему полю изделия	Небрежная механическая обработка (повреждение диаметром меньше 4 мм)	Повреждение с образованием отверстия
Трещины	По кромке изделия	Небрежная транспортировка, хранение, эксплуатация	Щелевое повреждение наполнителя
Ворсистость	По кромке изделия или отверстия	Оголение внешнего слоя волокон наполнителя	Механическая обработка затупленным инструментом

На сегодняшний день большинство перечисленных выше повреждений ремонтируют при помощи вспенивающихся клея ВКВ-9, клея ВК-27 и лент/тканей со связующим ЭДТ-69Н для приклейки ремонтных заплат в полевых условиях, либо при помощи препрегов КМКУ-2м, КМКУ-3м, КМКУ-11тр для приклейке ремонтных заплат автоклавным способом в заводских условиях.

Наличие отслоений (расслоений) определяется с помощью приборов типа ИАД-2 (импедансный акустический дефектоскоп) или простейшим способом типа простукиванием текстолитовым молоточком.

Руководства по техническому обслуживанию должны разрабатываться соответствующими организациями и включать необходимые процедуры контроля, техосмотра и ремонта композитных конструкций, включая инструкции по использованию специального инструмента, демонтажу, обработке, методам сушки элементов и повторной покраске (в том числе ограничения цветов краски, которые повышают температуру конструкций). Специальное оборудование, ремонтные материалы, вспомогательные материалы, оснастка, процессы обработки и другие сведения, необходимые для контроля или ремонта данного элемента, должны быть определены, так как стандартные методики, принятые для различных типов самолетов, непригодны.

В качестве средств оснащения при механической обработке сотовых конструкций из ПКМ могут использоваться: дрели пневматические любого типа, фрезерные головки с шарошками, торцовыми или ножевыми фрезами и специальные сверла из твердых сплавов со специальной заточкой, поскольку ПКМ обладает высокой твердостью, что приводит к быстрому затуплению и износу инструмента.

Поврежденный участок обшивки удаляется вырезом в виде минимального размера круга или прямоугольника со скругленными углами, описанных вокруг дефекта, а при наличии повреждений сотового заполнителя в зоне ремонта глубиной более 3,0 мм, как правило, проводится его полное удаление. При ремонте сквозных повреждений с отверстиями в обшивках разного размера при толщине обшивок до 1,0 мм клеевой смесью на основе клея ЕА 9394 и микросфер заполняется зазор (пространство) между обшивкой и нижней поверхностью сотовой вставки, образовавшийся в месте выреза фрагмента обшивки в меньшем отверстии, куда вставляется вставка из сотового заполнителя на клеевой композиции ЕА 9394 с наполнителем (аэросил А300), поверх вклеиваемой вставки сот накладывается вакуумный мешок или груз (мешочек с песком или металлической дробью); отверждение клея производится в течение 24 часов при температуре не ниже 20 °С под вакуумным мешком или под действием груза (рисунок 5).

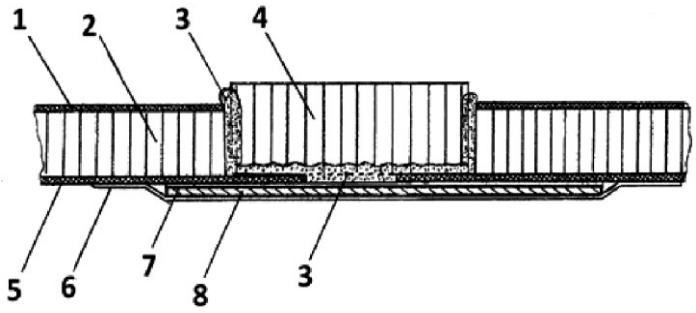


Рисунок 5 – Вклеивание сотовой вставки при ремонте сквозного отверстия в сотовой панели: 1 – наружная обшивка панели; 2 – сотовый заполнитель; 3 – клеевая смесь (ЕА 9394 и аэросил); 4 – сотовая ремонтная вставка; 5 – внутренняя обшивка панели; 6 – бумажная липкая лента; 7 – разделительная пленка; 8 – технологическая пластина (подкладка)

Все эти технологии предназначены для ремонта небольших повреждений диаметром не более 150 мм, однако, в случае пробоины или большого площадного повреждения традиционные технологии ремонта не подходят.

Авторами предлагаются следующие технологические операции при ремонте больших площадных повреждений, в частности, сотовых конструкций из ПКМ, которые выглядят следующим образом: 1) обозначение и разметка поврежденных участков; 2) контроль и дефектация зоны повреждений; 3) удаление лакокрасочного покрытия из зоны повреждения; 4) удаление поврежденных участков обшивок агрегатов и сотовых заполнителей; 5) образования скосов или послойного съема на обшивках при подготовке к формованию заплат; 6) обработка (удаление) сотового заполнителя.

Все эти операции аналогичны выполнению при традиционном ремонте, однако далее ремонт больших площадных повреждений значительно отличается от традиционного ремонта: 7) удаление нижней (внутренней) обшивки сотовой конструкции; 8) изготовление подкрепляющего элемента из ПКМ в форме кольца или овалоида диаметром бодее 150 мм, в зависимости от формы выреза в зоне повреждения, при этом изготовление подкрепления производится на специальной силиконовой оправке с внут-

ренним жгутом из углеволокна, типа УКН-5000П, используемого в качестве нагревателя; 9) затем производится полимеризация подкрепления за счет расширения силиконовой оправки создается давление, а за счет углеволокнистого жгута производится нагрев для полимеризации КМ подкрепляющего кольца [6], 10) затем композитное кольцо разрезается поперек в одном месте и силиконовая оправка при охлаждении сжимается и легко вынимается из кольца [7, 8]; 11) далее, необходимо обезжирить торцы сот кистью, смоченной изопропанолом, время выдержки после обезжиривания не менее 15 минут; 12) затем необходимо заполнить торцы сот клеевой смесью ЕА 9394 с микросферами МС-ВП-А9 ГОСТ-6-48-91-92 (далее по тексту клеевая смесь); 13) установить сотовую вставку в полость агрегата с учетом направления выкладки сот; 14) отформовать по контуру вырезанной обшивки ремонтную заплату с припуском по контуру 10–15мм для крепления, крышка изготавливается из материала аналогичного обшивке, при формовании заплаты применяется металлическая цулага и термоодеяло для создания давления и температуры при полимеризации связующих горячего отверждения; 15) далее при необходимости производится образование скосов на обшивке и заплате путем послойного съема слоев; 16) затем производится выборка сотового блока на величину равную ширине полки подкрепляющего элемента и заполнение подкрепляющего элемента клеевой смесью с двух сторон, далее производится заведение подкрепляющего элемента и крепление его к обшивке ЛА заклепками с односторонним подходом впотай [6], после чего устанавливается сотовая вставка в полость просверленного отверстия, затем к нему присоединяется ремонтная заплата, при этом соединение заплаты с подкрепляющим элементом (композитным кольцом), производится вытяжными заклепками впотай или болтами; 17) далее проводится проверка качества ремонта; 18) после окончания ремонта производится нанесение лакокрасочного покрытия (ЛКП).

На рисунке 6 представлен ремонт больших площадных односторонних повреждений композиционных конструкций с сотовым блоком.

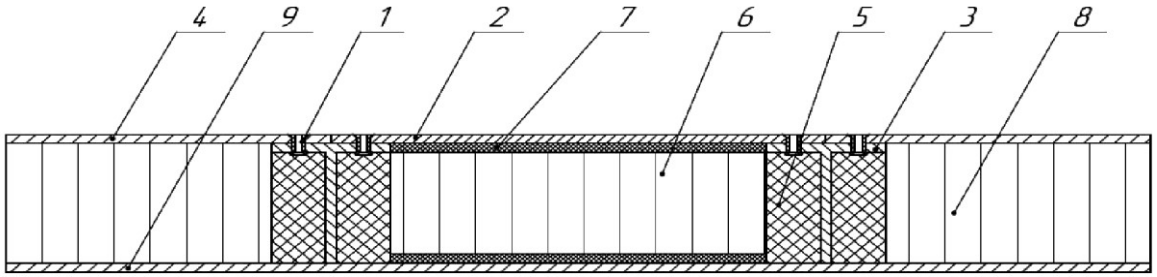


Рисунок 6 – Ремонт больших площадных односторонних повреждений композиционных конструкций с сотовым блоком: 1 – заклепка; 2 – ремонтная заплата; 3 – подкрепляющий элемент; 4 – внешняя обшивка панели; 5 – клеевая смесь; 6, 8 – сотовый элемент; 7 – тонкий слой клеевой смеси; 9 – внутренняя часть обшивки панели

Заключение

Исходя из таких технологических недостатков традиционных «полевых» ремонтных материалов со связующим ЭДТ-69Н, как низкие механические свойства, а также таких экономических недостатков традиционных «заводских» ремонтных материалов, как длительность и дороговизна демонтажа поврежденного агрегата, его транспортировки на завод и ремонта автоклавным способом, видится целесообразным рекомендовать новые технологии проведения ремонта больших площадных повреждений более 150 мм в полевых условиях безавтоклавным способом (без нагрева), возможно, даже без демонтажа агрегата.

Список литературы:

1. Крысин В.Н., Крысин М.В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. – М. : Машиностроение, 1989. – 240 с.

2. Серенсен С.В., Зайцев Г.П. Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами. – Киев : Наук. Думка,1982. – 296 с.

3. Технологические рекомендации ТР 1.4.1831-88. Ремонт сотовых клееных конструкций из полимерных композиционных материалов. – М. : НИАТ, 1984. – 183 с.

4. Карпусенко Б.Ф. Ремонт конструкций из КМ.-К. // В сб.: Техника, экономика, информация. Сер."Техника и технология", Вып. 2. – 1985. – С. 28–33.

5. Астанин В.В., Глова О.В., Шевчук О.А. Эксплуатационные повреждения элементов конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов и методы их ремонта. – К. : Технологические системы, 2011. – № 4. – С. 46–52.

6. Резниченко В.И., Хомич В.И. Применение композиционных материалов в энергетике, электротехнике, электронике. – М. : Российский Дом Знаний, 1992. – 238 с.

7. Резниченко В.И., Лукашенко И.Е., Горбоконь Н.В. Особенности ремонта больших площадных повреждений изделий из полимерных композиционных материалов // Булатовские чтения. – 2025 г. – Т. 4. – С. 127–130.

8. Резниченко В.И., Лукашенко И.Е., Горбаконь Н.В. Патент № 2854536 С1 Российская Федерация. Способ ремонта больших площадных повреждений изделий из полимерных композитных материалов: заявлено 25.08.2025: Опубликовано 13.01.2026 / заявитель МАИ.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ. СТРОИТЕЛЬСТВО. ТРАНСПОРТ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 574.587:556.55

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ И БИОМАССЫ МАКРОФИТОВ КАРСТОВЫХ ОЗЕР НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ГЛУБОКОЕ г. КАЗАНИ

Борисова Светлана Дмитриевна
Казанский государственный энергетический университет
канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура»
svetlana-zag@bk.ru

Губаев Эдуард Айдарович
Казанский государственный энергетический университет
аспирант, кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура»
edick116228rus@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты исследования состава дна озера Большое Глубокое (г. Казань) и его влияние на качество и количество высших водных растений. Установлено, что разнообразие донных осадков, обусловленная морфометрией карстовой котловины и антропогенным влиянием, выступает ключевым эдафическим фактором, регулирующим количество видов, проективное покрытие и биомассу высшей водной растительности. Выявлены критические зоны изменения растительных сообществ высших водных растений в условиях избыточного накопления органического вещества и заиления профундали.

Ключевые слова: карстовые озера, озеро Глубокое, донные отложения, макрофиты, видовое разнообразие, биомасса, антропогенное влияние, эвтрофирование.

Озеро Большое Глубокое, входящее в систему озер Лебяжье (г. Казань), представляет собой уникальный для урбанизированных ландшафтов Среднего Поволжья глубоководный водоем карстово-суффозионного происхождения. Максимальные глубины (до 14–16 м) и крутизна склонов озерной чаши предопределяют специфику его гидрологического, термического и гидрохимического режимов [1].

В последние десятилетия водоем испытывает интенсивную рекреационную нагрузку, ведущую к ускоренному антропогенному эвтрофированию. В этих условиях донные отложения становятся главным депо биогенов, органики и поллютантов, одновременно трансформируясь в мощный эдафический фактор. Высшая водная растительность (макрофиты), будучи важнейшим элементом самоочищения водоема, находится в прямой зависимости от характера субстрата. Изучение связи «субстрат – макрофиты» необходимо для оценки экологической емкости и прогнозирования сукцессионных процессов озерных экосистем [2, 5].

Исследования выполнялись в весенне-летний и осенний периоды. Сетка станций мониторинга охватывала ключевые экологические зоны водоема: песчаную литораль, заиленную сублитораль и верхнюю границу профундали.

В ходе исследований выявлена связь между видами высших водных растений и характером донного субстрата.

В зоне песчаной литорали (глубина 0–1,5 м) субстрат представлен мелко- и среднезернистыми кварцевыми песками с минимальным содержанием органического вещества и нейтральной реакцией среды (pH 7,1–7,4). В этих условиях жесткого и бедного биогенами субстрата видовое разнообразие ограничено, однако за счет мощных корневых систем доминируют воздушно-водные гелофиты – тростник южный (*Phragmites australis*) и рогоз узколистный (*Typha angustifolia*). Их сухой вес на квадратный метр составляет около 0,5 кг, что обусловлено механической устойчивостью грунта.

Зона заиленной сублиторали (глубина 1,5-3,5 м) характеризуется переходом к мелкодисперсным заиленным пескам и легким илам с умеренным содержанием органики и большим запасом легкоусвояемого корнями растений фосфора. Именно в этой пограничной зоне (между мелководьем и глубиной) растет много видов макрофитов (до 18 видов). Здесь формируются густые полидоминантные ассоциации укореняющихся погруженных гидрофитов: рдестов пронзеннолистного (*Potamogeton perfoliatus*) и блестящего (*P. lucens*), урути колосистой (*Myriophyllum spicatum*). Мягкий грунт и достаточное питание обепсечивают хороший рост высшим водным растениям, их сухой вес на квадратный метр составил до 0,34 кг [3, 4].

Глубоководная зона профундали (глубины > 4,0 м) представлена тонкодисперсными темно-серыми сапропелевыми илами со значительным содержанием органического вещества и pH 6,1–6,5. Летом ситуация ухудшается, в нижних слоях отмечается нехватка кислорода. Сильное заиление и обилие токсичных веществ не дают укореняющимся растениям расти и развиваться. В этой зоне выживают несколько неприхотливых видов высших водных растений, которые могут выжить без прикрепления к дну: роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum*) и элодея канадская (*Elodea canadensis*). Их биомасса нестабильна (до 120 г/м^2) и зависит от количества проникающего солнечного света и прозрачности воды, а не от качества грунта

Заключение

Донные отложения озера Глубокое – это важный фактор, определяющий места произрастания высших водных растений и количество их видов. Умеренное заиление в сублиторали и наличие биогенов ускоряет рост макрофитов и увеличивает разнообразие их видов. Одновременно накопление ила (органического вещества) в профундали вытесняют укореняющиеся формы высших водных растений, что способствует развитию плавающих макрофитов.

Полученные закономерности важны для разработки экспресс-методов биоиндикации и программ экологической реабилитации карстовых водоемов урбанизированных территорий..

Список литературы:

1. Биоразнообразие и типология карстовых озер Среднего Поволжья / под ред. Н.М. Мингазовой. – Казань : Казанский государственный университет, 2009. – 220 с.
2. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В. Региональные фоновые концентрации металлов в донных отложениях озер Республики Татарстан // Учен. зап. Казан. гос. ун-та., Сер. Естеств. Науки – 2010. – Т. 152. – Кн.1 – С. 185–191.
3. Папченков В.Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. – Ярославль : ЦМП МУБиНТ, 2001. – 214 с.
4. Садчиков А.П. Гидроботаника: прибрежно-водная растительность: учебное пособие для вузов / А.П. Садчиков, М.А. Кудряшов. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 241 с.
5. Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья / под ред. А.Ф. Алимова и Н.М. Мингазовой. – Казань : Издательство Казанского университета, 2001. – 256 с.

УДК 504.05

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Воробьев А.Е. **Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова** профессор кафедры «ТиГ»,

Мадаева М.З. **Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова** доцент кафедры «ТиГ»,

Джамалуева А.А. **Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова** старший преподаватель кафедры «ТиГ»

Аннотация. В статье рассматривается комплекс научно-исследовательских работ, посвященных оценке и минимизации техногенного воздействия горнодобывающих предприятий на окружающую среду и здоровье человека. Особое внимание уделяется анализу современных методов мониторинга экосистем в зонах интенсивного недропользования.

Ключевые слова: анализ, геоэкология, отходы, почва, металлы, медь, окружающая среда.

Горнодобывающие предприятия оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в частности, вызывая загрязнение тяжелыми металлами. На территории Кавказа расположен Урупский горно-обогатительный комбинат (ГОК), добывающий около 46 % запасов медной руды на Юге России. Отходы, хранящиеся в хвостохранилищах, содержат высокие концентрации меди (Cu), цинка (Zn), свинца (Pb) и других тяжелых металлов. Данное исследование посвящено оценке содержания тяжелых металлов в почвах рекультивированного хвостохранилища Урупского ГОК. Валовое содержание тяжелых металлов в почве определяли рентгенофлуоресцентным методом.

Высокие концентрации тяжелых металлов в отходах мededобывающего производства негативно сказываются на состоянии почв на прилегающих территориях. Проведенное исследования выявляет влияние тяжелых металлов на горно-луговую черноземовидную почву по показателям прорастания семян.

Значительный вклад в изучение проблемы геоэкологического воздействия горнодобывающих и перерабатывающих (процессы обогащения) предприятий на окружающую среду, а также рекультивации нарушенных территорий внесли российские и зарубежные ученые: доктора и кандидаты наук И.Д. Алборов, О.Б. Бабенко, Е.Н. Браунер, А.Е. Воробьев, Ю.С. Воронина, В.С. Груздев, Е.А. Гулан, Е.Б. Золототрубов, С.А. Ильченкова, Г.В. Калабин, Е.А. Красавцева, Н.Д. Левкин, А.В. Лусис, М.З. Мадаева, К.М. Муратова, Э.Э. Папян, А.С. Сакладов, Н.И. Самбулов, И.В. Синица, М.Ю. Филатова, Ю.В. Фильчаков, Е.А, Цешковская, Е.Б. Яницкий, M.J.H. Fu, M. Lindsay, A. Tapiaa, P. Thomas и др.

Все диссертационные работы можно разделить на 3 основных вида темаического анализа по направлениям:

1. Технологии снижения пылевого и газопылевого загрязнения – этот кластер диссертационных исследований оказался самым прикладным. Причем все работы были нацелены на разработку конкретных инженерных и технологических решений, что делает их весьма востребованными для горно-промышленных предприятий.

2. Геоэкологическая оценка и мониторинг воздействия – этот кластер диссертационных исследований – научно-методологический. Здесь довольно активно применяются ГИС-технологии, биоиндикационные методы, комплексные геохимические съёмки и т.д. Анализированные работы создают основную базу для экологического нормирования и мониторинга.

3. Реабилитация и восстановление нарушенных территорий – этот кластер диссертационных исследований – восстановительный, т.к. ориентирован на постадийную рекультивацию и долгосрочное планирование эффективного землепользования.

Вывод по анализирующим тематикам диссертационных исследований: доминирует оценочно-мониторинговая тематика (40 % работ), но растёт доля технологических решений (30 %) и реабилитационных подходов (20 %), что отражает происходящую эволюцию исследований от диагностики к управлению и восстановлению.

Что касается научной приоритетности, а также значимости для общества, то высокую приоритетность имеют научные работы, которые дают немедленные экономические и регуляторные эффекты.

Среднюю приоритетность имеют диссертационные работы, требующие более продолжительных наблюдений или доработки методик.

С научной точки зрения, существенная наибольшая научная новизна прослеживается у диссертационных работ с биоиндикацией и геохимическим анализом редкометалльных отходов, т.к. они расширяют имеющиеся фундаментальные знания о миграции токсикантов.

Наименьшая новизна – у более ранних работ, но в своё время они были пионерными в области пылеподавления.

Значимость для общества прослеживается в исследованиях с экологической и социальной научной стороны открытий.

Таблица 1

№	Работа	Год	Научная ценность	Эколого-социальная значимость	Технологическая применимость
1	Ильченкова	2005	низкая	высокая	средняя
2	Сакладов	2008	средняя	высокая	(социальная) низкая
3	Яницкий	2009	высокая	средняя	высокая (ГИС)
4	Папян	2016	высокая	средняя	низкая
5	Алексеенко	2018	средняя	высокая (рекреация)	высокая
6	Филатова	2021	средняя	средняя	средняя
7	Муратова	2021	средняя	высокая	очень высокая
8	Мадаева	2021	средняя	высокая	высокая
9	Красавцева	2022	высокая	высокая	средняя
10	Цешковская	2024	высокая	очень высокая	высокая

Хронологический тренд – устойчивый рост числа диссертационных работ с 2020 года, что говорит о высокой актуальности проблем горной экологии в современной России.

Тематический баланс – исследования эволюционируют от простой констатации ущерба (2000-е годы) к комплексной оценке (2010-е годы) и высокоэффективным инженерным решениям с элементами цифровизации и реабилитации (2020-е годы).

Общественная значимость наиболее выражена у диссертационных работ, связанных с качеством воздуха и восстановлением земель, т.к. они напрямую касаются здоровья населения и устойчивого развития территорий.

Наиболее приоритетной для эффективного внедрения является работа Муратовой (2021 г.) по газоочистке, а наиболее перспективной в научном плане – исследование Цешковской (2024 г.), как наиболее современное и междисциплинарное.

Рекомендуется дальнейшее усиление исследований по биомониторингу и экономической оценке экологического ущерба, т.к. эти научные направления представлены слабо.

Список литературы:

1. Воробьев А.Е., Абдурахмонов Г.А. Накопленные отвалы и хвостохранилища урановых рудников в Кыргызстане и возможности их утилизации и рекультивации // Горный журнал Казахстана. – 2021. – № 3. – С. 42–47.

2. Воробьев А.Е., Абдурахмонов Г.А. Стартап утилизации и рекультивации отвалов и хвостохранилищ урановых рудников Кыргызстана // В сборнике: Проблемы горного дела. Сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ. Донецкий национальный технический университет; Институт горного дела и геологии. – Донецк, 2021. – С. 278–285.

3. Воробьев А.Е., Абдурахмонов Г.А. Характеристика отвалов и хвостохранилищ урановых рудников Кыргызстана и возможности их утилизации и рекультивации // Горный вестник Узбекистана. – 2021. – № 2 (84). – С. 129–133.

4. Воробьев А.Е., Гулан Е.А. Основные принципы экологической безопасности хвостохранилищ Норильского горно-металлургического комбината // Материалы VI Международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр». – М. : Изд-во РУДН, 2007. – С. 457–460.

5. Воробьев А.Е., Гулан Е.А. Основные принципы экологической безопасности хвостохранилищ Норильского горно-металлургического комбината // Материалы Международного совещания «Современные методы комплексной переработки руд и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения 2007)». – Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2007. – С. 551–554.

6. Воробьев А.Е., Соколов И.В., Вахрушева Е.В. Геоэкологические факторы необходимости утилизации горной массы хвостохранилищ // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные техника и технологии горно-металлургической отрасли и пути их развития». – Навойиский горно-металлургический комбинат – Навоийский государственный горный университет. – Навои (Узбекистан), 12–14 мая 2010. – С. 165–166.

7. Воробьев А.Е., Траоре М.А. Практика рекультивации и переработки отвалов и хвостохранилищ во Франции // Горный вестник Узбекистана. – 2021. – № 3 (85). – С. 96–101.

8. Воронина Ю.С. Геоэкологические процессы загрязнения приземной атмосферы от хранилищ отходов Джидинского вольфрамо-молибденового комбината : автореф. дис. … канд. географ. наук. – Улан-Удэ, 2024. – 25 с.

УДК 574.583

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОФЛОРЫ ОЗЕРА СРЕДНИЙ КАБАН В РАЙОНЕ КАЗАНСКОЙ ТЭЦ-1

Говоркова Лада Константиновна
Казанский государственный энергетический университет
канд. бролог. наук, доцент, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура»
govorkovagoncharenko@yandex.ru

Нассер Марьям Гассан
Казанский государственный энергетический университет
магистрант, кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура»
nasser.maryam.gassan@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследования микрофлоры воды и грунтов озера Средний Кабан в зоне антропогенного воздействия тепловых стоков Казанской ТЭЦ-1. Установлено, что повышенный температурный режим в районе сброса термальных вод выступает в роли катализатора микробиологических процессов, локально ускоряя процессы биологического самоочищения водоема, однако создавая риски эвтрофикации и накопления органического вещества в грунтах в летний период

Ключевые слова: микрофлора, озеро Средний Кабан, Казанская ТЭЦ-1.

Система озер Кабан, расположенная в черте города Казани, представляет собой уникальный гидрологический объект, имеющий большое рекреационное, транспортное и инженерное значение. Среди трех изолированных водоемов системы озеро Средний Кабан испытывает наибольшую комплексную техногенную нагрузку. Одним из ключевых факторов воздействия на гидробиоценоз озера является функционирование Казанской ТЭЦ-1, которая осуществляет забор воды на производственные нужды и последующий сброс подогретых циркуляционных вод обратно в водоем [1]. Тепловое воздействие существенно изменяет естественный термический и гидрохимический режимы озера, что отражается на структуре и динамике микробиологических сообществ во всех зонах озера. Донные отложения аккумулируют выпадающие из толщи воды взвеси, органические соединения и тяжелые металлы. Микрофлора грунтов является наибольшим индикатором долговременного экологического состояния водного объекта, так как бактерии мгновенно реагируют на изменение температуры и поступление органических веществ. В связи с этим комплексное исследование микрофлоры воды и грунтов в зоне влияния ТЭЦ-1 является актуальной задачей для оценки экологического благополучия озера.

Отбор проб воды и грунта для микробиологического анализа проводился на озере Средний Кабан на следующих 3 станциях:

1 – зона сброса подогретых вод (сбросной канал Казанской ТЭЦ-1);

2 – зона центрального плеса озера (зона рассеивания и смешения вод);

3 – зона удаления от теплового факела (условно контрольная точка).

Микробиологические показатели определялись по общепринятой методике [2]. Определялись следующие микробиологические характеристики:

– общее микробное число (ОМЧ), включающее общее число мезо-фильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов, способных образовывать колонии на питательном агаре при температуре 37 ^{0}С в течение 24 ч, а также при температуре 20-22 ^{0}С в течение 72 ч для учета сапрофитных водных микроорганизмов, видимые с увеличением в два раза;

– общие колиформные бактерии (ОКБ), включающие грамотрицательные оксидазоотрицательные не образующие спор палочки, способные расти на дифференциальных средах, ферментирующие лактозу до кислоты, альдегида и газа при температуре 37 ^{0}С в течение 24–48 ч.

Анализ температурного режима показал, что в районе сбросного канала Казанской ТЭЦ-1 температура воды в среднем на 4,5–7,0 ^{0}С превышала показатели контрольной

точки (станция 3). Этот фактор оказывает прямое стимулирующее воздействие на метаболическую активность гидробионтов во всех зонах озера. Динамика общей численности микрофлоры продемонстрировала выраженную сезонную и пространственную гетерогенность. В весенний период численность микроорганизмов на всех станциях находилась в пределах стабильных значений, однако в районе сброса ТЭЦ-1 биомасса микроорганизмов росла ускоренными темпами. В зоне влияния термального сброса отмечаются максимальные значения, как в толще воды, так и в донных отложениях. Общая численность микроорганизмов в грунтах у сбросного канала достигает 12,4 млрд. кл./мл, что значительно выше контрольных значений (5,3 млрд. кл./мл). Высокая концентрация сапрофитов в грунтах (8,9 млн. кл./мл) свидетельствует об интенсивном накоплении органики, поступающей в водоем в результате промышленно-ливневого стока и отмирания термофильной растительности.

В то же время, важной особенностью микробного сообщества грунтов озера Средний Кабан является его высокий потенциал к деструкции органических соединений. В сезонном аспекте от мая к августу прослеживается закономерная перестройка бактериального сообщества в грунте. Если в начале лета в грунтах зоны ТЭЦ-1 за счет прогрева интенсивно размножаются гетеротрофы (сапрофиты), то к августу в донных отложениях возрастает доля олиготрофной микрофлоры [1; 4]. Индекс олиготрофности в грунтах на станциях 2 и 3 достигает значений 2,33–3,40, что указывает на эффективную глубинную минерализацию органических соединений микроорганизмами. Повышенная температура донных грунтов в районе ТЭЦ-1 в летние месяцы частично активизирует анаэробные процессы деструкции. В глубоких слоях грунта это может приводить к локальному дефициту кислорода. Таким образом, необходимо проведение своевременного контроля воды и грунта по микробиологическим показателям.

Заключение

Проведенное исследование микрофлоры воды и грунта озера Средний Кабан в районе Казанской ТЭЦ-1 позволяет сделать выводы о том, что термальный сброс оказывает большое влияние на озеро, приводя к увеличению общей численности бактерий и концентрации сапрофитной группы в воде и грунтах зоны подогрева. Донные отложения в районе сбросного канала выступают зоной повышенной аккумуляции органического вещества, о чем свидетельствует высокая численность сапрофитных бактерий грунта. Несмотря на высокую антропогенную нагрузку, экосистема озера сохраняют стабильные показатели биологического самоочищения. Трансформация микробиологических показателей от весеннего периода к концу лета демонстрирует эффективную работу олиготрофного звена микрофлоры по утилизации органического вещества. Для предотвращения рисков эвтрофикации, заиления и вторичного бактериального загрязнения акватории необходима строгая регуляция объемов сброса подогретых вод в пиковые летние периоды и постоянный мониторинг параметров экосистемы.

Список литературы:

1. Хисматуллин М.М. Динамика антропогенного воздействия на систему озер Кабан города Казани // Журнал экологии и промышленной безопасности. – 2015. – № 2. – С. 44–48.

2. Методические указания по санитарно-бактериологической оценке рыбохозяйственных водоемов, утв. Минсельхозпродом от 27.09.1999 г. № 13-4-2/1742.

3. Оценка качества воды устьевой области реки Казанки по микробиологическим показателям / Н.В. Шмакова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 11 (113). – Ч. 1. – С. 112–116.

4. Андреева М.Г. Исследование экологического состояния оз. Средний Кабан по микробиологическим показателям в сезонной и годовой динамике / М.Г. Андреева, С.В. Бердник // Российский журнал прикладной экологии. – 2016. – № 2. – С. 34–38.

УДК 621:313.3

СУММАРНАЯ АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ ВЫТЯЖЕК КАК ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ ИНДИКАТОР АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ГОРОДСКИЕ ТЕРРИТОРИИ

Гордеева Мария Эдуардовна
Казанский государственный энергетический университет
канд. биолог. наук, доцент
Maria.Galeeva@gmail.com

Жаров Данил Николаевич
Казанский государственный энергетический университет

Аннотация. Городские почвы находятся под комплексным антропогенным воздействием: транспортные потоки, промышленные предприятия, объекты энергетики и другие источники техногенной нагрузки. Это приводит к изменению почвенной системы и затрагивает содержание органического вещества, окислительно-восстановительные процессы и биологическую активность. В связи с этим представляет интерес поиск интегральных характеристик, чувствительных к совокупности происходящих изменений. В работе рассматривается возможность применения суммарной антиоксидантной активности (САОА) водных вытяжек из почв для сравнительной оценки городских территорий, испытывающих различные типы антропогенного воздействия. На начальном этапе исследования определена САОА почвенных вытяжек из образцов городской почвы, подверженных разному антропогенному воздействию. На основании анализа литературных данных рассмотрены вероятные механизмы изменения антиоксидантных свойств почв при транспортном, энергетическом и промышленном воздействии и оценена возможность использования САОА в качестве дополнительного индикатора загрязнения в структуре почвенного мониторинга.

Ключевые слова: суммарная антиоксидантная активность, городские почвы, антропогенная нагрузка, транспорт, энергетика, промышленность, почвенная вытяжка, экологический мониторинг.

Почвенный покров городской территории является одним из компонентов окружающей среды, наиболее продолжительно сохраняющих последствия антропогенного воздействия. В отличие от атмосферного воздуха и поверхностных вод, для которых характерны интенсивное перемещение и разбавление поступающих веществ, верхние горизонты почвы способны накапливать соединения, поступающие с атмосферными выпадениями, дорожной пылью, поверхностным стоком, отходами производства и продуктами сгорания топлива. Поэтому состав городских почв отражает не только современную, но и предшествующую техногенную нагрузку [1].

Химическое состояние городских почв формируется под влиянием нескольких групп источников. К числу наиболее распространенных относятся автомобильный транспорт, предприятия энергетики и промышленные объекты. Примером этого найдены данные по обзору городских почв Европы, включающие 174 исследования, в которых говорится, что наиболее характерное антропогенное влияние оказывают поступающие загрязнители почвы – Pb, Zn, Cu, Cr и Ni (основные источники поступления транспорт и промышленность) [1].

Поступающие загрязняющие вещества приводят к изменению кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояние почвы, активности микроорганизмов, интенсивности трансформации органического вещества. В результате возникает необходимость оперативного контроля и комплексного экспресс анализа состояния почвы для предупреждения негативных последствий. Одним из параметров, способных к оперативному дополнительному контролю состояния среды, может стать суммарная антиоксидантная активность (САОА) [2].

Под САОА понимается интегральная способность содержащегося в исследуемой среде комплекса соединений проявлять восстановительные свойства и противо-

действовать развитию окислительных процессов. В почве антиоксидантный потенциал формируется органическими и неорганическими компонентами различного происхождения. Существенный вклад в него вносят фенольные соединения, продукты разложения растительного материала, гуминовые вещества и другие редокс-активные компоненты [3–5]. В работе I. Ćwieląg-Piasecka [4] с соавторами установлено, что вклад гуминовых кислот в общую антиоксидантную активность почв превышал 50 %, а состав фенольных антиоксидантов зависел от характера растительности и землепользования.

Анализ зеленых территорий г. Пизы позволил доказать, что антиоксидантная активность городских почв была выше, чем на контрольной территории за пределами города. Авторами также установлена тесная положительная связь величины САОА с содержанием фенольных веществ, органического углерода ($r > 0{,}850$) и рядом характеристик биологической активности почв [3].

Таким образом, можно выдвинуть гипотезу, что САОА может рассматриваться не просто как аналитическая характеристика присутствия отдельных антиоксидантов, а как один из комплексных показателей состояния сложной почвенной системы.

Для полного анализа антропогенного воздействия на почвенный покров городской территории был проведен анализ литературных материалов по основным источникам загрязнения и первоначальные исследования САОА почвенных вытяжек.

Автомобильный транспорт оказывает на городскую почву комплексное воздействие от: продуктов сгорания топлива, износа тормозных механизмов, шин и дорожного покрытия, повторного подъема дорожной пыли, утечки топлива и технических жидкостей. Для почв вблизи крупных транспортных потоков характерно поступление Cu, Zn, Pb, Sb и Hg [1,6]. У произрастающих на придорожных участках растений отмечалось повышение содержания фенольных соединений и флавоноидов, что авторы связывают с развитием защитного ответа на стресс, вызванный тяжелыми металлами [7]. Проведенные предварительные анализы значений САОА водных вытяжек почвы вблизи основных магистралей крупного мегаполиса показал диапазон изменения значений от 22 до 90 мгRu/л в зависимости от транспортной нагрузки магистралей и локализации их на территории города.

Другой значимый фактор трансформации городских территорий связан с объектами теплоэнергетики. Характер их воздействия определяется видом используемого топлива, технологией его сжигания, режимом работы оборудования и принятой системой охлаждения.

Оксиды азота после поступления в атмосферу участвуют в фотохимических и окислительных превращениях с образованием азотной кислоты, нитратов и других азотсодержащих соединений, которые могут поступать на поверхность почвы посредством сухого и влажного осаждения. Дополнительное поступление реакционноспособного азота способно изменять pH почвенного раствора, соотношение форм азота, микробиологическую активность и процессы трансформации органического вещества. Все эти процессы потенциально связаны с изменением состава водорастворимых соединений, формирующих измеряемую антиоксидантную активность почвенной вытяжки [3–5].

Промышленные территории характеризуются особенно сложным составом антропогенной нагрузки. В зависимости от профиля предприятия в почву могут поступать металлы, нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды и другие органические и неорганические соединения.

Исследование почв 8 территорий-парков вблизи химических предприятий в близи бассейна среднего течения Янцзы показало существенное техногенное воздействие на содержание тяжелых металлов; наибольший вклад в рассчитанный экологический риск вносили Cd и Hg [8]. Исследования городских почв Шанхая также выявили смешанный вклад химической промышленности и транспорта в формирование содержания металлов в поверхностных почвах [8].

Анализ исследований последних лет показывает, что САОА в значительной степени связана с органической составляющей почвы. В работе I. Ćwieląg-Piasecka с соавторами [4] исследована САОА почв при различных видах землепользования: для водных вытяжек величина САОА составляла приблизительно от 5 до 21 мкг эквивалента галловой кислоты на грамм сухой почвы для пахотных земель и залежей и до-

стигала примерно 114 мкг эквивалента галловой кислоты на грамм сухой почвы в лесных почвах. При применении щелочной экстракции извлекалось в среднем в 30-56 раз больше редокс-активных соединений, чем водой. Доля гуминовых кислот в общей антиоксидантной способности щелочных экстрактов составляла от 46 до 89 %, а средние значения для различных типов землепользования превышали 50 % [9].

Анализ проведенного обзора позволяет выдвигать гипотезу, что высокая антиоксидантная активность не должна интерпретироваться как неблагоприятное экологическое состояние. Например, природная почва с высоким содержанием гумуса и растительных остатков способна характеризоваться большей САОА, чем техногенно нарушенная почва. Таким образом, при отборе проб почвы и планирования эксперимента по оценке состояния среды на основе САОА необходимо запланировать учет и отбор проб одного типа почвы для репрезентативного анализа, также проводить анализ гранулометрического состава почвы, содержания органического углерода и pH.

Вместе с тем именно интегральный характер показателя определяет интерес к его использованию. Если традиционный химический анализ отвечает на вопрос о содержании определенного вещества, САОА потенциально характеризует результирующее состояние совокупности редокс-активных компонентов водорастворимой фракции почвы.

Таким образом, перспективным представляется не установление единого нормативного значения САОА, а изучение ее пространственной изменчивости относительно территорий с различным характером антропогенной нагрузки и локального фонового уровня.

Список литературы:

1. Metals in urban soils of Europe: A systematic review / H. Binner, T. Sullivan, M.A.K. Jansen [et al.] // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 854. – Art. 158734. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158734.

2. Жаров Д.Н. Современные подходы к нормированию негативного воздействия антропогенных источников на окружающую среду // Материалы XXIX Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвященного Дню энергетика. – 2025. – Т. 2. – С. 1089–1091.

3. Antioxidant capacity in urban soils / R. Cardelli, G. Vanni, L. Guidi [et al.] // Landscape and Urban Planning. – 2014. – Vol. 124. – P. 66–75. – DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.005.

4. Antioxidant capacity sources of soils under different land uses / I. Ćwieląg-Piasecka, J. Łyczko, E. Jamroz [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 8394. – DOI: 10.1038/s41598-024-58994-9.

5. Rimmer D.L., Smith A.M. Antioxidants in soil organic matter and in associated plant materials // European Journal of Soil Science. – 2009. – Vol. 60. – P. 170–175. – DOI: 10.1111/j.1365-2389.2008.01099.x.

6. Sager M. Urban soils and road dust – civilization effects and metal pollution – a review // Environments. – 2020. – Vol. 7. – № 11. – Art. 98. – DOI: 10.3390/environments7110098.

7. Hazarika M., Borah G., Singha W.J., Deka H. Metals stress on soil enzyme activities and herbs defense in the vicinity of high traffic roadways // Environmental Monitoring and Assessment. – 2023. – Vol. 195. – Art. 1546. – DOI: 10.1007/s10661-023-12142-4.

8. Integrated assessment of the pollution and risk of heavy metals in soils near chemical industry parks along the middle Yangtze River / D. Xu, Z. Wang, X. Tan [et al.] // Science of the Total Environment. – 2024. – Vol. 917. – Art. 170431. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170431.

9. Source-oriented health risk assessment and priority control factor analysis of heavy metals in urban soil of Shanghai // Journal of Hazardous Materials. – 2024. – Vol. 480. – Art. 135859. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135859.

УДК 553.98

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗАКАНЧИВАНИЯ СКВАЖИН

Гуляев Вячеслав Николаевич
Управления планирования и мониторинга методов повышения нефтеотдачи пластов месторождений Западно-Сибирского региона ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
vyacheslav.gulyaev@lukoil.com

Каримов Румиль Рустямович
Тюменский индустриальный университет
магистрант базовой кафедры ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
rumilkarimov@gmail.com

Аннотация. В работе представлены инженерно-технологические методы повышения качества заканчивания скважин в условиях высокой геологической неопределенности пласта В-5 ботуобинского горизонта. Разработан алгоритм профилирования перфорации с учетом критических технологических буферов до газонефтяного ($h_{\text{гнк}} \geq 4{,}5 - 6{,}0$ м) и водонефтяного ($h_{\text{внк}} \geq 5{,}0 - 7{,}0$ м) контактов. Предложена рецептура коррозионно-стойкого тампонажного раствора на базе цемента ПЦТ-I-G-CC-1 с добавками микрокремнезема МК-85 (8–10 %), оксида магния MgO (расширение на 0,6–0,9 %), алюмосиликатных микросфер (плотность 1,58–1,63 г/см³) и ускорителей схватывания. Разработана система управления скин-фактором при $S > +3{,}0$ (СКО, Skinny-Frac) и сформированы критерии принятия технологических решений по данным ГДИС. Оценка технико-экономической эффективности показала прирост накопленной добычи нефти на 12–15 % и чистый экономический эффект от применения модифицированных цементных систем в размере 1 795 тыс. руб. на скважину.

Ключевые слова: заканчивание скважин, пласт В-5, технологический буфер, барьерное цементирование, микрокремнезем МК-85, оксид магния, алюмосиликатные микросферы, скин-фактор, Skinny-Frac – малообъёмный ГРП, экономическая эффективность.

Технологические методы повышения качества заканчивания скважин. Геометрическое профилирование «технологических буферов»

Для устранения рисков конусообразования разработан алгоритм расчета геометрического профилирования перфорации. На основе гидродинамического моделирования задаются критические «технологические буферы»:

– Верхний буфер до ГНК ($h_{\text{гнк}}$): составляет от 4,5 до 6,0 м в поровой части и расширяется до 8,0 м при наличии вертикальных микротрещин.

– Нижний буфер до ВНК ($h_{\text{внк}}$): задается в интервале от 5,0 до 7,0 м.

При общей мощности продуктивного пласта 24,5 м эффективный коридор перфорации составляет 11,5–15,0 м.

Назначение интервалов выполняется с использованием геодезического контроля и каротажа привязки с допуском по глубине не более $\pm 0{,}3$ м.

Таблица 1 – Схема профилированного вскрытия пласта

1410,0 м	Газонефтяной контакт, верхний защитный буфер h_гнк ≥ 4.5 – 6.0 м (рассеивание воронки)
1416.0 м	Эффективный интервал селективного вскрытия (перфорационный коридор: 11.5 – 15.0 м)
1433.5	Нижний защитный буфер h_внк ≥ 5.0 – 7.0 м (предотвращение подтягивания рассолов)
1440.5 м	Водонефтяной контакт

Рецептура барьерного цементирования в агрессивных средах

Для ликвидации заколонных перетоков и закалонной циркуляции скважины разработана рецептура тампонажного раствора на базе сульфатостойкого цемента ПЦТ-I-G-СС-1. В состав вводятся:

1. Микрокремнезем МК-85 (8–10 % от массы сухого цемента): связывает вымываемый гидроксид кальция $Ca(OH)_2$ в прочные низкоосновные гидросиликаты типа CSH(B), кольматируя капиллярную структуру камня до размеров, меньших размера ионов солей.
2. Оксид магния (MgO): обеспечивает расширение цементного камня на 0,6–0,9 % в период ОЗЦ, создавая напряженный контакт со стенками скважины и эксплуатационной колонной.
3. Алюмосиликатные полые микросферы: снижают плотность тампонажного раствора до 1,58–1,63 г/см³ для предотвращения поглощения раствора в условиях аномально – низкого пластового давления.
4. Солестойкие ускорители схватывания (NaCl / KCl): обеспечивают ускоренный набор прочности в интервале влияния многолетней мерзлоты при температурах до +3 °C [2, с. 773].

Управление скин-фактором при освоении скважин

На основе анализа КВД определяется текущее состояние призабойной зоны пласта. Для фонда скважин с повышенным скин-фактором ($S > +3{,}0$) вводятся адресные технологии интенсификации:

– Солянокислотная обработка: применение селективных кислотных составов с растворителями АСПО для устранения парафинизации и доломитового шлама.

– Малообъемный ГРП (Skinny-Frac): формирование коротких трещин высокоточного простирания, не превышающих установленный нижний буфер $h_{\text{внк}}$, для восстановления гидродинамической связи без риска прорыва воды [4, с. 22].

Таблица 2 – Критерии оценки качества заканчивания и технологические решения

Показатель ГДИС / промысловые параметры	Критическое значение	Технологическое действие / Мероприятие
Скин-фактор (S)	$S > +3{,}0$	Проведение СКО с добавлением взаимных растворителей и ингибиторов АСПО
Газовый фактор (ГФ)	> 150 м^3/т	Изоляция верхних дыр перфорации (РИР), установка набухающих пакеров
Обводненность (W)	$> 50\,\%$	Водоизоляционные работы (ВИР) полимерными гелями, установка цементных мостов
Коэффициент продуктивности	$< 0{,}5$ м^3 / (сут $\cdot$ МПа)	Проведение малообъемного ГРП (Skinny-Frac) или повторная селективная перфорация
Забойное давление ($P_{\text{заб}}$)	$< P_{\text{насыщения}}$	Оптимизация режима работы погружного оборудования (ЭЦН), ограничение депрессии

Оценка технико-экономической эффективности и снижение рисков

Внедрение предложенных решений по заканчиванию скважин на пласте В-5 обеспечивает существенный технико-экономический эффект:

1. Прирост накопленной добычи: переход от сплошного вскрытия к селективному профилированию с соблюдением буферов $h_{\text{гнк}}$ и $h_{\text{внк}}$ увеличивает накопленную добычу нефти по скважине на 12–15 % за счет удлинения периода безводной и безгазовой эксплуатации.
2. Экономия на ремонтно-изоляционных работах: использование модифицированного цемента (МК-85 + MgO) исключает развитие заколонных перетоков.

Таблица 3 – Экономическая эффективность применения модифицированных тампонажных систем на 1 скважину

Наименование внедряемого технологического решения	Стоимость внедрения, тыс. руб.	Предотвращенный ущерб от РИР и простоев, тыс. руб.	Чистый экономический эффект, тыс. руб.
Модификация цемента (МК-85 + MgO)	185	1 250	1 065
Снижение плотности (АСПМ-микросферы)	120	850	730
Итого по комплексу мероприятий:	305	2 100	1 795

Управление геокриологическими рисками

Добавка солестойких ускорителей схватывания предотвращает тепловое размывание стенок скважины в интервале многолетней мерзлоты, исключая проседание цементного столба и устьевые газопроявления.

Основываясь на выше изложенном, можно прийти к следующим выводам:

1. Высокая геологическая неопределенность пласта В-5, обусловленная блоковой тектоникой, ограниченной мощностью нефтяной оторочки, наличием газовой шапки и агрессивных подстилающих рассолов, требует отказа от шаблонных методов вскрытия и крепления ствола.
2. Проблематика упущенных возможностей проявляется в преждевременном обводнении и загазовывании скважин при отклонении от проектных отметок перфорации всего на 1,5–2,0 м, а также в разрушении цементного камня в агрессивных средах.
3. Реализация комплекса мероприятий – расчет селективных геометрических буферов ($h_{\text{гнк}} \geq 4{,}5$ м, $h_{\text{внк}} \geq 5{,}0$ м), применение барьерного цементирования смесью ПЦТ-I-G-СС-1 с добавками МК-85, MgO и АСПМ, а также адресованный контроль скин-фактора по данным КВД – позволяет полностью исключить заколонную циркуляцию, предотвратить конусообразование и повысить накопленную добычу нефти на 12–15 %.

Список литературы:

1. Тампонажные растворы для скважин в сложных горно-геологических условиях / В.П. Овчинников, Ф.А. Агзамов, Ю.С. Кузнецов [и др.]. – М. : Недра, 2011. – 464 с.
2. Нельсон Э.Б., Гийо Д. Цементирование скважин. – Шлюмберже Эдьюкейшнл Сервисез, 2006. – 773 с.
3. Редди Б.Р., Фитцджеральд Дж., Бадаламенти А. Инновационные решения в области цементирования для соленосных формаций и высокоминерализованных рассолов. SPE-166585-MS. – 2013. – С. 12.
4. Воробьев С.В. Граничные значения геофизических параметров пород – коллекторов ботуобинского горизонта северо-восточной часто Непско-Ботуобинской антеклизы. – М. : Геология нефти и газа. – № 1-2. – С. 12–21.
5. Моисеев С.А. Ботуобинский продуктивный горизонт (условия формирования, строение и перспективы нефтегазоносности). Тез. докладов VIII международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь 2012». – М. : ИНГГ СО РАН, 2012. – С. 19–23.
6. Мандраков Г.В. Анализ эффективности гидродинамических исследований добывающих скважин на месторождениях Восточной Сибири. – С. 55.

УДК 553.98

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ И ЗАКАНЧИВАНИЕ СКВАЖИН. ПРОБЛЕМАТИКА УПУЩЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Гуляев Вячеслав Николаевич
Управления планирования и мониторинга методов повышения нефтеотдачи пластов месторождений Западно-Сибирского региона ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
vyacheslav.gulyaev@lukoil.com

Каримов Румиль Рустямович
Тюменский индустриальный университет
магистрант базовой кафедры ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
rumilkarimov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрен комплексный подход к преодолению негативного влияния геологической и технологической неопределенности при заканчивании скважин на примере сложнопостроенных продуктивных отложений вендского возраста (пласт В-5 ботуобинского горизонта). Детально охарактеризованы тектоническое строение, литолого-фациальные особенности и фильтрационно-емкостные свойства терригенного коллектора прибрежно-морского и пляжево-барового генезиса. На основе анализа промысловых данных скважин Центрального блока выявлено, что основной причиной упущенных возможностей (недополучения накопленной добычи нефти в 3–5 раз и падения периода безводной эксплуатации с 24 до 3–6 месяцев) является высокая чувствительность узкой нефтяной оторочки к отклонениям от проектных параметров вскрытия всего на 1,5–2,0 м. Установлены синергетические риски: прорывы свободного газа и агрессивных подстилающих рассолов из-за нарушения технологических буферов ($h_{\text{гнк}}$ и $h_{\text{внк}}$), химическая деструкция затрубного цемента, а также техногенная кольматация призабойной зоны пласта парафинами с ростом скин-фактора до $S = +5{,}1$ в условиях влияния многолетней мерзлоты. Обоснована необходимость перехода от шаблонного заканчивания к адресно-ориентированной концепции. Предложены инженерные решения по геометрическому профилированию интервалов перфорации, применению коррозионно-стойких тампонажных систем на базе цемента ПЦТ-I-G-CC-1 с микрокремнеземом МК-85, MgO и микросферами, а также алгоритмы дифференцированного управления скин-фактором (СКО, Skinny-Frac) при освоении скважин.

Ключевые слова: геологическая неопределенность, пласт В-5, заканчивание скважин, упущенные возможности, защитные технологические буферы, газонефтяной контакт (ГНК), водонефтяной контакт (ВНК), скин-фактор, барьерное цементирование, микрокремнезем МК-85, кольматация призабойной зоны пласта (ПЗП).

Эффективность освоения и разработки месторождений углеводородов со сложным геологическим строением в значительной степени определяется качеством вторичного вскрытия и крепления ствола скважины. В условиях сложной блоковой тектоники, ограниченной мощности продуктивных пластов и контрастной подвижности флюидов традиционные шаблонные подходы к заканчиванию приводят к возникновению проблематики «упущенных возможностей» – недополучению плановой накопленной добычи нефти, преждевременному обводнению или загазовыванию фонда и необходимости проведения ранних дорогостоящих ремонтно-изоляционных работ.

В пределах Непско-Ботуобинской антеклизы Сибирской платформы ключевым объектом разработки выступает пласт В-5 ботуобинского горизонта вендского возраста. Геологическое строение пласта осложнено подстиланием высокоминерализованными рассолами (до 385 г/л) и наличием мощной газовой шапки при малой мощности нефтяной оторочки (24,5–26,5 м). Промысловый опыт показывает, что данная система обладает крайне высокой чувствительностью к технологическим погрешностям: откло-

нение интервала перфорации от проектного коридора всего на 1,5–2,0 м провоцирует быстрое встречное конусообразование, сокращая межремонтный период скважин в 4–8 раз. Ситуация усугубляется воздействием многолетнемерзлых пород и низкой пластовой температурой (+17,2 °C), вызывающими интенсивное выпадение асфальтеносмолопарафиновых отложений и формирование высокого положительного скин-фактора ($S > +3{,}0–+5{,}1$), а также коррозионным разрушением стандартного цементного камня в затрубном пространстве.

Поскольку проблема упущенных возможностей на пласте В-5 носит выраженный синергетический характер (сочетание геодезических, гидродинамических, физико-химических и цементных факторов), ее решение невозможно в рамках отдельных изолированных мероприятий.

Целью настоящей работы является обоснование и разработка концепции комплексного адресно-ориентированного заканчивания скважин в условиях высокой геологической неопределенности пласта В-5, объединяющей геометрическое профилирование защитных буферов ($h_{\text{ГНК}}$ и $h_{\text{ВНК}}$), использование коррозионно-устойчивых тампонажных систем барьерного типа и дифференцированный контроль состояния призабойной зоны пласта для максимизации выработки запасов нефти.

Таблица 1 – Описание геологического разреза

ЮРЯХСКАЯ СВИТА	Продуктивные пласты Б5 и Б3-4 (Доломиты,ангидриты)
УСПУНСКАЯ СВИТА	Пласт В3
БЮКСКАЯ СВИТА (Верхняя подсвита)	Покрышка пласта В-5: Магнезит-доломиты, ангидриты
БЮКСКАЯ СВИТА (Нижняя подсвита)	ПЛАСТ В-5 (Ботуобинский горизонт) Песчаники кварцевые, прибрежно-морские/баровые
КУРСОВСКАЯ СВИТА	Пласты Улаханский и Талахский (Пласт В13)
КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ФУНДАМЕНТ	

Литология, ФЕС и минеральный состав (считать данные условными приведенные ниже, ввиду малого количества данных по месторождению)

Пласт В-5 стратиграфически приурочен к нижнебюкской подсвите. Он представляет собой бароподобное тело северо-восточного простирания, сформировавшееся в прибрежно-морской обстановке (верхняя предфронтальная зона пляжа, устьевые бары, распределительные каналы). Общая толщина горизонта меняется от 5,5 м до 33,2 м.

Породы сложены преимущественно мелко-среднезернистыми кварцевыми (87,7 %) и полевошпат-кварцевыми песчаниками. Гранулометрический анализ показывает медианный диаметр зерен $M_d = 0{,}256$ мм при коэффициенте отсортированности $S_o = 1{,}42$. Цементация пород неравномерная (от бесцементных контактных типов до мозаичного базально-порового заполнения объемом до 40 %). Аутигенный и постседиментационный цемент представлен доломитом, ангидритом, регенерационным кварцем и битуминозно-глинистыми пленками.

– Коэффициент песчанистости: 0,232–1,0 (в среднем 0,804);
– Коэффициент расчлененности: 1–12 (в среднем 2,1);
– Пористость по керну/ГИС: 13,8–15,6 %;
– Упругие константы: модуль Юнга $E = 36{,}376$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}1784$, модуль сдвига $G = 12{,}42$ ГПа, коэффициент сжимаемости $\beta = 0{,}488$ ГПа$^{-1}$ [4, с. 22].

Дестабилизирующие физико-гидродинамические факторы

Выделяются следующие основные дестабилизирующие факторы, приводящие к упущенным возможностям при заканчивании скважин:

1. Малая мощность нефтяной оторочки при жестких границах флюидальных контактов: средняя эффективная нефтенасыщенная толщина составляет около 24,5–26,5 м. Положение ГНК зафиксировано на абсолютной отметке -1410,0 м (1545–1567 м по вертикали), а ВНК – на отметке -1440,5 м (1550–1560 м, наклонный контакт).

2. Встречное конусообразование: подвижность свободного газа и подошвенных вод кратно превышает подвижность пластовой нефти (динамическая вязкость

нефти в пластовых условиях составляет 2,4–2,6 мПа·с). При возникновении воронки депрессии происходит быстрый опережающий прорыв газа сверху или рассолов снизу.

3. Агрессивность подстилающих рассолов: Минерализация пластовой воды достигает 385 г/л (хлоркальциевый тип, плотность 1,21–1,24 г/см³, содержание ионов Cl^- до 230 000 мг/дм³, Ca^{2+} до 42 000 мг/дм³). Это вызывает химическую деструкцию стандартного цементного камня в затрубном пространстве.

4. Снижение пластового давления (АНПД): в процессе эксплуатации зафиксировано падение пластового давления с первоначальных 14,8 МПа до 11,2–11,5 МПа, что увеличивает риск поглощений тампонажного раствора при цементировании.

5. Температурный фактор и АСПО: базовая температура пласта составляет +17,2 °С. Наличие многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью до 380 м в верхних интервалах и прокачка холодных жидкостей при заканчивании вызывают выпадение парафинов (доля парафинов в нефти 1,9 %), что приводит к фатальному кольматированию призабойной зоны пласта (ПЗП) [4, с. 14].

Геологическая неопределенность и проблематика упущенных возможностей

Упущенные возможности в контексте заканчивания скважин проявляются в виде недополученной накопленной добычи нефти, вынужденных ранних капитальных ремонтов (РИР) и преждевременного вывода скважин из эксплуатации.

Ошибки профилирования и несоблюдение технологических буферов

Анализ показал, что отклонение интервала перфорации от проектного безопасного коридора всего на 1,5–2 м снижает период безводной и безгазовой эксплуатации с 24 месяцев до 3–6 месяцев.

Скважина № 115: неопределенность отметки кровли привела к заложению верхних дыр перфорации на отметке -1415,2 м. Фактический верхний буфер до газа составил $h_{\text{ГНК}} = 3{,}2$ м при норме $\geq 4{,}5$ м. Результат: прорыв свободного газа, рост газового фактора с базовых 82 м³/т до 430 м³/т, падение дебита нефти до 8,5 т/сут.

Скважина № 78: нижняя граница перфорации сжата до отметки -1436,1 м ($h_{\text{ВНК}} = 2{,}4$ м при норме $\geq 5{,}0$ м). Наличие вертикальных трещин вызвало опережающее подтягивание подошвенной воды. Результат: рост обводненности до 84,0 %, дебит нефти упал до 10,4 т/сут. [6, с. 55]

Таблица 2 – Сравнительный анализ показателей заканчивания и эксплуатации скважин Центрального блока пласта В-5

Номер скважины	Абсолютная отметка перфорации кровли / подошвы (м)	Фактический буфер до газа hгнк (м) (норма ≥ 4,5–6,0 м)	Фактический буфер до воды hвнк (м) (норма ≥ 5,0–7,0 м)	Текущее состояние работы скважины (дебит жидкости / нефти, обводненность, газовый фактор)	Геолого-технологический результат заканчивания
1	2	3	4	5	6
№ 73 (стабильная)	-1418,2 / -1431,5	6,2	7	Дебит нефти: 38 т/сут. Обводненность: 4,2 %. Газовый фактор: 82 м³/т.	Оптимальное заканчивание.Скважина работает со стабильными пластовыми параметрами без прорывов газа и воды.
№ 110 (стабильная)	-1417,5 / -1432,0	5,5	6,5	Дебит нефти: 42 т/сут. Обводненность: 5,1 % Газовый фактор: 85 м³/т.	Оптимальное заканчивание. Соблюдены оба технологических буфера, конусообразование отсутствует.
№ 78	-1420,0 / -1436,1	8	2,4 (критически мало)	Дебит жидкости: 65 т/сут. Дебит нефти: 10,4 т/сут. Обводненность: 84,0 %. Газовый фактор: 82 м³/т.	Прорыв подошвенных вод. Из-за заложения подошвы перфорации вблизи ВНК и наличия трещин образовался устойчивый водяной конус.

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6
№ 115	-1415,2 / -1428,0	3,2 (критически мало)	10,5	Дебит нефти: 8,5 т/сут. Обводненность: 3,0 %. Газовый фактор: 430 м³/т.	Прорыв свободного газа. Из-за недостаточной величины верхнего буфера воронка депрессии подтянула газ из газовой шапки.
№ 112	-1418,0 / -1431,0	6	7,5	Дебит нефти: 12 т/сут. Обводненность: 14,5 %. Газовый фактор: 88 м³/т.	Высокий скин-фактор (S = +4,8). Геометрические буферы соблюдены, но ПЗП сильно закольматирована. Требуется СКО.
№ 140	-1417,0 / -1430,5	5	8	Дебит нефти: 7,2 т/сут. Обводненность: 11,0 %. Газовый фактор: 82 м³/т.	Высокий скин-фактор (S = +5,1). Низкая продуктивность из-за парафинизации и загрязнения ПЗП. Рекомендована СКО с растворителями АСПО.

Коррозия затрубного цементного камня и заколонная циркуляция

При цементировании стандартными портландцементными смесями контакт с хлоркальциевыми рассолами вызывает растворение гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ (выщелачивание) и образование гидрохлорсиликатов кальция с увеличением их объема (растрескивание). В результате в цементном кольце формируются микроканалы, обеспечивающие заколонную циркуляцию флюидов из газовой шапки или водоносного горизонта даже при физическом соблюдении интервалов перфорации в теле пласта [1, с. 125].

Таким образом, проведенный анализ геолого-физических условий пласта В-5 и промысловых данных эксплуатации скважин Центрального блока позволяет сделать вывод, что основной причиной возникновения «упущенных возможностей» при разработке водонефтегазовых залежей со сложной блоковой тектоникой является высокая чувствительность системы к отклонениям от проектных параметров заканчивания.

Сочетание малой мощности нефтяной оторочки, контрастной подвижности флюидов и высокого риска химической деструкции затрубного цементного камня под воздействием агрессивных хлоркальциевых рассолов делает традиционные методы вскрытия неприменимыми. Ошибки профилирования перфорации всего на 1,5–2,0 м приводят к преждевременному конусообразованию, сокращая период безводной и безгазовой эксплуатации в 4–8 раз и формируя устойчивый скин-фактор ($S > +3{,}0$). Это подтверждает необходимость перехода от шаблонного заканчивания к концепции адресно-ориентированного профилирования с обязательным применением коррозионностойких тампонажных систем и дифференцированного управления состоянием призабойной зоны пласта.

Выводы по результатам анализа геологических и технологических рисков

1. Высокая чувствительность к точности вскрытия: неопределенность структурных отметок кровли и подошвы пласта В-5 в условиях узкого нефтяного окна ($24{,}5 - 26{,}5$ м) делает критичным несоблюдение технологических буферов ($h_{\text{гнк}} \geq 4{,}5$ м, $h_{\text{внк}} \geq 5{,}0$ м), что ведет к снижению дебитов нефти в 3–5 раз из-за прорывов газа и подстилающих рассолов.

2. Техногенная кольматация ПЗП: низкая пластовая температура ($+17{,}2$ °С) в сочетании с температурным воздействием многолетней мерзлоты создает условия для интенсивного выпадения АСПО и формирования высокого положительного скин-фактора ($S > +3{,}0 – +5{,}1$), блокирующего фильтрационные каналы [2, с. 310].

3. Необходимость комплексирования решений: проблема упущенных возможностей на пласте В-5 носит синергетический характер, в связи с чем ее решение невозможно без одновременного внедрения геодезически точного профилирования перфорации, применения коррозионно-устойчивых растворов цементирования и адресных методов химико-физической интенсификации притока.

Список литературы:

1. Тампонажные растворы для скважин в сложных горно-геологических условиях / В.П. Овчинников, Ф.А. Агзамов, Ю.С. Кузнецов [и др.]. – М. : Недра, 2011. – 464 с.
2. Нельсон Э.Б., Гийо Д. Цементирование скважин. – Шлюмберже Эдьюкейшнл Сервисез, 2006. – 773 с.
3. Редди Б.Р., Фитцджеральд Дж., Бадаламенти А. Инновационные решения в области цементирования для соленосных формаций и высокоминерализованных рассолов. SPE-166585-MS. – 2013. – С. 12.
4. Воробьев С.В. Граничные значения геофизических параметров пород – коллекторов ботуобинского горизонта северо-восточной часто Непско-Ботуобинской антеклизы. – М. : Геология нефти и газа. – № 1-2. – С. 12–21.
5. Моисеев С.А. Ботуобинский продуктивный горизонт (условия формирования, строение и перспективы нефтегазоносности). Тез. докладов VIII международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь 2012». – М. : ИНГГ СО РАН, 2012. – С. 19–23.
6. Мандраков Г.В. Анализ эффективности гидродинамических исследований добывающих скважин на месторождениях Восточной Сибири. – С. 55.

УДК 622.233:622.235:624.191

СРАВНЕНИЕ БУРОВЗРЫВНЫХ СПОСОБОВ ПРОХОДКИ ВЫРАБОТОК БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

Гутник В.Ф. | **АО «Моспроект-3»**

Бойко В.А. | **Сибирский федеральный университет**

Аннотация. Статья содержит анализ и сравнение способов проходки горных выработок большого сечения методом буровзрывных работ в условиях многолетней мерзлоты, заходками. На примере строительства железнодорожного тоннеля сравнивается уступный способ, сначала калотта, затем штросса, со способом сплошного забоя. Дано краткое описание, о целесообразности применения каждого способа, в зависимости от конкретных условий строительства. На каждый способ представлены паспорта буровзрывных работ, на основании которых наглядно показана скорость проходки, расход взрывчатого вещества и потребность в технологической оснащённости. Приведён итоговый результат сравнения двух способов.

Ключевые слова: тоннель, буровзрывные работы (БВР), коэффициент использования шпура (КИШ), взрывчатые вещества (ВВ), уступный способ, способ сплошного забоя, шпур.

Введение. Выбор способа проходки горных выработок [1] зависит от горно-геологических и горнотехнических характеристик вмещающих пород, этапности выполняемых работ, допустимого уровня сейсмических нагрузок на горный массив [2], требуемой скорости строительства объекта вкупе со стоимостью выполняемых работ, длины выработки, а также от уровня технологической оснащённости предприятия. Существуют различные методики расчёта параметров буровзрывных работ [3, 4, 5] и аналитика различных методов [6] но в основном они все предназначены дли добычи полезных ископаемых и проходке горных выработок не в мёрзлых породах. Приведенные ниже паспорта буровзрывных работ были разработаны и внедрены на производство при проходке нового Дуссе-Алиньского тоннеля. В виду ряда различных факторов, проходка велась как уступным способом, так и способом сплошного забоя.

Уступный способ. Данный способ применяется в неустойчивых грунтах, когда раскрытие выработки на полное сечение может привести к обрушению кровли и вывалам породы. К плюсам данного способа можно отнести удобство выполнения всех операций цикла, в виду небольшого сечения раскрываемой выработки, что не требует применения высокогабаритной дорогостоящей техники.

Проходка калотты. Ещё одним плюсом является то, что если пройти калотту тоннеля на всю длину, то образуется естественная вентиляция, которая значительно облегчает проветривание выработки после взрывных работ, а также появляется сквозной проход через тоннель, что упрощает логистику работ и доставку материалов. На рисунке 1 и рисунке 2 представлена схема бурения шпуров при проходке калотты [7].

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 1.

Время цикла на проходку калотты составляет 29 часов, средняя скорость проходки – 96,4 п.м./мес.

Проходка штроссы. Применяется после проходки калотты. Безусловным плюсом является наличие двух обнаженных плоскостей, что значительно увеличивает коэффициент использования шпура (КИШ), упрощает систему вруба и сокращает количество взрывчатого вещества (ВВ) на 1 кубический метр породы. При варианте проходки калотты на всю длину тоннеля, возможно открытие нескольких фронтов работ по проходке штроссы. Также не требует применения специализированной габаритной техники. На рисунке 3 и рисунке 4 представлена схема бурения шпуров при проходке штросы:

– отбойные шпуры – I;
– оконтуривающие шпуры – II;

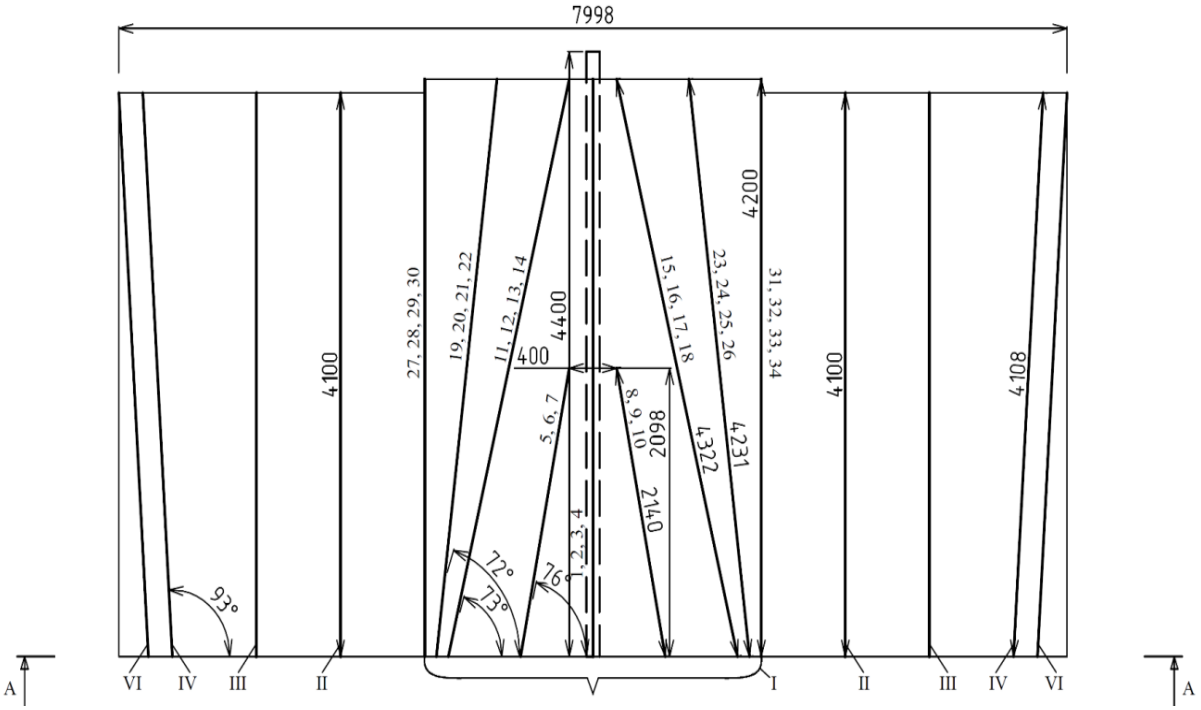


Рисунок 1 – Продольный разрез по шпурам: врубовые шпуры и скважины – I; отбойные шпуры – II; предконтурные шпуры – III; оконтуривающие шпуры – IV; разгрузочные шпуры – V, L = 4200, выполняют роль дополнительной обнажённой поверхности, располагаются между шпурами IV группы; полозовые шпуры – VI, шпуры 78 и 87 забуриваются под углом 93º относительно горизонтальной и вертикальной оси тоннеля, шпуры с 79 по 86 забуриваются под углом 93º относительно горизонтальной оси тоннеля и 90º относительно вертикальной оси

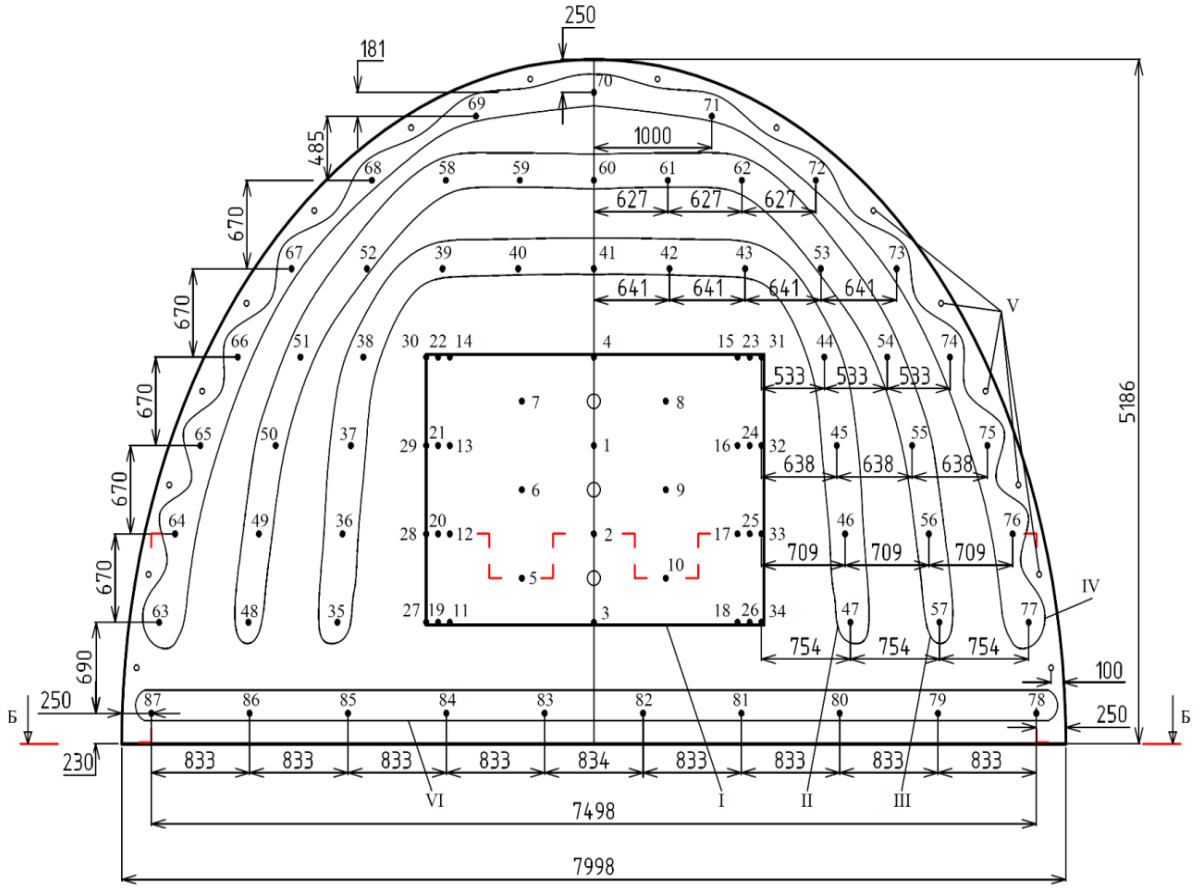


Рисунок 2 – Поперечный разрез по шпурам/Cross-section along the boreholes

Таблица 1 – Характеристики шпуровых зарядов

Очерёдность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					На шпур	На серию
1	1,2	0	2	4200	3,3	6,6
2	3,4	250	2	4200	3,3	6,6
3	5,6,7	500	3	2140	1,6	4,8
4	8,9,10	750	3	2140	1,6	4,8
5	11,12,13,14	1000	4	4322	3,3	13,2
6	15,16,17,18	1250	4	4322	3,3	13,2
7	19,20,21,22	1500	4	4231	2,8	11,2
8	23,24,25,26	1750	4	4231	2,8	11,2
9	27,28,29,30	2000	4	4200	2,6	10,4
10	31,32,33,34	2250	4	4200	2,6	10,4
11	35,36,37,38,39,40	2500	6	4100	2,3	13,8
12	41,42,43,44,45,46,47	3000	7	4100	2,3	16,1
13	48,49, 50,51,52	3500	5	4100	2,1	10,5
14	53,54,55,56,57	4000	5	4100	2,1	10,5
15	58,59,60,61,62	4500	5	4100	2,1	10,5
16	63,64,65,66,67	5000	5	4108	1,6	8
17	73,74,75,76,77	6000	5	4108	1,6	8
18	68,69,70,71,72	7000	5	4108	1,6	8
19	79,80,81,82,83,84,85,86	8000	8	4108	1,8	14,4
20	78,87	9000	2	4110	1,8	3,6
Итого расход ВВ, кг:		На 1 п. м. – 50,4		На 1 м³ – 1,44		Всего 195,8

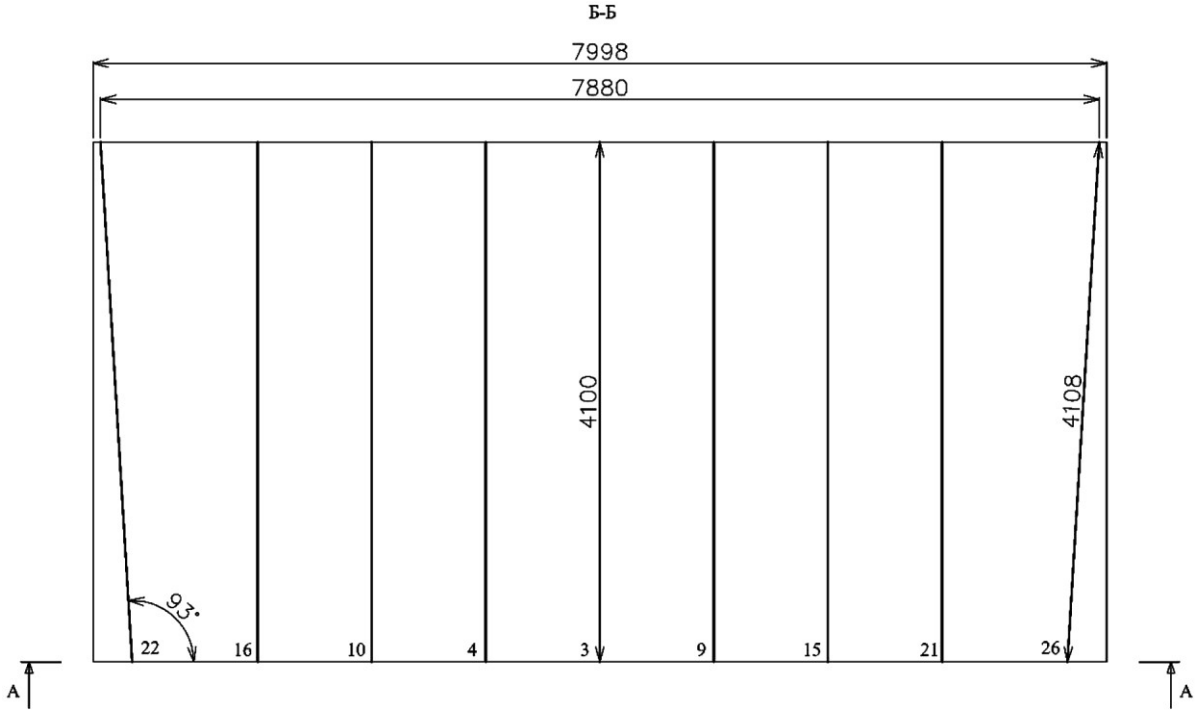


Рисунок 3 – Продольный разрез по шпурам

– полозовые шпуры – III, шпуры 30 и 39 забуриваются под углом 93º относительно горизонтальной и вертикальной оси тоннеля, шпуры с 34 по 38 забуриваются под углом 93º относительно горизонтальной оси тоннеля и 90º относительно вертикальной оси.;

– разгрузочные шпуры – V, L = 4200, выполняют роль дополнительной обнажённой поверхности, располагаются между шпурами II группы.

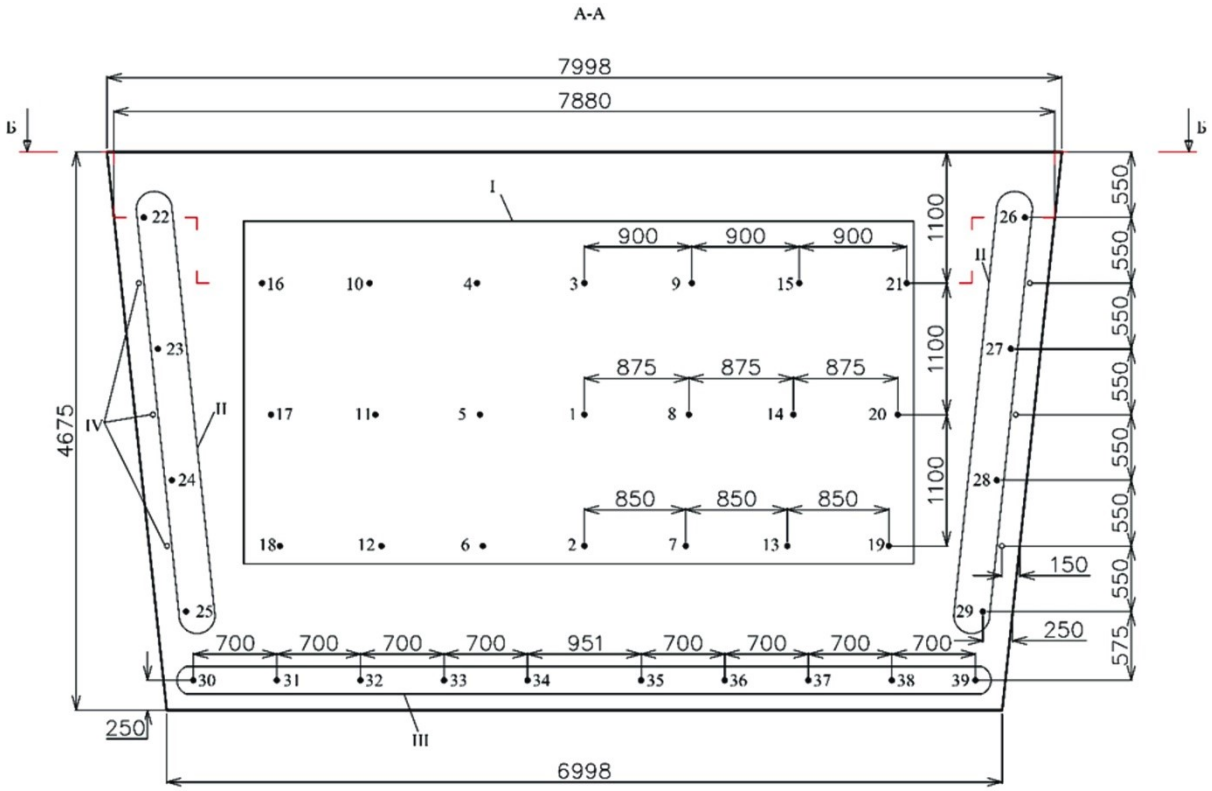


Рисунок 4 – Поперечный разрез по шпурам

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики шпуровых зарядов

Очерёдность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					На шпур	На серию
1	1	0	1	4100	2,2	2,2
2	2, 3	250	2	4100	2,2	4,4
3	4, 5, 6	500	3	4100	2,2	6,6
4	7, 8, 9	750	3	4100	2,2	6,6
5	10, 11, 12	1000	3	4100	2,2	6,6
6	13, 14, 15	1250	3	4100	2,2	6,6
7	16, 17, 18	1500	3	4100	2,2	6,6
8	19, 20, 21	1750	3	4100	2,2	6,6
9	22, 23, 24, 25	2000	4	4108	2,2	8,8
10	26, 27, 28, 29	2250	4	4108	2,2	8,8
11	33, 34, 35, 36	2500	4	4108	2,2	8,8
12	30, 31, 32, 37, 38, 40	3000	6	4108	2,2	13,2
Итого расход ВВ, кг:		На 1 п. м. – 21,45		На 1 м³ – 0,6		Всего 85,8

Время цикла на проходку штроссы составляет 25 часов, средняя скорость проходки – 114 п. м./мес.

Способ сплошного забоя. Применяется в устойчивых грунтах, где риск обрушения породы, при раскрытии выработки на всё сечение минимален. Требует применения специализированной габаритной дорогостоящей техники, позволяющей производить работы на полном сечении выработки, в каждой операции цикла. К плюсам данного способа можно отнести возможность возведения постоянной обделки, на некотором отдалении от забоя, вслед за проходческими работами. На рисунке 5 и рисунке 6 представлена схема бурения шпуров при проходке способом сплошного забоя:

– группа врубовых шпуров и скважин – I;
– первый контур отбойных шпуров – II;
– второй контур отбойных шпуров – III;
– третий контур отбойных шпуров – IV;
– четвёртый контур отбойных шпуров – V;
– пятый контур отбойных шпуров – VI;
– шестой контур отбойных шпуров – VII;
– оконтуривающие шпуры – VIII (устья шпуров располагаются на расстоянии 250 мм от контура выработки);
– полозовые шпуры – IX, предназначены для выравнивания подошвы выработки; шпуры 135 и 144 забуриваются под углом 93° относительно горизонтальной и вертикальной оси тоннеля, шпуры с 136 по 143 забуриваются под углом 93° относительно горизонтальной оси тоннеля и 90° относительно вертикальной оси;
– разгрузочные шпуры – X, L = 5000 мм, выполняют роль дополнительной обнажённой поверхности, располагаются между шпурами VIII группы.

Характеристики шпуровых зарядов приведены в таблице 3.

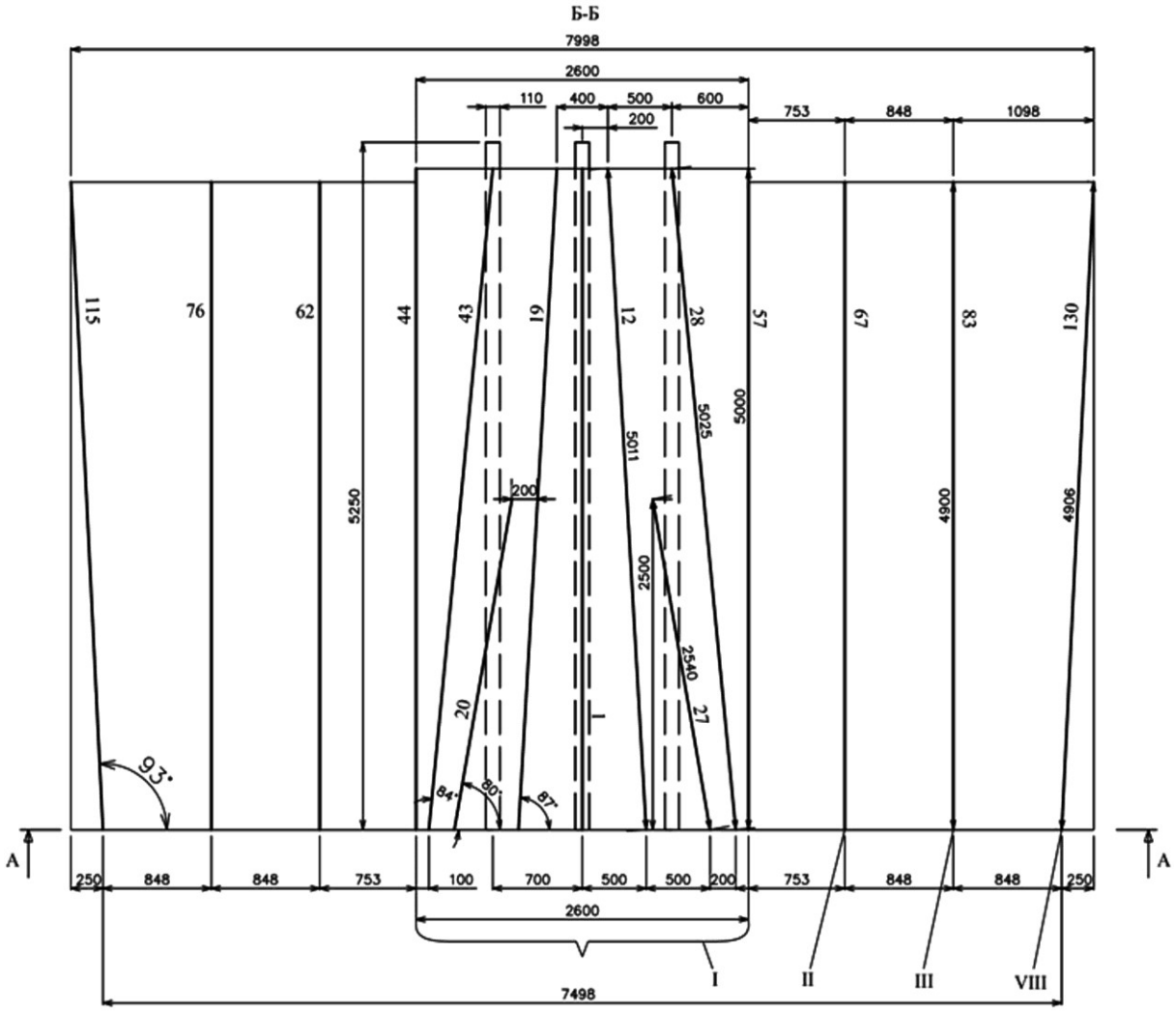


Рисунок 5 – Продольный разрез по шпурам

Время цикла на проходку тоннеля способом сплошного забоя составляет 45 часов, средняя скорость проходки – 72,53 п. м./мес.

Проходка, с применением всех описанных выше схем, велась в породах с коэффициентом крепости по М. М. Протодьяковову f = 7-8 и использованием патронированного Аммонита 6ЖВ в качестве взрывчатого вещества [8], марка детонатора – Искра-Ш [9].

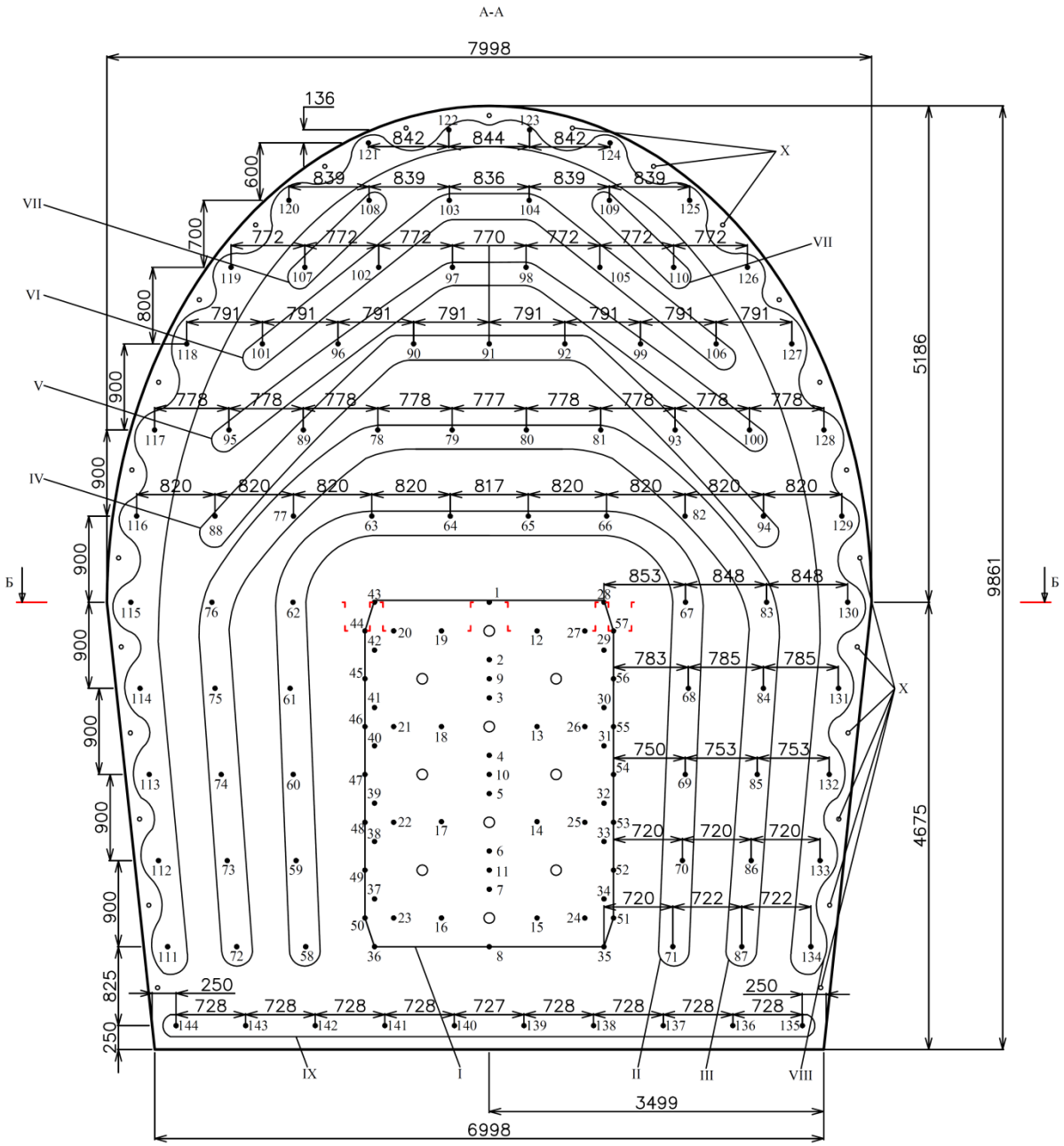


Рисунок 6 – Поперечный разрез по шпурам

Таблица 3 – Характеристики шпуровых зарядов

Очерёдность взрывания	№ шпуров	Интервал замедления, мс	Кол-во шпуров в серии	Длина шпуров, мм	Величина заряда, кг	
					На шпур	На серию
1	2	3	4	5	6	7
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	0	8	5001	3,9	31,2
2	9, 10, 11	150	3	5000	3,9	11,7
3	12, 13, 14, 15	300	4	5011	3,6	14,4
4	16, 17, 18, 19	450	4	5011	3,6	14,4
5	20, 21, 22, 23	600	4	2540	1,8	7,2
6	24, 25, 26, 27	750	4	2540	1,8	7,2
7	28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35	1000	8	5025	3,6	28,8
8	36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43	1250	8	5025	3,6	28,8

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
9	44, 45, 46, 47, 48, 49, 50	1500	7	5000	3,4	23,8
10	51, 52, 53, 54, 55, 56, 57	1750	7	5000	3,4	23,8
11	58, 59, 60, 61, 62, 63, 64	2000	7	4900	3,2	22,4
12	65, 66, 67, 68, 69, 70, 71	2250	7	4900	3,2	22,4
13	72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79	2500	8	4900	3,2	25,6
14	80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87	3000	8	4900	3,2	25,6
15	88, 89, 90, 91, 92, 93, 94	3500	7	4900	3,1	21,7
16	95, 96, 97, 98, 99, 100	4000	6	4900	3,1	18,6
17	101, 102, 103, 104, 105, 106	4500	6	4900	3	18
18	107, 108, 109, 110	5000	5	4900	2,8	14
19	111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118	6000	8	4906	2,4	19,2
20	119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126	7000	8	4906	2,4	19,2
21	127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134	8000	8	4906	2,4	19,2
22	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143	9000	9	4906	2,6	23,4
23	135, 144	10000	2	4908	2,6	5,2
Итого расход ВВ, кг:		На 1 п. м. – 96,38		На 1 м³ – 1,36		Всего – 445,8

Результаты исследования

В результате проведённого анализа выявлено:

1. Суммарная средняя скорость проходки при, применении уступного способа, в пересчёте на проходку полного сечения тоннеля составляет:

$$((96,4 + 114)/2)/2 = 52,6 \text{ п. м./мес.}$$

2. Скорость проходки способом сплошного забоя (полное сечение тоннеля) составляет – 72,53 п. м./мес

3. Способ сплошного забоя позволяет увеличить скорость проходки, по сравнению с уступным способом на:

$$72,53 – 52,6 = 19,93 \text{ п. м./мес.}$$

4. Расход ВВ при проходке уступным способом составляет:

$$50,4 + 21,45 = 71,85 \text{ кг/п. м.}$$

$$(1,44 + 0,6)/2 = 1,02 \text{ кг/м}^3.$$

5. Расход ВВ при способе сплошного забоя составляет:

$$96,38 \text{ кг/п. м.}$$

$$1,36 \text{ кг/м}^3$$

6. Уступный способ позволяет сократить расход ВВ, по сравнению со способом сплошного забоя на:

$$96,38 – 71,85 = 24,53 \text{ кг/п. м.}$$

$$1,36 – 1,02 = 0,34 \text{ кг/м}^3.$$

Заключение

1. Способ сплошного забоя имеет преимущество по суммарной скорости проходки тоннеля на полное сечение, по сравнению с уступным способом, что позволяет

сократить срок строительства объекта и снизить накладные расходы. Также данный способ позволяет параллельно вести работы по возведению постоянной обделки.

2. Уступный способ имеет преимущество по расходу ВВ, по сравнению со способом сплошного забоя, что позволяет снизить себестоимость проходки. Вместе с этим, после проходки калотты значительно улучшается вентиляция выработки за счёт появления естественной тяги и появляется возможность разработки штроссы несколькими фронтами работ.

Список литературы:

1. Гутник В.Ф. Анализ применения горного способа при сооружении подземных транспортных коммуникаций // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2025. – № 2 (168). – С. 131–143. – URL : https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-2-131-143

2. Безродный К.П. Горно-экологический мониторинг при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей Северного Кавказа / К.П. Безродный, М.О. Лебедев // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 5(24). – С. 21. – EDN TKELJV

3. Обзор существующих методик расчёта параметров зон разрушения породного массива // С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, А.К. Кирсанов [и др.] / Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – URL : https://science-education.ru/ru/article/view?id = 19369 (дата обращения: 15.09.2026).

4. Расчёт конструкции прямого призматического вруба / С.А. Вохмин, Г.С. Курчин, А.К. Кирсанов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – URL : https://science-education.ru/ru/article/view?id = 17267 (дата обращения: 15.09.2026).

5. Курчин Г.С. Методика расчета паспорта буровзрывных работ при проходке горизонтальных горных выработок / Г.С. Курчин, А.К. Кирсанов, Д.А. Грибанова // Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы I-й Междунар. науч. конф. (г. Казань, май 2015 г.). – Казань : Бук, 2015. – С. 19–25. – URL : https://moluch.ru/conf/earth/archive/161/7899

6. Ремизов А.В. Анализ эффективности методов проектирования паспорта буровзрывных работ при проходке выработок / А.В. Ремизов, А.Ю. Прокопов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 335–343. – EDN PMIHJZ

7. Повышение эффективности буровзрывных работ при проходке горных выработок большого сечения в условиях многолетней мерзлоты / В.Ф. Гутник, А.Н. Анушенков, С.А. Вохмин [и др.] // Маркшейдерское дело и недропользование. –2025. – № 25(5):00-00. – URL : https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-26-34

8. Перечень рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов, приборов взрывания и контроля/Межведомственный совет по взрывному делу при Госгортехнадзоре СССР). – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1987. – 60 с.

9. Современные средства инициирования АО "НМЗ "ИСКРА" / С.А. Кондратьев, С.А. Поздняков, А.С. Иванов, К.А. Вандакуров // Взрывное дело. – 2019. – № 123–80. – С. 136-143. – EDN SNVXKZ

УДК 528.48

ПРОСТРАНСТВЕННО-ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ LIDAR-ОБЛАКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Дьяченко Роман Александрович
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
доцент, доктор технических наук,.
emessage@rambler.ru

Ярутин Сергей Алексеевич
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
аспирант
yarutinsa@yandex.ru

Афонин Дмитрий Геннадьевич
Военная академия защиты информации
доцент кафедры
llyx@mail.ru

Аннотация. Исследована пространственно-геометрическая неоднородность LiDAR-облаков промышленных объектов на уровне отдельных сегментов. Для 450 сегментов из 50 PLY-файлов оценены количество и плотность точек, линейность, плоскостность, сферичность, кривизна и разброс нормалей. Установлено, что число точек изменяется от 80 до 3317, плотность – от 27,408 до 3619,495 в нормализованном пространстве, а геометрические признаки охватывают широкие диапазоны. Показана необходимость локального анализа структуры облака перед последующей автоматизированной обработкой.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, LiDAR, облако точек, пространственные данные, геометрические признаки, плотность точек.

Наземное лазерное сканирование применяется для получения высокоплотных пространственных данных о зданиях, сооружениях и технологическом оборудовании [1]. Для промышленных объектов характерны сложная геометрия, взаимное экранирование элементов и значительная неоднородность плотности точек. Эффективность съемки определяется не только параметрами сканера, но и конфигурацией размещения станций и маршрутом проведения работ. Ранее исследовались выбор параметров дискретизации [2], построение маршрутов сканирования [3] и оптимизация перемещения лазерных сканирующих систем при мониторинге промышленных объектов [4]. После получения облака возникает самостоятельная задача количественного описания его внутренней структуры.

Использование только общего количества точек или средней плотности недостаточно для промышленной сцены. Два участка с сопоставимой плотностью могут соответствовать плоскости, трубопроводу, сферическому элементу либо сложному узлу оборудования. Расстояние до станции, угол падения лазерного луча и взаимное экранирование дополнительно формируют локальные различия пространственного распределения измерений. Поэтому целесообразно переходить от интегрального описания всего облака к анализу отдельных сегментов.

Целью исследования является количественная оценка пространственно-геометрической неоднородности LiDAR-облаков промышленных объектов по совокупности характеристик сегментов. Экспериментальная выборка включает 50 исходных PLY-файлов и 450 сегментов: 201 сегмент сложной геометрии, 135 сферических и 114 трубчатых. Использованы контролируемые синтетические LiDAR-данные, позволяющие сохранять принадлежность точек отдельным элементам сцены.

Для каждого сегмента выполнялись центрирование и нормализация по максимальному расстоянию точки от центра. Затем вычислялись количество точек N, плотность ρ, пространственная протяженность, согласованность нормалей и признаки на основе собственных значений ковариационной матрицы координат [5, 6]. При $\lambda1 \geq \lambda2 \geq \lambda3$ определялись линейность $L = (\lambda1-\lambda2)/\lambda1$, плоскостность $P = (\lambda2-\lambda3)/\lambda1$, сферичность $S = \lambda3/\lambda1$ и кривизна $C = \lambda3/(\lambda1+\lambda2+\lambda3)$. Плотность рассчитывалась как отношение количества точек к объему ограничивающего параллелепипеда нормализованного сегмента.

Анализ показал выраженную неоднородность данных. Количество точек изменяется от 80 до 3317 при медиане 612,5, то есть крайние значения различаются более чем в 41 раз. Плотность изменяется от 27,408 до 3619,495 при медиане 338,744, что соответствует различию примерно в 132 раза. Следовательно, средняя плотность всего облака не может служить достаточной характеристикой локальных условий представления поверхности.

Значительные различия выявлены и для геометрических признаков. Линейность изменяется от 0,0289 до 0,9491 при медиане 0,4955, плоскостность – от 0,0081 до 0,8469 при медиане 0,2882, сферичность – от 0,0042 до 0,7380 при медиане 0,1673, кривизна – от 0,0039 до 0,2835 при медиане 0,0993. Разброс нормалей изменяется от 0,0069 до 0,2330. Такие интервалы свидетельствуют о наличии сегментов с принципиально различным характером пространственного распределения точек.

Полученные результаты показывают, что высокая плотность сама по себе не свидетельствует о геометрической однородности участка. Сегменты с близким числом измерений могут существенно различаться по соотношению главных направлений распределения точек и ориентации нормалей. Поэтому применение одинаковых параметров фильтрации, сегментации и геометрической обработки ко всем участкам промышленного облака не учитывает локальную структуру данных.

Ограничением исследования является использование преимущественно контролируемых синтетических LiDAR-данных. Это обеспечивает воспроизводимость анализа, однако полученные диапазоны необходимо дополнительно проверить на реальных данных наземного лазерного сканирования. Перспективным направлением является сопоставление статистики синтетических и натурных облаков и определение признаков, устойчивых к изменению условий съемки.

Таким образом, на выборке из 450 LiDAR-сегментов установлена выраженная пространственно-геометрическая неоднородность промышленных облаков точек. Количество точек различается более чем в 41 раз, плотность – приблизительно в 132 раза, а геометрические признаки охватывают широкие диапазоны. Описание облака только средней плотностью или общим числом измерений недостаточно. Совместное использование статистических и геометрических характеристик позволяет более полно описывать локальную структуру пространственных данных и может применяться при подготовке LiDAR-облаков к последующей автоматизированной обработке и трехмерному моделированию.

Список литературы:

1. Vosselman G., Maas H.-G., eds. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. – Dunbeath: Whittles Publishing, 2010. – 318 p.

2. Мультикритериальный подход к выбору параметров дискретизации для оптимального размещения станций наземного лазерного сканера / Д.А. Гура, Р.А. Дьяченко, С.А. Ярутин [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2025. – № 211. – С. 458–474. – DOI: 10.21515/1990-4665-211-038.

3. Методика построения оптимального маршрута при проведении работ по сканированию территории / Д.А. Гура, Р.А. Дьяченко, С.А. Ярутин [и др.] // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30. – № 5. – С. 89–100. – DOI: 10.33764/2411-1759-2025-30-5-89-100.

4. Оптимизация маршрутов перемещения лазерных сканирующих систем для мониторинга состояния конструкций и оборудования промышленного объекта / Р.А. Дьяченко, Д.А. Гура, С.А. Ярутин [и др.] // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – 2026. – № 2. – С. 40–46. – DOI: 10.33764/2687-041X-2026-2-40-46.

5. Dimensionality Based Scale Selection in 3D LiDAR Point Clouds / J. Demantké, C. Mallet, N. David [et al.] // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2011. – Vol. XXXVIII-5/W12. – P. 97–102. – DOI : 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-97-2011.

6. Semantic Point Cloud Interpretation Based on Optimal Neighborhoods, Relevant Features and Efficient Classifiers / M. Weinmann, B. Jutzi, S. Hinz [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 105. – P. 286–304. – DOI : 10.1016/j.isprsjprs.2015.01.016.

УДК 622

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ ИЗВЛЕКАЕМЫХ ЗАПАСОВ НЕФТИ НА ДЛИТЕЛЬНЫХ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ АПШЕРОНА

Каграманов К.Н. — **Института Нефти и Газа Министерства Образования и Науки Азербайджанской Республики**
главный научный сотрудник
gahraman@inbox.ru

Бабаева М.Т. — **Азербайджанский Университет Нефти и Промышленности**
ст. преподаватель

Гюнай Вагиф кызы — **Научно-технический и проектный институт Нефти и Газа SOCAR**
инженер

Аннотация. В настоящей работе проведено изучение закономерности снижения добычи из нефтяной залежи (месторождения) по длительно разрабатываемым месторождениям с учетом структуры запасов и существующих условий их выработки с целью оценки остаточных извлекаемых запасов нефти (ОИЗН).

Ключевые слова: снижение добычи из нефтяной залежи, длительно разрабатываемые месторождения, структура запасов, оценка остаточных извлекаемых запасов нефти.

С целью оценки остаточных извлекаемых запасов нефти (ОИЗН) проведено изучение закономерности снижения добычи из нефтяной залежи (месторождения) по длительно разрабатываемым месторождениям с учетом структуры запасов и существующих условий их выработки.

Как показала практика подсчета и пересчета запасов по длительно разрабатываемым месторождениям, для оценки ОИЗН, наиболее надежной является следующая экспоненциальная кривая («дебит–время» – «дебитнакопленная добыча):

$$q_{1} = q_{2}^{e-Dt}, \quad (1)$$

$$N_{1} = \frac{q_{1}-q_{2}}{D}. \quad (2)$$

В случае $q_1 = q_3$ остаточный извлекаемый запас нефти N_2 будет равен

$$N_{2} = \frac{q_{2}-q_{3}}{D}, \quad (3)$$

где q_1, N_1 – соответственно текущая и накопленная добыча нефти за период эксплуатации, годы; q_2,q_3- начальный и конечный дебиты, т/г;

$$D = \frac{\ln(q_{2}/q1)}{t}, \quad (4)$$

где t – показатель, характеризующий процент падения годовой добычи нефти.

При этом начальный дебит по месторождению вводится в расчет в качестве исходного данного. Конечный (предельно рентабельный) дебит определяется с помощью экономических расчетов с учетом цены на нефт, эксплуатационных затрат и т.д. и вводится в формулу (2) в качестве исходного параметра. Коэффициент *D* определяется статистически по данным истории разработки месторождения путем ретроспективного анализа.

Продолжительность эксплуатации *t*, представляющая собой промежуток времени между q_2 *и* q_3, используется в качестве исходного данного и определяется по выражению

$$t = \frac{\ln(q_{2}/q3)}{Dt}. \quad (5)$$

Предлагаемая математическая модель в основном сохраняет прошлые условия работы залежи на будущее и поэтому ее можно использовать для прогноза на определенный период времени. Однако, по длительно разрабатываемым месторождениям, находящимся в поздней стадии эксплуатации, дебиты скважин крайне низкие (меньше 1 т/сут), но, если учесть ещё разбуривание дополнительных скважин, это значительно уменьшит ошибку данной модели при неизменных коэффициентах. При этом также следует принять во внимание, что значительное количество новых скважин фактически играют роль скважин-дублеров. Предложенный метод апробирован на примере одного из старых многопластовых место рождений Азербайджана Биби-Эйбат. Ввиду, того что это месторождение разрабатывается в основном на естественном пластовом режиме на истощение и низком охвате залежи скважинами и по нему в ближайшей перспективе вряд ли будут применять МНП в полном объеме по известным причинам (в том числе отсутствие скважин ограничивает применение МПН), а применение геолого-технических мероприятий входит в разряд текущей работы над общим фондом скважин, нами в расчетах был использован только ввод новых скважин, способствующих в основном повышению добывных возможностей ОИЗН.

Степень использования начальных извлекаемых запасов нефти (НИЗН) составляет 95 %, при этом 24 % ОИЗН приходится на активные запасы, обеспеченность которых составляет 18 лет. Основная часть запасов относится к трудноизвлекаемым (низкопроницаемые и обводненные) и на эту часть при существующей технологии разработки с темпами реализации 1–3 % от ОИЗ потребуется на 50–80 лет.

Необходимо отметить, что обеспеченность запасами в целом во времени растет за счет низкого темпа извлечения запасов (средний темп реализации запасов составляет 1,2), при этом рост обеспеченности запасами обусловлен не приростом, а тем, что одна активная часть интенсивно вырабатывается и по ней обеспеченность резко снижается, а доля трудноизвлекаемых со временем возрастает. Основными причинами снижения добычи нефти на месторождении являются технологическая (обусловленная выработкой и обводненностью) и природная (низкие дебиты), третья причина – объем бурения (число вводимых скважин) и средняя продолжительность добывающих экс-скважин – управляема в ограниченном пределе.

В данном случае величина ОИЗН, вычисленная по модели (3) на основе исследования динамики добычи нефти в целом по месторождению, составила 6 усл.ед. Исследование надежности величины ОИЗН по предложенной модели проводится путем сопоставительного анализа. С этой целью выбирается модель с наименьшей средней ошибкой, которая соответствует на кривой добычи нефти интервалу 1957– 1966 гг. и проводится сопоставление расчетных значений годовых отборов нефти с их последующей фактической добычей за период 1967–1992 гг. (таблица 1).

Таблица 1

интервал времени, годы	расхождение фактической добычи от расчетной, %	снижение добычи добычи нефти, %	
		фактической	расчетной
1958 – 1962	+0,4	- 7,9	23
1963 – 1967	-19,0	42,0	23
1968 – 1972	+7,5	24,9	23
1973 – 1977	+11,0	21,3	23
1978 – 1982	+8,5	15,4	23
1983 – 1987	-1,1	31,3	23
1988 – 1992	+11,0	27.1	23
1992 – 2000	+10.5	28	22
2001 – 2010	+8,4	17	15
2011 – 2020	+17	12	10
2021 – 2025	+14	10	11

Сопоставление расчетных значений с их фактической добычей за период разработки месторождения показало, что по истечении 20 лет эксплуатации расхождение в расчетных и фактических величинах добычи нефти составляло для периода 1978–1982 гг. 8.5 %; 1983–1987 гг. 1.1 %; и 1988–1992 гг. 11 %, 1992–2000 гг. 10,5 %, 2001–

2010 гг 8,4 %, 2010–2025 гг 14 % что свидетельствует об относительно высокой достоверности результатов, вычисленных по модели (1).

Следует отметить, что возросшее в последний период (2000–2025 гг.) расхождение объясняется резким снижением ввода новых скважин из бурения. Сопоставление изменения удельных дренируемых запасов нефти (величина ОИЗ, приходящаяся на одну скважину) с удельным предельным запасов нефти во времени (минимальное значение ОИЗН на одну скважину, где оправдано бурение новой скважины) показало (рисунок 1) что почти через 10–15 лет эти кривые существенно сближаются, т.е. если условно принять, что экономические условия останутся без изменения, то после 2025 г.

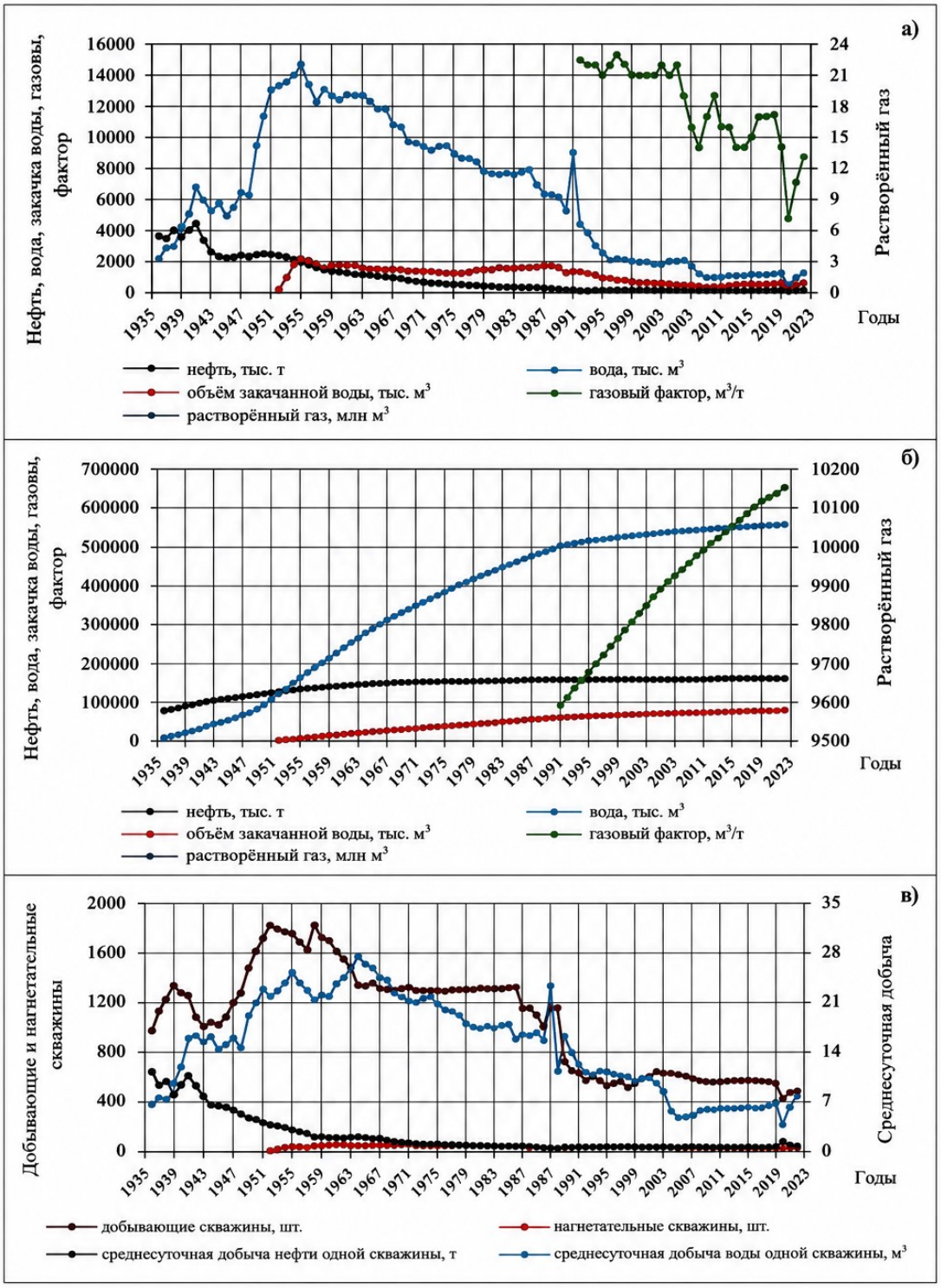


Рисунок 1 – Динамика технологических показателей разработки месторождения Биби-Эйбат [3]: а) кривые годовой добычи. б) кривые накопленной добычи, и) данныу по скважинам

Ограниченная продолжительность «жизни» добывающих скважин, тенденция уменьшения их числа на продуктивной площади залежи из-за относительно низкого темпа ввода в эксплуатацию новых скважин ведет к потерям некоторой части ИЗН. При этом частичная или полная потеря запасов нефти, приходящаяся на долю выбывающих скважин, связана в основном с неоднородностью, в том числе прерывистостью продуктивных пластов, значительной неравномерностью вытеснения нефти на отдельных участках залежи и т.д. Оценку потерь ИЗН можно произвести двумя путями:

– по анализу коэффициента снижения добычи нефти из залежи (месторождения), начальной и предельной добыче;

– по количеству добывающих скважин и средней продолжительности их эксплуатации, т.е. по анализу интенсивности разработки залежи.

При первом подходе при выборе модели оценки ОИЗН по месторождению было выполнено сопоставление расчетных и фактических значений годовой добычи нефти, которые показало, что прогноз по рекомендуемой модели в основном дает удовлетворительные результаты.

Рассмотрим вариант разработки месторождения, когда вместо вышедших из строя скважин бурят новые скважины.

С практической точки-зрения новые скважины (в том числе скважины дублеры) необходимо бурить в случае, когда доказано, что оставшаяся часть ИЗН достаточно велика и экономически целесообразно бурение новых скважин. При этом каждая вышедшая из строя скважина, вместо которой можно бурить новую, должна в сумме отобрать нефти не более $N_3^{/}$. Тогда с учетом минимально оставшихся ИЗН ($N_0 - N_0^{/}$) будет оправдано бурение новых скважин. С некоторой условностью в целом по рассматриваемому месторождению принято $N_0^{/} = 0.65N_1$ (на нефтяных месторождениях Урало-Поволжья и Западной Сибири $N_0^{/} = 0.8N_0$) В этом случае в соответствии с результатом, полученным в работе (2), расчетное значение извлекаемых запасов будет равно

$$N_3 = N_0 \frac{1+0{,}65\frac{1}{JT_4}}{1+\frac{1}{JT_4}}. \qquad (6)$$

С учетом формулы (6), при различном числе ввода новых скважин (в данном случае интенсивность разработки месторождений прямо связана с числом вводимых новых скважин, при этом условно принято T = const), получим следующие результаты (n_0 -основной фонд скважин – 1200; $n_0^{/}$ – число новых скважин):

$\frac{qT}{N} = JT$	 1,0	1,2	1,5
n_0	 1200	1200	1200
$n_0^{/}$	 600	1200	2000
$\frac{N}{N_0}$	 0,80	0,85	0,88

При базовом варианте разработки месторождения, т.е. при вводе в эксплуатацию ежегодно в среднем 10 новых добывающих скважин, возможно извлечь лишь 70 % от ОИЗН, т.е. $0{,}7N_3$. Как видно, если в дальнейшем число новых скважин увеличить 2,4 и 6 раз, т.е., если число новых скважин составит соответственно 600, 1200, 2000, то соответственно суммарная добыча нефти в конце разработки залежи в той же мере будет приближаться к возможным значениям ИЗН.

Из вышеизложенного следует, что немаловажную роль играет темп ввода новых скважин в эксплуатацию, так как при замедленном темпе их ввода в разработку со временем для извлечения одного и того же объема ОИЗН по залежи потребуется вводить большее число новых добывающих скважин. Это обстоятельство объясняется тем, что при разработке залежей, в основном на естественном режиме, истощения пластовой энергии происходит быстрее, чем истощение ИЗН и в результате отмечается ухудшение структуры запасов и переход их в категории трудноизвлекаемых.

Установленная взаимосвязь между величиной ОИЗН и ее добывными возможностями, выраженная в динамике, показала, что на длительно разрабатываемых месторождениях Азербайджана на базовых вариантах их разработки для извлечения единицы объема ОИЗН со временем потребуется все больше и больше скважин. При этом результаты сопоставительного анализа показали, что наличие редких сеток размещения скважин приводит к значительным потерям ИЗН.

Приведенные в работе методические приемы определения ОИЗН и их добывных возможностей на основе модельных исследований позволили выявить текущее состояние ОИЗН на рассматриваемом месторождении и степень их выработанности, что имеет практическое и теоретическое значение при выборе эффективной системы их доразработки.

Список литературы:

1. Багаров Т.Ю., Велиева Э.Б. Геолого-статистический анализ результатов переоценки нефтяных залежей Абшеронского полуострова. – Баку : Элм, 1991. – 144 с
2. Лысенко В.Д. Проектирование разработки нефтяных месторождений. – М. : Недра, 1987. – 247 с.
3. Салманов А.М., Магеррамов Б.И., Гарагёзов Э.Ш., Керимов Н.С. Геология и показатели разработки нефтегазовых месторождений на территории суши Азербайджана. – Баку : Тип. «MSU» ММС, 2023. – 628 с.

УДК 622

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЕЗА ПРОДУКТИВНОЙ ТОЛЩИ ЮЖНО-КАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ СЕКВЕНС-СТРАТИГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Каграманов К.Н. — **Института Нефти и Газа Министерства Образования и Науки Азербайджанской Республики**
главный научный сотрудник
gahraman@inbox.ru

Бабаева М.Т. — **Азербайджанский Университет Нефти и Промышленности**
ст. преподаватель

Гюнай Вагиф кызы — **Научно-технический и проектный институт Нефти и Газа SOCAR**
инженер

Аннотация. С Продуктивной Толщей (ПТ) нижнеплиоценовых отложений связаны крупнейшие место скопления углеводородов (УВ) Азербайджана, в частности, Южно-Каспийской впадины. Его фациальный набор представлен песчано-глинистыми породами более 6500 м мощности цикличного строения.

С начала промышленной разработки в Азербайджане по настоящее время на горизонты ПТ пробурено свыше 50 тыс. скважин различного назначения и получено около 2,5 млрд. тонн углеводородов.

Однако, несмотря на более чем полуторавековую историю изучения ПТ, вопросы о причинах сформировавших ее седиментационных процессов, являющихся неотъемлемой частью всякого значительного литологического исследования, не получили до сих пор однозначного ответа.

Ключевые слова: секвенс-стратиграфия, Продуктивная Толща, литологического исследования, эвстазия, эпейрогения.

Традиционно большинством геологов Азербайджана ПТ подразделяется на два отдела: верхний, состоящий из сураханской, сабунчинской, балаханской свит и свиты "фасиля" и нижний, включающий надкирмакинскую глинистую (НКГ), надкирмакинскую песчанистую (НКП), кирмакинскую (КС), подкирмакинскую (ПК) и калинскую (КаС) свиты. Свиты в свою очередь подразделяются на горизонты и продуктивные объекты (резервуары нефти и газа). В полном разрезе ПТ традиционно выделяется семь крупных литологических ритмов. Эта стратиграфическая схема отражает взгляды многих ученых-геологов на представления о ритмичности строения разреза ПТ.

Ниже пойдет речь об отложениях ПТ «абшеронского» типа, сложенных, в основном, терригенным материалом, принесённым палео-Волгой с Русской платформы.

Литологический состав и распределение осадков, накопившихся в Южно-Каспийской впадине с мезозойского по настоящее время, свидетельствуют о том, что в мезозое в Южном Каспии существовали океанические условия – терраса между желобом и дугой, на что указывает 10 км толща карбонатных осадков [1], а в кайнозое терраса подвергалась деструкции и в желобе накапливались только терригенные образования

Одной из важнейших черт ПТ является ритмичность ее осадков по всей области распространения. Она обнаруживается не только в гранулометрическом составе пород, но и в минералогической ассоциации слагающих свит и горизонтов (рисунок 1).

Одним из доказательств дельтовое происхождение ПТ в ЮКВ является косая слоистость. Исходя из гипотезы дельтового происхождения ПТ, [2] по данным замеров косой слоистости, проводимых на Апшероне и в Гобустане, автор в своих трудах приходит к выводу о «возникновении их в условиях замкнутого бассейна», и подтверждает направление сноса осадочного материала с севера на юг в области Апшеронского полуострова и с запада на восток в Гобустане».

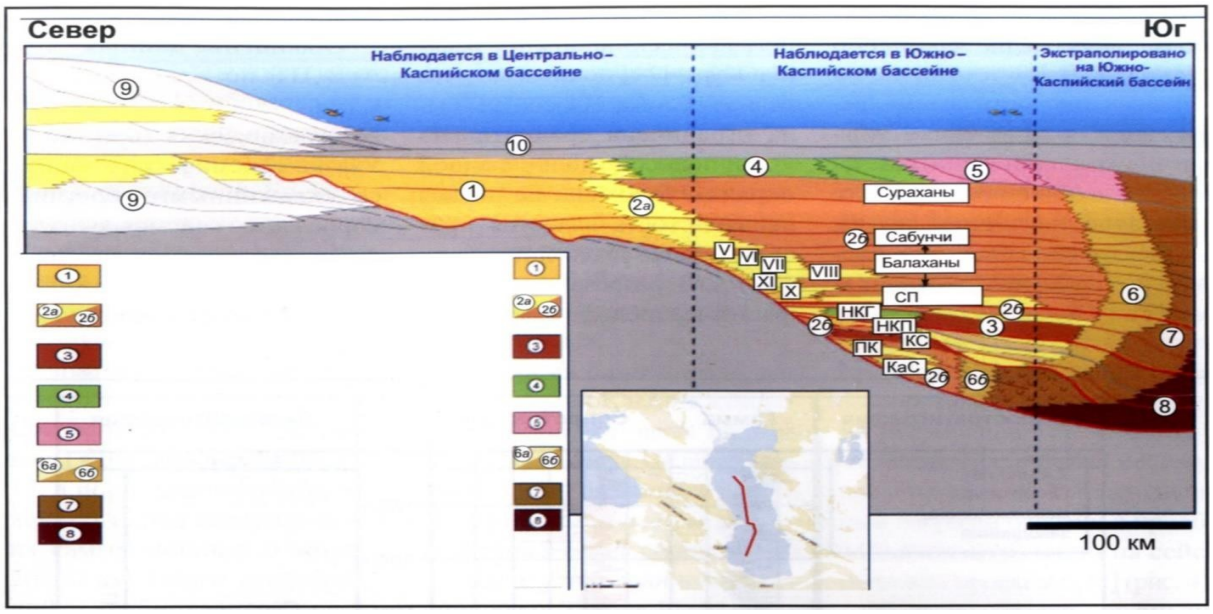


Рисунок 1 – Региональный геологический профиль, обобщающий стратиграфию в масштабах бассейна: 1 – ассоциация речных осадков, представлена интервалом с высоким коэффициентом песчанистости которые присутствуют, в основном на окраинах бассейна на суше в Азербайджане и Туркменистане; 2 – ассоциация речных и дельтовых осадков которые представлена интервалами со средним (2а) и низким (2б) коэффициентом песчанистости; 3 – ассоциация обводнённых озёрных глинистых осадков. Регионально протяжённые глины с чередованием слоев песка от минимальной мощности до полного отсутствия, характеризующиеся высокоамплитудными параллельными отражающими горизонтами. Они играют роль основных покрышек в бассейне; 4 – ассоциация мелководных фаций. Сейсмически эта фация характеризуется высокоамплитудными параллельными отражающими горизонтами; 5 – ассоциация солевых отложений. Последовательность пластов глин, перемежающихся ангидритами, гипсом и галитом; 6 – ассоциация фаций шельфовой окраины; 7 – ассоциация фаций склонов; 8 – ассоциация глубоководных озёрных фаций. Зарегистрированы только в южной части бассейна, где они представлены проградирующей клиноформой сейсмической геометрией [3]

Учитывая вышеуказанное, процесс образования ПТ представляется, в нижеследующем порядке:

– поставка кварцевого материала с дистен-стаеролитовой ассоциацией с Русской платформы;

– частая смена физико-географической обстановки в зоне седиментации;

– существенная разница минералогического состава песчаных и глинистых отложений;

– участие селевых потоков в формировании отдельных горизонтов; – падение уровня Каспия.

Впервые такая схема была предложена В.П. Батуриным в 30-е годы прошлого столетия. В настоящее время она подтверждена многочисленными научными исследованиями.

Породы ПТ в ЮКВ представлены в "абшеронской фации", для коллекторов которой характерно высокое содержание кварцевых песков с высокими фильтрационно-емкостными свойствами.

Моделирование осадочного комплекса ПТ требует детального изучения литологического состава, тонкой пластовой корреляции, тщательного обоснования и четкого сопоставления границ осадочных тел – слоев, пачек, толщ, свит.

Одним из современных методов изучения является секвенс-стратиграфический. (СС).

Этот метод наиболее эффективно применяется для детальных стратиграфических, литолого-фациальных и палеогеографических исследований в пределах шельфов. В нефтяной геологии он активно используется при прогнозе распространения и

качества продуктивных толщ, а также при поисках литологически экранированных углеводородных залежей.

Секвенс образуется в результате заполнения осадками дна бассейна за один цикл колебания относительного (в пределах данного бассейна) уровня моря. Причина этого колебания заключается в трех главных факторах: *эвстазии,* вертикальных тектонических движениях дна бассейна (*эпейрогении*) и *количестве поступающего* осадочного материала [4].

Секвенсы состоят из трех системных трактов: *Тракт низкого уровня моря* (проградация или регрессия, т. е море отступает). Трансгрессивный системный тракт (ретроградация или трансгрессия, т. е море наступает). Тракт высокого уровня (аггредация относительно стабильное состояние уровня моря). (рис.2)



Рисунок 2 – Схема, иллюстрирующая распределение системных трактов в пределах элементарного экстатического цикла

Образование секвенсов связано с циклами эвстазии третьего и иногда с циклами четвертого порядка. Продолжительность циклов третьего порядка оценивается в 1–5 млн. лет, четвертого – 0,25–1 млн. лет. Таким образом, секвенс формируется в среднем за 2-3 млн. лет, время которому соответствует образование ПТ на рассматриваемом регионе.

Литологическое строение разрезов и их мощность зависят от амплитуды эвстетических колебаний, от её интенсивности и направления, а также от эпейрогенетических колебаний. Разрез отложений ЮКВ представляет собой результат совместного действия глобальной эвстазии и региональной эпейрогении [5].

В разрезе ПТ можно выделить эвстатические циклы разного ранга – от элементарных (системных трактов), до региональных (всего выделяется 7 ритмов) где в ранге хроностратонов выделяют 7 секвенсов с начала понта до конца акчакыла. (5–7 млн. лет назад).

Применяя вышеуказанные способы секвентрирования сводного разреза ПТ ЮКВ, следует руководствоваться нижеследующим:

Известно, что формирование большинства антиклинальных структур в ЮКВ происходило в условиях постоянного непрерывно-прерывистого прогибания дна бассейна, что выражается, с одной стороны в значительной мощности осадков, с другой – в вариации мощностей отдельных литолого-стратиграфических единиц, связанных с конседиментационным развитием структур. [6]

Бассейн Продуктивной Толщи унаследовал от понтического структурный план, в котором обозначались будущие антиклинальные складки. Некоторые из этих участков в калинском и отчасти подкирмакинском бассейнах представляли собой островки и отмели.

На структурах Джануб, Чилов адасы мощность Калинской свиты (КаС) доходит до 340 м. Из это можно сделать вывод о том, что в калинской век структуры Джануб, Чилов адасы – занимали более низкое гипсометрические положения, чем б. Дарвина, Пираллахи адасы.

Мощность отложений нижнего отдела ПТ закономерно возрастают от свода к крыльям и с северо-запада на юго-восток в направлении регионального погружения складчатости. Залегающая в основании продуктивной толщи калинская свита отлага-

лась на неровной поверхности понтических отложений. Свод структуры б.Дарвина возвышался над уровнем бассейна даже во время отложения осадков КаС, Подкирмакинской (ПК) и низов Кирмакинской (КС).

На структуре Нефт Дашлары КаС в основном, сложена глинистыми породами, чередующимися с пропластками алевритов и песков с примесью мелкого гравия, а также с прослоями крепкого сцементированного песка.

Как было ранее отмечено ранее, ко времени образования свиты ПК структура б. Дарвина возвышалась над уровнем моря. Минимальная мощность ПК свиты на о.Пираллахи отмечена в присводовой, северо-восточной, части северной складки. Здесь мощность ПК свиты доходит до 45 м. В пределах поднятия Гюргян-море мощность ПК свиты колеблется в пределах 55–120 м.

Отложения осадков свиты ПК на структуре б.Абшеронская отсутствует только на своде.

Мощность КС на площади Гюргян-дениз местами доходит до 280 м, а в направлении Джануб меняется до 230-250 м. Таким образом, во всей антиклинальной зоне б. Дарвина – Джануб существовали морские условия на фоне общего опускания дна бассейна с различной интенсивностью роста локальных структур.

Во время отложения осадков балаханской свиты продолжалось осадконакопление и дальнейший рост антиклиналей с нарастанием мощности отложений от свода к крыльям. В период сабунчинского и сураханского веков снизился темп развития складок.

В позднеплиоценовое время (акчагыл, абшерон) и в начале четвертичного периода продолжается трансгрессия, начавшаяся в век ПТ. Состав акчагыльских осадков в основном глинистый, мощность их составляет 110–120 м. Абшеронские отложения представлены глинами, песками и песчаниками, песчаниками-известняками, известняками ракушечниками. Они повторяют или почти повторяют строение акчагыльских отложений.

На севере, северо-востоке в пределах Северо-Абшеронской зоны поднятий верхнеплиоценовые отложения трансгрессивно залегают на отложениях ПТ.

В четвертичное время продолжилось интенсивное прогибания Южного Каспия. Темпы погружения составили 2–3 км/млн. лет. При этом Абшероно-Прибалаханская зона поднятий оставалось относительно приподнятым участком ЮКВ.

В целом толщина четвертичных отложений увеличивается с северо-запада на юговосток, и от сводов поднятий к смежным синклиналям.

Таким образом, в конце плиоцена – начале антропогена происходил интенсивный рост структур в тектонических зонах б. Дарвина-Гюргян-дениз и Хали-Нефт Дашлары.

Северо-Абшеронская группа поднятий (восточнее структуры б. Абшеронская) испытывала опускание, вследствие чего четвертичные отложения здесь имеют значительную мощность. Темпы развития структур Абшеронского архипелага неравномерны. Если в начале века ПТ северо-восточные, прибортовые участки Пираллахи Келькорьского синклинория (Северо-Абшеронские группа поднятий) испытали подъем, то в конце плиоценового – начале антропогенового времени юго-западный борт (АбшероноПрибалаханской зоны поднятий) этого синклинория испытал горизонтальные напряжения, которые привели к образованию надвигов на структурах Гюргян-дениз, Чилов адасы и др. [6]

Таким образом, палео-Волга, наряду с другими реками (палео-Урал, палео-Узбой и др.) сыграла важную роль в формировании осадков нижнего плиоцена в ЮКВ, литофациальный набор которых обеспечил высокую вместимость коллекторов углеводородами.

Не менее важна СС для региональных исследований, так как она позволяет восстанавливать структурное положение и взаимоотношение осадочных толщ, их внутреннее строение в пространстве и во времени. Основными факторами, контролирующими эти процессы, могут быть тектоника, морфология бассейна осадконакопления, скорость и объем поступающего в него осадочного материала. В рамках регионального применения роль СС оказывается связанной с восстановлением литологических особенностей геологических тел, скрытых от непосредственного наблюдения. По-

добного типа реконструкции особенно важны в нефтяной геологии, при поиске, разведке и разработке месторождений.

Список литературы:

1. Мошашвили А.Б. Эволюция Земной коры Куринской впадины и её связь с проблемой Палеотетиса // В кн. Проблемы геодинамики Кавказа. – М. : Наука – 1982. – 15 с.
2. История осадконакопления продуктивной толщи в Южном Каспии с учетом погружения бассейна / Н. Абдуллаев, Р. Грегори, Т. Грин [и др.] // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2010. – № 9. – С. 8–17.
3. Габдулин Р.Р., Копаевич Л.Ф., Иванов А.В. Секвентная стратиграфия. – М. : МАКС Пресс, 2008. – 113 с.
4. Условия седиментации отложений нижнего отдела ПТ и их естественная радиоактивность / Э.Г. Алиева, Ч.С. Алиев, Д.А. Гусейнов [и др.] // Международный научный журнал «Стратиграфия и седименталогия нефтегазоносных бассейнов» НАНА, отделение Наук о земеле. – Баку, 2008. – № 1.
5. Бабаев Д.Х., Гаджиев А.Н. Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности бассейна Каспийского моря. – Баку : «NAFTA Press”, 2006. – 305 с.

УДК 622.276.68

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОДНОВРЕМЕННО-РАЗДЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДКЛЮЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ БОКОВЫМИ СТВОЛАМИ РЕЛИКВИДИРУЕМОЙ СКВАЖИНЫ В МНОГОСТВОЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Колесова Светлана Борисовна
Удмуртский государственный университет», Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева
канд. эконом. наук, доцент, директор института
sbkolesova@udsu.ru

Мирсаетов Олег Марсимович
Удмуртский государственный университет», Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Разработка и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений
ommirsaetov@udsu.ru

Аннотация. В докладе рассмотрены результаты аналитических исследований развития технологии одновременно-раздельной эксплуатации нескольких объектов боковыми стволами одной скважины. Выявлена прямая связь основной проблемы технологии ОРЭ с разобщением боковых стволов. Установлен многофункциональный характер разобщения. Представлены технические решения для разобщения боковых стволов в условиях многоствольной реконструкции бездействующих скважин. Показаны отличительные особенности и достигаемые преимущества разработанных решений.

Ключевые слова: одновременно-раздельная эксплуатация, основной ствол, боковой ствол, многоствольная реконструкция, разобщение стволов, герметизация стыка основного и бокового стволов, экспандирование, профильные трубы, реликвидация бездействующей скважины.

Индикатором современного направления развития технологии одновременно-раздельной эксплуатации (ОРЭ) подключаемых объектов разработки в скважинах с боковыми стволами является публикация [1], связанная с уменьшением числа тяжелых эксплуатационных колонн переходом от двухлифтовых компоновок к однолифтовой схеме при сохранении механической целостности стыка бокового и основного ствола, его герметичности по давлению, селективности и ремонтопригодности.

Отечественный опыт современной однолифтовой одновременно-раздельной добычи (ОРД) представлен в работе [2]. Из работы следует, что реализация однолифтовых схем требует применения интеллектуального блока с клапанами притока, с возможностью изолирования основного или бокового стволов, выполнения безподъемного и безбурового повторного доступа в боковые стволы по канатной технике или гибкой насосно-компрессорной трубе (ГНКТ). Пакер и интеллектуальные клапанные системы разделяют и измеряют потоки до точки смешения, а телеметрия обеспечивает контроль и отсечение каждого объекта. При этом, продукция отдельных объектов раздельно проходит регулирующие и измерительные узлы, а затем смешивается выше пакера. То есть, однолифтовые регулируемые системы обеспечивают разобщение стволов до точки смешения.

Другой тенденцией развития технологии ОРЭ является применение пакерной и двухлифтовой схемы ОРЭ, возможности совершенствования которой, по мнению специалистов отрасли, далеко не исчерпаны. Такие схемы позволяют решать вопросы физически раздельного подъема без смешивания продукции скважины, а также обеспечивают надежное индивидуальное управление каждым боковым стволом. В отечественной промысловой практике известны пакерные и двухлифтовые схемы ОРЭ двух стволов, когда каждый боковой ствол связан со своей колонной НКТ и своим насосом, а пакеры исключают межствольные перетоки [3; 4].

Основной общей проблемой технологии ОРЭ нескольких объектов одной скважиной является вопрос разобщения боковых стволов после их строительства. Анализ

современной промысловой практики, указывает на то, что понятие «разобщение” имеет многофункциональный характер, заключающийся в совокупности технических решений, встроенных в эксплуатационную архитектуру скважины, для исключения неконтролируемых перетоков между стволами через межтрубное пространство, получения продукции из нескольких стволов, сохранения возможности раздельного измерения и регулирования дебита и ремонтопригодности многоствольной системы путем сохранения селективного повторного доступа в каждый ствол. Установки (ОРД) в отечественной практике должны обеспечивать разделение эксплуатируемых объектов, учет отборов по каждому объекту, проведение необходимого комплекса исследований и безопасный ремонт с учетом различия пластовых давлений и свойств флюидов [2].

Целью данной работы является разработка комплекса технических решений для надежного разобщения боковых стволов в реликвидируемой бездействующей скважине с многоствольной реконструкцией.

Для сопоставления известных способов разобщения стволов в реликвидируемой скважине можно использовать международную классификацию TAML (Technology Advancement for Multilaterals) [5]. Она делит скважины на 6 уровней (от TAML-1 до TAML-6) в зависимости от герметичности соединения основного и бокового стволов и возможности контроля потока. Однако, ее применение не всегда корректно в случае многоствольной реконструкции бездействующей скважины. Например, цементированный стык соединения основного и бокового стволов по уровню TAML 4 имеет механическую целостность, однако это не предполагает наличие полной герметичности по давлению.

Впервые техническая задача герметизации соединения основного и бокового стволов, селективного повторного входа и раздельной добычи была сформулирована в работе [6].

Связь требований физического разобщения, отдельного подъема и повторного доступа была показана в виде схемы эксплуатации многозабойной скважины двумя лифтами, каждый из которых снабжен трубным насосом. Для основного ствола сохраняется прямой доступ, а для дополнительного применяется эксплуатационный клин, спускаемый вместе с технологической или геофизической компоновкой [7].

Ранним отечественным примером герметичного селективного соединения лифтовой колонны с выбранным боковым стволом является работа [8]

В заключении необходимо также отметить техническое решение, являющееся подтверждением того, что надежная герметизация стыка остается самостоятельной инженерной задачей даже при развитых TAML-системах. Данное решение представляет собой современный вариант герметизации стыка путем введения в хвостовик бокового ствола уплотнительного узла. После создания уплотнения в область соединения подается изолирующая среда. В работе прямо подчеркивается, что недостаточная герметичность по давлению затрудняет повторный вход, нарушает зональную изоляцию и способствует нежелательному перетоку [9].

В работе [10] было впервые представлено устройство, предназначенное для спуска, крепления и цементирования хвостовика в боковом стволе многоствольной скважины с применением профильных экспандируемых труб, эластомера и полого клина. Якорно-пакерное устройство содержит две герметично соединенные профильные экспандируемые трубы, одна из которых обрезинена; к хвостовику присоединен направляющий узел с полым клином и винтовой опорной поверхностью. Профилированные трубы после гидравлического расширения создают крепление и герметизирующий элемент, а полый клин сохраняет направляющую функцию.

Данное техническое решение является прямым конструктивным предшественником, предложенного в настоящей работе технического решения для реконструкции бездействующей скважины, в которой разобщение боковых стволов объединено с защитой нижнего ствола от кольматанта (фильтрата) и восстановлением прохода после цементирования второго хвостовика [11]. Схема разобщения боковых стволов, представленная на рисунке 1, реализуется следующим образом. После бурения второго (верхнего) бокового ствола (6) спускают его хвостовик с продольно-профилированными трубами (16) с эластомерным покрытием (17) в верхней части и полым клином (15), закрепленным у башмака на срезных элементах.

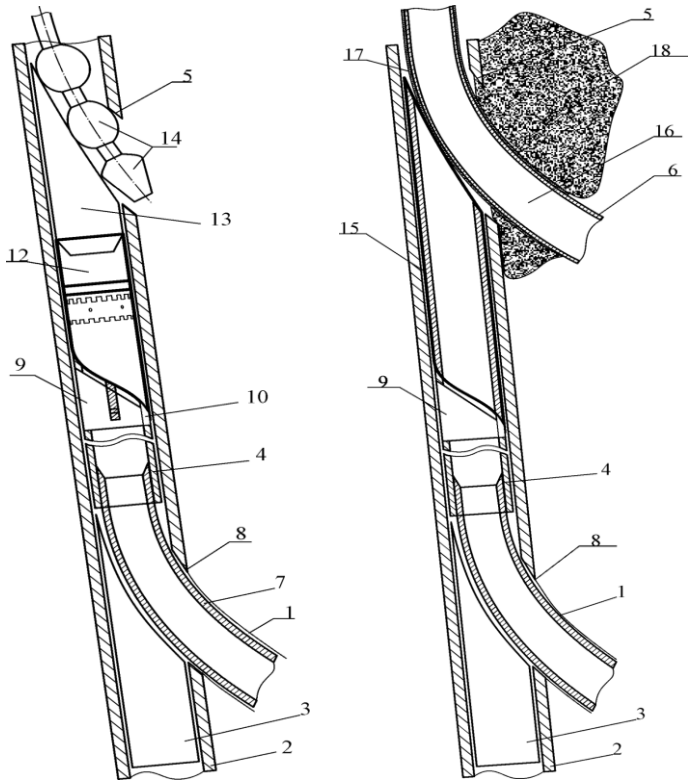


Рисунок 1 – Схема реализации способа разобщения верхнего бокового ствола и разделения боковых стволов при одновременно-раздельной добычи нефти: 1 – первый боковой ствол, 2 – эксплуатационная колонна, 3 – клин, 4 – трубы максимально допустимого диаметра выше интервала зарезки нижнего ствола, 5 – окно второго бокового ствола, 6 – второй боковой ствол, 7 – компоновка первого хвостовика ниже интервала зарезки нижнего ствола, 8 – каплевидное окно первого бокового ствола, 9 – голова хвостовика, 10 – шпоночный паз головы хвостовика, 12 – компоновка отклоняющего клина, 13 – ложка клина, 14 – райберы, 15 – полый клин, 16 – нижняя профилированная труба, 17 – эластомер, 18 – затрубное пространство

:Закачкой цементного раствора с разделительной пробкой профильные трубы расширяют до размеров второго бокового ствола и внутреннего диаметра эксплуатационной колонны (2). Нижняя профильная труба с эластомерным покрытием размещается в окне и выполняет функцию пакерующего и герметизирующего элемента; верхняя работает как подвеска. После цементирования и отсоединения хвостовика проход в первый боковой ствол восстанавливают райберной компоновкой (14) через профильную трубу и полый клин.

Верхняя часть первого хвостовика (7) имеет максимально допустимый диаметр, поскольку в этом интервале устанавливается пакер, разделяющий стволы для ОРЭ. Таким образом, сочетается два уровня разобщения: герметизация и крепление второго бокового ствола посредством расширяемой профильной трубы с эластомером и эксплуатационное пакерное разделение потоков.

Предложенная в работе технология ориентации верхнего второго бокового ствола его зарезкой в 1 или 4 четвертях относительно апсидальной плоскости в зависимости от требуемого направления проводки ствола дает возможность неориентируемого спуска скважинного оборудования в первый боковой ствол под действием силы тяжести.

В заключении следует отметить, что описанное техническое решение функционально направлено на решение задач возврата в действующий фонд бездействующих скважин с реконструкцией в многоствольном исполнении, герметизации стыка, селективного доступа и одновременно-раздельной добычи.

Для одновременно-раздельной эксплуатации боковых стволов требуется не один изолирующий элемент, а функциональная система, включающая герметичное разделение каналов, отдельное направление потоков, возможность учета и регулирования режимов работы каждого ствола и сохранение селективного доступа.

Технической новизной обладают решения по взаимному использованию двух хвостовиков, защите нижнего ствола от кольматанта и фильтрата во время строительства второго, созданию герметизирующего стыка профильной трубой с эластомером, сохранению ориентированного полого прохода, восстановлению проходимости первого ствола с последующей возможностью установки пакеров и одновременно-раздельной добычи.

Список литературы:

1. Optimizing Multilateral Well Operations: Advanced TAML-5 Completion Systems for Enhanced Lateral Access and Operational Efficiency / A. Almasri, D. Parks, A.A. Abdulhalim [et al.] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Houston, Texas, 20–22 October 2025. – SPE-228221-MS.
2. Одновременно-раздельная эксплуатация продуктивных пластов в скважинах с боковыми стволами / Р.Р. Габдулов, П.И. Сливка, А.А. Мещеряков [и др.] // Экспозиция Нефть Газ. – 2024. – № 8. – С. 108–113.
3. Опыт бурения многозабойных горизонтальных скважин и их освоение с применением двухлифтового оборудования для одновременно-раздельной эксплуатации / И.А. Галикеев, Р.Р. Хузин, А.Ш. Мияссаров [и др.] // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2015. – № 1. – С. 8–11.
4. Опыт разработки залежи высоковязкой нефти с применением многозабойных скважин с одновременно-раздельной эксплуатацией двумя лифтами / Р.С. Хисамов, Р.Р. Хузин, А.Ш. Мияссаров [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 96–99.
5. Chambers M.R. Junction design based on operational requirements // Oil & Gas Journal. – 1998. December 7. Electronic version, pagination absent. – URL : https://www.ogj.com/home/article/17225420/junction-design-based-on-operational-requirements
6. US5311936A. Method and apparatus for isolating one horizontal production zone in a multilateral well / R.J. McNair, M.W. Brockman, L.C. White, J.D. Cockrell, A.R. Curington, D.S. Bangert. Priority 07.08.1992; publication 17.05.1994.
7. Хлуденев Д.А., Галикеев И.А. Бурение многозабойной скважины по второму уровню сложности на башкирский ярус // Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья: тезисы Международной научно-практической конференции, 15–16 ноября 2022 г. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 143.
8. 2585297 C2. Российская Федерация, МПК E21B 43/12, E21B 43/26: Конструкция многозабойной скважины с двумя горизонтальными стволами: № 2014131696: заявл. 31.07.2014: опубл. 27.05.2016 / Ишбулатов С.Ю., Сулейманов Д.Д., Зиганбаев А.Х., Аксаков А.В., Давыдов А.В., Волков В.Г.; заявитель и патентообладатель ОАО «НК «Роснефть». – 11 с. 7 ил.
9. Патент № 2724174C1. Российская Федерация, МПК E21B 43/10, E21B 33/10: Улучшенный способ и устройство для герметичных соединений многоствольных скважин: № 2019125651: заявл. 29.04.2017: опубл. 22.06.2020 / Hales J.H., Williams B.W., Blakey J.G., Jackson P.C.; заявитель и патентообладатель Halliburton Energy Services, Inc. – 19 с. 9 ил.
10. Патент № 2658154 C1. Российская Федерация, МПК E21B 43/10, E21B 33/14: Устройство для спуска, крепления и цементирования хвостовика в боковом стволе скважины: № 2017129057: заявл. 14.08.2017: опубл. 19.06.2018 / Галикеев И.А., Чикуров Г.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «Горизонт». – 11 с.: 4 ил.
11. Патент № 2795655 C1 Российская Федерация, МПК E21B 7/08: Способ реконструкции бездействующей скважины : № 2022132763 : заявл. 14.12.2022 : опубл. 05.05.2023 / Галикеев И.А., Колесова С.Б., Шумихин А.А., Мирсаетов О.М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «УдГУ». – 13 с.: ил. 3.

УДК 665.76

ВЛИЯНИЕ ТИПА КАЛЬЦИЕВОГО ДЕТЕРГЕНТА НА УСЛОВИЯ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

Колыбельский Дмитрий Сергеевич

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
канд. техн. наук, соискатель
kolubelskyds@yandex.ru

Аннотация. Проведено сопоставление параметров получения пластичных смазок на основе сульфоната, алкилсалицилата и алкилфенолята кальция. Рассмотрено влияние продолжительности выдержки и последующей термообработки на прочность, температуру каплепадения и коллоидную стабильность. Предложена интерпретация различий технологического режима с учётом состава сырьевой смеси и щелочного числа детергента.

Ключевые слова: пластичные смазки, сульфонат кальция, алкилсалицилат кальция, алкилфенолят кальция, структурообразование, термообработка.

Введение

Высокощелочные кальциевые детергенты применяются как моюще-диспергирующие присадки к смазочным маслам. Их способность формировать дисперсную фазу делает возможным получение пластичных смазок на основе сульфонатов, алкилсалицилатов и алкилфенолятов кальция. Свойства таких продуктов зависят от химической природы детергента, состава сырьевой смеси и последовательности технологических операций. Особое значение имеют две стадии: формирование пространственной структуры при нагреве и удаление избытка воды при последующей термообработке.

В высокощелочных присадках частицы карбоната кальция находятся внутри мицеллярных образований, стабилизированных органическими компонентами. В присутствии воды и карбоновой кислоты изменяются состояние карбонатной фазы и взаимодействие между частицами. После формирования структуры избыток воды удаляют термообработкой [1].

Цель настоящей работы – установить связь между типом кальциевого детергента, составом сырьевой смеси и условиями этапов структурообразования и термообработки получения пластичной смазки. Сопоставлены сульфонатная, алкилсалицилатная и алкилфенолятная пластичные смазки, полученные в лабораторных реакторах. Особое внимание уделено продолжительности выдержки, температуре термообработки и показателям состояния дисперсной структуры.

Составы и методы сопоставления

Для всех трёх систем в качестве дисперсионной среды использовали индустриальное масло И-40А, а также комплексообразователи: уксусную кислоту и дистиллированную воду. Рецептуры получения образцов смазок были подобраны в ходе предварительных исследований и представлены в таблице 1. Содержание компонентов относится к смеси до удаления воды. Щелочное число присадок существенно различалось: для С-300 «А» оно составляло 288,6 мг КОН/г, для Детерсол-140 – 168 мг КОН/г, для К-38 – 306 мг КОН/г.

Таблица 1 – Рецептуры получения пластичных смазок на детергентах [2]

Показатель	Типы пластичных смазок		
	Сульфонатная	Салицилатная	Фенолятная
Кальциевый детергент	С-300 «А»	Детерсол-140	К-38
Доля детергента, мас. %	67,3	65,0	72,0
Масло И-40А, мас. %	14,3	11,0	10,0
Вода, мас. %	9,6	12,0	10,0
Уксусная кислота, мас. %	8,8	12,0	8,0

Структурообразование проводили в диапазоне температур 75–90 °С. Для последующей термообработки температуру повышали до уровня 110–160 °С. Образцы готовили в реакторе со скребковой мешалкой и регулируемым электрообогревом. Оценивали такие характеристики смазок, как пенетрацию, температуру каплепадения, коллоидную стабильность и предел прочности на сдвиг. Для идентификации карбонатной фазы применяли метод инфракрасной спектроскопии.

Продолжительность структурообразования

Для трёх составов смазок, представленных в таблице 1, наиболее благоприятное сочетание свойств и продолжительности процесса было получено при температуре структурообразования 80 °С. Увеличение температуры до этого уровня сопровождалось выраженным улучшением характеристик. При дальнейшем повышении температуры в изученном интервале изменения становились небольшими.

Наибольшая продолжительность выдержки потребовалась сульфонатной системе. При увеличении времени структурообразования с 120 до 220–240 минут улучшались коллоидная стабильность и прочностные показатели продукта. Рекомендуемое время составило 220 мин. Длительная выдержка согласуется с необходимостью сформировать устойчивую пространственную сеть комплексного загустителя.

Для алкилсалицилатного загустителя увеличение продолжительности выдержки свыше 120 мин почти не меняло характеристики смазки. Это говорит о более быстром формировании структуры смазки по сравнению с сульфонатным загустителем.

В алкилфенолятной системе дальнейшее продление стадии структурообразования после 60 мин оказалось нецелесообразным. При увеличении выдержки смазки с присадкой К-38 с 60 до 90 мин температура каплепадения снизилась со 150 до 120 °С, предел прочности – с 200 до 145 Па, а показатель коллоидной стабильности вырос с 1,89 до 3,17 % [3].

Характер зависимости свойств от длительности выдержки различен для трёх систем. Сульфонатная смазка сохраняла положительный отклик на удлинение стадии, алкилсалицилатная быстрее достигала стабилизации свойств, а алкилфенолятная после более продолжительной выдержки ухудшала показатели. Поэтому момент завершения структурообразования следует определять по совокупности прочности, температуры каплепадения и коллоидной стабильности. Одновременное снижение первых двух показателей при возрастании отделения масла для алкилфенолятной смазки указывает на ослабление дисперсной структуры.

Удаление воды и температурный режим

Вода присутствует в исходных смесях всех трёх типов смазок. При структурообразовании она участвует в изменении карбонатной фазы (переход в форму кальцит), а на заключительном этапе её избыток может ухудшать устойчивость дисперсной структуры. Например, при температуре термообработке ниже 120–140 °С показатель коллоидной стабильности повышался до 3–4 % и более, вероятная в связи с неполным удалением воды.

Термообработка при температуре 140 °С в течение 30 мин обеспечивала благоприятное сочетание свойств получаемой смазки. При дальнейшем повышении температуры улучшение большинства показателей было незначительным. Для алкилсалицилатной смазки нагрев выше 160 °С сопровождался разрушением структуры. Таким образом, температурный режим должен обеспечить удаление избытка воды без перегрева и нарушения дисперсной системы.

Наиболее заметное влияние температуры выпаривания установлено для алкилфенолятной смазки. При одинаковом составе исходной смеси (72 % присадки К-38, 10 % масла И-40А, 10 % воды и 8 % уксусной кислоты) повышение температуры термообработки с 130 до 140 °С сопровождалось ростом предела прочности на сдвиг с 200 до 2000 Па. Температура каплепадения изменилась со 150 до более 250 °С, а показатель коллоидной стабильности снизился с 1,89 до 0,95 % [3].

Стадия термообработки затрагивает несколько аспектов качества смазки. В алкилфенолятной системе при переходе от 130 к 140 °С возрастали сопротивление сдвигу и температура каплепадения, уменьшалось отделение масла. Синхронное измене-

ние этих характеристик показывает, что нагрев до 140 °C улучшает и механическую прочность, и способность структуры удерживать дисперсионную среду.

Технологическое значение результатов

Технологический режим выбирают последовательно: сначала определяют время формирования структуры при умеренной температуре (этап структурообразования), затем устанавливают температуру и длительность удаления избытка воды (этап термообработки). Эти стадии по-разному влияют на рассматриваемые системы пластичных смазок. Для сульфонатной смазки особенно важна достаточная продолжительность выдержки, для алкилфенолятной – температура последующей термообработки.

Практическая проверка технологического режима получения смазок включает контроль температуры и продолжительности выдержки, скорости нагрева и условий охлаждения. Для сравниваемых составов оптимальным признаны следующие параметры режима: исходные компоненты загружали одновременно, нагревали со скоростью около 2 °C/мин и медленно охлаждали в реакторе без перемешивания [2].

Таким образом, продолжительность формирования структуры сульфонатной, алкилсалицилатной и алкилфенолятной смазок при 80 °C составляет соответственно 220, 120 и 60 мин. После этой стадии для всех трёх составов применяли термообработку при 140 °C в течение 30 мин. Различия между системами проявляются прежде всего в чувствительности сульфонатной смазки к длительности выдержки, а алкилфенолятной – к температуре удаления воды.

Список литературы:

1. Бакунин В.Н., Алексанян Д.Р., Бакунина Ю.Н. Полиморфы карбоната кальция в высокощелочных присадках к маслам и в смазках (обзор) // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95. – № 4. – С. 410–421.

2. Колыбельский Д.С., Тонконогов Б.П., Багдасаров Л.Н. Влияние типа загустителя на выбор технологических параметров производства пластичных смазок // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2025. – № 9. – С. 22–26.

3. Курцева Е.И., Песковец А.В., Колыбельский Д.С., Багдасаров Л.Н. Влияние технологического режима на эксплуатационные свойства пластичных смазок на основе алкилфенолятов кальция // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2023. – № 2. – С. 31–33.

УДК 553.4

ЛИТОТЕХНОГЕНЕЗ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

Макаров Анатолий Борисович
Уральский государственный горный университет
д-р геолог.-минерал. наук, профессор,
кафедра геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых
fgg.gpr.@m.ursmu.ru

Талалай Александр Григорьевич
Уральский государственный горный университет
д-р геолог.-минерал. наук, профессор,
nedra@uralnedra.ru

Хасанова Гульнара Габдулбариевна
Уральский государственный горный университет
канд. геолог.-минерал. наук, доцент,
кафедра геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых
fgg.gpr.@m.ursmu.ru

Аннотация. Рассмотрены процессы современного литотехногенеза, которые в пределах техносферы формируют техногенные месторождения. Показано, что подобные образования (технолиты) могут служить заменителями природного минерального сырья. Для этого необходимо проводить их кадастровый учет и комплексное исследование состава для выбора оптимального направления использования.

Ключевые слова: литотехногенез, техногенно-минеральные месторождения, технолиты, шлаки, хвосты, золы.

В последние десятилетия внимание исследователей привлекают техногенно-минеральные месторождения, формирующиеся как результат складирования отходов горнопромышленного, металлургического, топливно-энергетического производств. Процесс формирования техногенно-минеральных образований определяется нами как процесс литотехногенеза [5], изучение которого определяет, как оценку техногенно-минеральных месторождений, так и эволюцию их вещественного состава. Исследования побочных объектов выполнялись в основном в пределах Уральского региона, где широко развиты как процессы добычи и переработки разнообразных полезных ископаемых, так и переработка различных видов техногенно-минерального сырья.

Создана и совершенствуется классификация техногенно-минеральных месторождений [1]. Показано, что значительная их часть находится в стационарном состоянии, поступление и складирование отходов в них прекращено, поскольку отработаны месторождения или исчерпана проектная емкость, однако многие из них находятся в стадии формирования – на ранних этапах литотехногенеза. При этом техногенно-минеральные образования становятся как элементов геологической среды, так и в определенной степени источником загрязнения природной окружающей среды тяжелыми металлами [2]. Их воздействие определяется многими факторами: объемом техногенно-минеральных образований, площадью объекта, инженерно-геологическими и климатическими условиями.

Дальнейшее развитие литотехногенеза техногенно-минеральных образований определяется процессами вторичного изменения техногенно-минеральных образований и формированием в рудных отвалах вторичной зональности с обогащенными участками, с другой – формируются ореолы химического загрязнения в компонентах окружающей среды.

В рамках нового научного направления возможно как изучение процессов литотехногенеза, так и изменений геологической среды, что представляет достаточно сложную задачу, которая должна быть основана на результатах комплексного изучения, что позволит определить пути реабилитации геологической среды [3].

Техногенное минеральное сырье (технолиты) представляет собой большой резерв минерально-сырьевой базы страны. Специфические свойства отходов позволяют рассматривать их не только как заменители природного сырья, но и как новые нетрадиционные ископаемые. Тем не менее, уровень их использования в России низкий, а объемы образования, особенно в горнодобывающей промышленности, постоянно растут по мере увеличения глубины разработки месторождений и вовлечения в переработку все более бедных руд. Применение новых технологий и совершенствование организации производства увеличивают возможности использования технолитов.

Все виды технолитов условно подразделяются на близкие по вещественному составу и свойствам к природному сырью и существенно отличающиеся от него. Технолиты первой группы (вскрышные, вмещающие породы, отходы сухой переработки и сухого обогащения полезных ископаемых) используют практически в тех же направлениях, что и природные – в качестве рудного, горно-химического, горно-технического, нерудного строительного и кристаллосырья. Технолиты второй группы (отходы мокрых способов обогащения, металлургические шлаки и шламы, золошлаковые отходы ТЭЦ, химической промышленности) требуют при изучении возможных направлений использования специального подхода. Основное применение они находят в качестве рудного, агрохимического и нерудного строительного сырья [4]. Основные области применения минерального сырья техногенно-минеральных месторождений показаны в таблице.

Таблица – Основные области применения минерального сырья техногенно-минеральных месторождений

Область применения	Вид сырья
В качестве рудного сырья	
Извлечение металлов	Отходы добычи и обогащения руд черных, цветных металлов, металлургические шлаки, шламы и пыли, пиритные огарки
В качестве агрохимического сырья	
Производство мелиорантов	Золошлаковые отходы ТЭС, металлургические шлаки (сталеплавильные, ферросплавные, медеплавильные, доменные), отходы обогащения (хвосты ММС, отходы гравитации и др.), фосфогипсы, горные породы
В качестве горно-технического сырья	
Доизвлечение ценных компонентов	Отходы обогащения руд и неметаллического сырья, фосфогипсы
Производство:	
– флюсовых материалов	Шлаки сталеплавильные, отходы обогащения кварцитов.
– огнеупорных материалов	Отходы обогащения хромовых руд, хвосты гравитации угля, шлаки ферросплавные
В качестве нерудного строительного сырья	
Производство: – цементов и гипсовых вяжущих бетонов	Металлургические шлаки (доменные, ферросплавные), золошлаковые отходы ТЭС, шламы бокситовые, отходы обогащения руд черных и цветных металлов, угля, фосфо- и фторогипсы.
– силикатных изделий, строительных растворов	Шлаки черной и цветной металлургии. Золошлаковые отходы ТЭС, отходы обогащения руд (хвосты флотации, ММС, углеобогащения), горные породы, фосфогипсы.
– керамических изделий	Отходы углеобогащения, золошлаковые отходы ТЭС, хвосты обогащения руд, доменные и медеплавильные шлаки, бокситовые шламы.
– дорожных материалов	Шлаки черной и цветной металлургии, отходы углеобогащения, породы отвалов, золошлаковые отходы ТЭС, отходы обогащения, фосфогипсы.
– изделий из шлаковых расплавов	Шлаки доменные и ферросплавные, золошлаковые отходы.
– прочих стройматериалов (пластмасс, абразивов, пигментов и др.)	Отходы обогащения (хвосты ММС, флотации), золы ТЭС, металлургические шлаки (феррохромовые, никелевые), фосфогипсы

Таким образом, широкий спектр формирующихся в процессе литотехногенеза техногенно-минеральных образований определяет разнообразные направления использования. Это в свою очередь определяет необходимость их кадастрового учета и комплексной оценки.

Список литературы:

1. Макаров А.Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2006. – 206 с.
2. Макаров А.Б., Талалай А.Г. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль // Литосфера. – 2012. – № 1. – С. 172–176.
3. Макаров А.Б., Талалай А.Г., Хасанова Г.Г. Техногенные месторождения: особенности исследований // Известия УГГУ. – 2019. – Вып. 3 (55). – С. 58–62.
4. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г. Техногенные месторождения полезных ископаемых: учебное пособие / Уральский государственный горный университет. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2022. – 132 с.
5. Талалай А.Г., Макаров А.Б., Глушкова Т.А. Основы литотехногенеза // Техногенез и экология: инф.-темат. сборник. – Екатеринбург : НТО «Горное», 1996. – С. 4–17.

УДК 553.661

ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ МЕДИ В УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

Макаров Анатолий Борисович
Уральский государственный горный университет
д-р геолог.-минерал. наук, профессор,
кафедра геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых
fgg.gpr.@m.ursmu.ru

Хасанова Гульнара Габдулбариевна
Уральский государственный горный университет
канд. геолог.-минерал. наук, доцент,
кафедра геологии, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых
fgg.gpr.@m.ursmu.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности и условия формирования одного из элементов техносферы в Уральском регионе – техногенных месторождений меди. Приведена краткая характеристика главных и второстепенных типов техногенных месторождений меди в Уральском регионе.

Ключевые слова: техногенные месторождения, медь, шлаки, хвосты, пиритные огарки.

Один из объектов техносферы в уральском регионе, где активно развивается в течение многих лет горно-промышленное производство черных и цветных металлов, являются сформированные в процессе техногенеза так называемые техногенные месторождения – скопления отходов горнодобывающего, обогатительного и металлургического производства, содержащие полезные компоненты. В последние десятилетия они привлекают особое внимание как источник дополнительных резервов минерально-сырьевой базы России. В рамках «Стратегии развития минеральной сырьевой базы Российской Федерации до 2035 г.», утвержденной Правительством РФ 22.12.2018, предусматривается «создание условий для освоения техногенных месторождений».

Цветная металлургия России начала развиваться в Уральском регионе с 1634 г., когда был пущен в эксплуатацию Пыскорский медеплавильный завод, работавший на базе пермских медистых песчаников. С начала XVIII века началось уже строительство медеплавильных заводов на Урале и в Прикамье. В этот период разрабатываются месторождения меди различных геолого-промышленных типов при главной роли медистых песчаников. За время существования медеплавильных заводов в Прикамье по данным Т.В. Харитонова [5] накопились огромные массы шлаков (порядка 3 млн т) – первых техногенных месторождений, содержащих медь, ванадий, никель, кобальт, серебро, золото и т.д.

В целом, предприятия медной отрасли цветной металлургии образуют техногенные месторождения, которые можно определить как принадлежащие к следующим главным геолого-промышленным типам [2, 3]: 1) отвалы добычи медных руд; 2) хвостохранилища обогатительного производства, 3) отвалы шлаков металлургического передела, которые в то же время оказывают и различное воздействие на окружающую среду. Второстепенные объекты включают отвалы пиритных огарков, отходы обогащения железных руд скарнового типа и грунты промышленных предприятий.

К первому типу принадлежат отвалы вмещающих пород и некондиционных руд, образованные в различные временные периоды, формирование которых происходит и в настоящее время, преимущественно при разработке на Урале медноколчеданных и меднопорфировых месторождений открытым способом.

Наиболее ранними здесь являются отвалы разработки месторождений медистых песчаников на западном склоне Урала. В 20 веке подобные объекты появляются на Среднем Урале уже как результат отработки скарновых и медноколчеданных месторождений. Примерами могут служить отвалы Дегтярского месторождения, сложенные преимущественно в значительной степени выветрелыми кварц-серицитовыми сланцами и рудника им. III Интернационала, где суммарный объем вскрышных и вмещающих пород составляет более 800 тыс. м^3, в которых фиксируются повышенные содержания меди, свинца, цинка, а также ртути, молибдена, кадмия и мышьяка.

Техногенные месторождения, связанные с обогатительным производством, представлены на Урале хвостохранилищами обогатительных фабрик, расположенных

преимущественно вблизи горнодобывающих или металлургических предприятий. Это обычно пиритные и малосернистые хвостохранилища, материал которых представляет собой обезвоженную пульпу с размером частиц 0,02–0,07 мм, содержащую медь, цинк, серу, а также золото, серебро, селен, теллур, германий и др. элементы.

В Уральском регионе обогатительное производство медной отрасли сосредоточено в Свердловской (Турьинская, Красноуральская, Кировградская и Среднеуральская обогатительные фабрики (ОФ)), Челябинской (Карабашская ОФ), Оренбургской (Гайская ОФ) и Республике Башкортостан (Бурибаевская, Сибайская, Учалинская ОФ). Так, Красноуральская ОФ производит складирование хвостов в Сорьинском шламохранилище, введенном в эксплуатацию в 1965 г. Рудные минералы в хвостах представлены пиритом, халькопиритом, реже – теннантитом, ковеллином. Запасы хвостов составляют 54 млн. т, меди – 135 тыс. т при среднем содержании 0,25 %, цинка – 270 тыс. т при среднем содержании 0,5 %. Помимо этого, хвосты содержат золото – 0,5 г/т и серебро – 8 г/т. Для хвостохраналища Бурибаевской ОФ на необводненной части проведена разведка колонковыми скважинами по сети 50 х 50 м. Анализ распределения меди и серы показал, что наибольшие их концентрации приурочены к местам слива шламов в юго-западной части. Объем шламов составил 3962,4 тыс. т при среднем содержании меди – 0,54 %, цинка – 0,17 % и серы – 28,18 %, содержащие золото – 1,2 г/т, серебро – 10,3 г/т.

В настоящее время на Урале началась разработка медно-порфировых месторождений. Получаемым на основе хвостов Томинского ГОКа закладочным материалом производится рекультивация Коркинского разреза [1].

Техногенные месторождения меди, связанные с металлургическим переделом, формируются в виде отвалов металлургических шлаков и представляют значительный интерес; часть подобных образований в настоящее время уже переработаны. Так, шлаковый отвал Среднеуральского медеплавильного завода формируется с 1940 года и является действующим, содержания полезных компонентов в нем составляют: медь – 0,7–0,9 %, цинк – 3–4 %, золото – 0,2–0,4 г/т, серебро – 3,4–5,0 г/т. Объем переработки на сегодняшний день насчитывает более 1 млн т шлака в год, в результате чего объем ранее накопленных на отвале шлаков ежегодно сокращается на 650 тыс. т.

Помимо главных типов техногенных месторождений меди, формируемых при добыче и переработке медных руд, как второстепенные объекты для изучения и получения цветных и благородных металлов в Уральском регионе рассматриваются отвалы пиритных огарков, хвосты обогащения железных руд скарнового типа и металлоносные грунты производственных предприятий. В пиритных огарках содержится до 0,6 % меди и до 1,25 % цинка при максимальных содержаниях золота – 3 г/т, серебра – 25–30 г/т. Для отвалов пиритных огарков Полевского и Пермского сернокислотных заводов А.Е. Малаховым [4] ранее были также установлены высокие содержания меди – 0,93 %, золота (до 1,5 г/т) и серебра (до 16 г/т). Разработаны технологии их комплексной переработки. Во всех типах техногенных месторождений меди Уральского региона ценность, помимо меди и цинка, представляют благородные металлы.

Для техногенных месторождений в Уральском регионе ранее, в начале двухтысячных годов были выполнены исследования по их кадастровому учету, в том числе и по меди. Вполне естественно, что с появлением новых, связанных с разработкой месторождений меди различного генезиса технологий, для этих объектов необходимо в настоящее время проводить подобные исследования для их комплексной оценки, в том числе воздействия на окружающую среду.

Список литературы:

1. Геоэкологические особенности месторождений полезных ископаемых в зоне сочленения Урала и Западно-Сибирской плиты / Н.В. Гончар, А.Б. Макаров, О.М. Гуман [и др.] // Известия УГГУ. – 2025. – Вып. 2 (78). – С. 98–108.

2. Макаров А.Б., Талалай А.Г., Хасанова Г.Г. Геолого-промышленные типы техногенных месторождений // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2018. – № 8. – С. 39–45.

3. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г. Техногенные месторождения полезных ископаемых. Учебное пособие. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2022. – 132 с.

4. Малахов А.Е. Минералого-петрографические исследования состава пиритных огарков и изготовленных из них агломератов // Труды петрографического института Ан СССР. – 1937. – Вып. 10. – С. 123–152.

5. Харитонов Т.В. Первые техногенные месторождения Пермской области // Проблемы минералогии, петрографии, металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского: Сборник научных статей. –Пермь : Перм. ун-т, 2005. – Вып. 8. – С. 228–237.

УДК 550.8.053

РЕГИОНАЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ОЛИГОЦЕН–НИЖНЕМИОЦЕНОВЫХ И СРЕДНЕ-ВЕРХНЕМИОЦЕНОВЫХ НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ТОЛЩ АЛЬПИЙСКО-КАВКАЗСКОЙ ОБЛАСТИ

****

REGIONAL DIFFERENTIATION OF OLIGOCENE–LOWER MIOCENE AND MIDDLE–UPPER MIOCENE SOURCE ROCKS IN THE ALPINE–CAUCASUS REGION

Мовсумова Ульвия Алимовсум

Институт Нефти и Газа Министерства науки и образования Республики Азербайджан
канд. геолог.-минерал. наук,
главный научный сотрудник
u_movsumova@yahoo.com

Movsumova Ulviyya Alimovsum

Institute of Oil and Gas of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Chief Scientific Officer
u_movsumova@yahoo.com

Аннотация. Проведённый сравнительный анализ олигоцен-нижнемиоценовых и средне-верхнемиоценовых нефтематеринских толщ Альпийско-Кавказской области выявил закономерности их региональной дифференциации по пространственной выдержанности, геохимическим характеристикам органического вещества и степени реализации генерационного потенциала. Олигоцен-нижнемиоценовые нефтематеринские толщи характеризуются изменением от регионально выдержанного распространения в восточной части области к более локализованному в центральной и западной частях при существенном перекрытии диапазонов TOC и HI. Отсутствие однонаправленной региональной изменчивости этих параметров указывает на независимость исходного качества OB от масштаба распространения органически обогащённых интервалов. Распределение HI-Tmax фиксирует различную степень последующего преобразования исходно неоднородного OB; наиболее существенное снижение HI при повышенных Tmax характерно для глубоко преобразованных толщ с более высокой степенью реализации генерационного потенциала. Средне-верхнемиоценовый уровень отличается усилением пространственно-стратиграфической неоднородности и локализацией высокопотенциальных интервалов среди толщ с более умеренными нефтематеринскими характеристиками. Сопоставление двух стратиграфических уровней не выявляет последовательного регионального градиента TOC и HI. Установленная дифференциация определяется сочетанием пространственной выдержанности нефтематеринских толщ, первичной неоднородности OB и различной степени его термического преобразования, вследствие чего современные максимумы TOC и HI пространственно не совпадают с наиболее высокой степенью реализации генерационного потенциала.

Ключевые слова: Альпийско-Кавказская область, олигоцен, миоцен, нефтематеринские толщи, майкопская серия, органическое вещество, TOC, водородный индекс, Tmax, генерационный потенциал

Annotation. The comparative analysis of Oligocene-Lower Miocene and Middle-Upper Miocene source-rock successions across the Alpine-Caucasus region revealed regional differentiation in their spatial continuity, organic-matter geochemical characteristics, and degree of generative-potential realization. Oligocene-Lower Miocene source rocks show a transition from regionally extensive successions in the eastern part of the region to more localized

occurrences in its central and western parts, despite substantial overlap in TOC and HI ranges. The absence of unidirectional regional variation in these parameters indicates that initial OM quality is independent of the spatial extent of organic-rich intervals. HI-Tmax distributions record variable degrees of subsequent transformation of initially heterogeneous OM; the most pronounced decrease in HI at elevated Tmax is characteristic of deeply transformed source rocks with a higher degree of generative-potential realization. The Middle-Upper Miocene interval is distinguished by increased spatial and stratigraphic heterogeneity and localization of high-potential intervals within successions characterized by more moderate source-rock properties. Comparison of the two stratigraphic intervals reveals no consistent regional gradient in TOC and HI. The established differentiation is controlled by the interplay between source-rock continuity, primary OM heterogeneity, and the degree of thermal transformation, resulting in a spatial mismatch between present-day TOC and HI maxima and the highest degree of generative-potential realization.

Keywords: Alpine-Caucasus region, Oligocene, Miocene, source rocks, Maikop Series, organic matter, TOC, Hydrogen Index, Tmax, generative potential

Introduction

The Oligocene-Miocene interval was marked by pronounced differentiation in organic matter accumulation and subsequent transformation across the Alpine-Caucasus region. Variations in paleogeographic setting, hydrological isolation, and burial history resulted in differences in the spatial continuity of source-rock intervals, organic matter composition, and the degree of realization of their initial generative potential. Regional comparison of TOC, HI, and Tmax was used to distinguish primary heterogeneity in organic matter accumulation from subsequent thermal transformation and to establish the principal spatial and stratigraphic patterns of this differentiation.

Spatial Differentiation and Realization of Source-Rock Potential

Spatial organization of Oligocene organic matter accumulation

One of the principal expressions of regional differentiation during the Oligocene was the variable spatial continuity of organic-rich fine-grained successions. A regionally extensive Maikop source-rock system developed in the deeper parts of the Eastern Paratethys. In most studied Maikop sections of the South Caspian Basin (SCB), TOC contents are 1–3 wt. %, with a regional range of 1–10 wt. % and locally exceeding 5–10 wt. % in organic-rich intervals [1–6]. Thus, regional continuity of the Maikop source-rock succession is combined with substantial internal lateral and stratigraphic heterogeneity.

This heterogeneity is also expressed in HI distribution. In the Azerbaijani sector of the SCB, Maikop source rocks show a wide range of HI values, locally exceeding 600 mg HC/g TOC, with an average of approximately 146 mg HC/g TOC [7]. Along the basin margins, HI ranges from 20–161 mg HC/g TOC in intervals dominated by Type III kerogen to 100–300 mg HC/g TOC in more organic-rich intervals, locally reaching approximately 350–420 mg HC/g TOC [1, 6–7]. Stratigraphic differentiation is equally pronounced. Mean HI is approximately 349 mg HC/g TOC in Lower Oligocene intervals and decreases to about 139 mg HC/g TOC in the Upper Oligocene, consistent with an increasing contribution of terrigenous OM up-section [8–9]. The regional continuity of the Maikop succession therefore does not imply uniform initial source-rock properties.

Broadly coeval organic-rich intervals in other parts of the region are more spatially discontinuous, although reduced continuity is not necessarily associated with lower initial OM quality. On the Romanian and Bulgarian shelves of the Black Sea, Maikop deposits contain 0.5–4.5 wt. % TOC and HI values of up to 600 mg HC/g TOC, whereas the Mezardere Formation in the southwestern part of the region shows an HI range of 3–744 mg HC/g TOC [10–11]. In the eastern Black Sea region, mean HI is approximately 278 mg HC/g TOC in the Lower Oligocene Pshekh interval and decreases to about 140 mg HC/g TOC in the Upper Oligocene [12–13]. The occurrence of high HI values in spatially restricted intervals shows that local preservation of hydrogen-rich OM was not confined to the regionally continuous Maikop system.

Further west, the localization of organic-rich Oligocene-Lower Miocene intervals becomes more pronounced. In the Central Paratethys, clayey-marly successions commonly contain approximately 0.5–1.0 wt. % TOC, generally within a range of 0.5–2 wt. %. In organic-rich intervals of the Tard Formation, TOC is 0.8–1.8 wt. % and locally reaches 4–4.5 wt. %

[14–15]. These values overlap the lower and intermediate parts of the ranges established farther east, despite the more localized distribution of organic-rich intervals.

Thus, regional differentiation during the Oligocene is expressed primarily in the spatial scale and continuity of organic-rich sedimentation rather than in a systematic decrease in maximum TOC or HI values. Regional continuity of the Maikop succession is accompanied by sectoral development of organic-rich intervals in the Black Sea region and their stronger confinement to individual formations and depocenters in the Central Paratethys. The regional trend therefore reflects a change in the spatial organization of organic matter accumulation rather than a simple gradient in initial source-rock potential.

Initial OM quality and degree of transformation

HI-Tmax relationships provide an additional basis for distinguishing initial OM quality from the degree of its subsequent transformation. High HI values occur in different parts of the Alpine-Caucasus region and do not show a direct relationship with the spatial continuity of source-rock intervals. In Maikop and Maikop-equivalent deposits of the Black Sea region, HI ranges from 3 to 744 mg HC/g TOC, whereas the most hydrogen-rich intervals show HI values of approximately 300–600 mg HC/g TOC at Tmax predominantly between 410 and 440 °C [10–11].

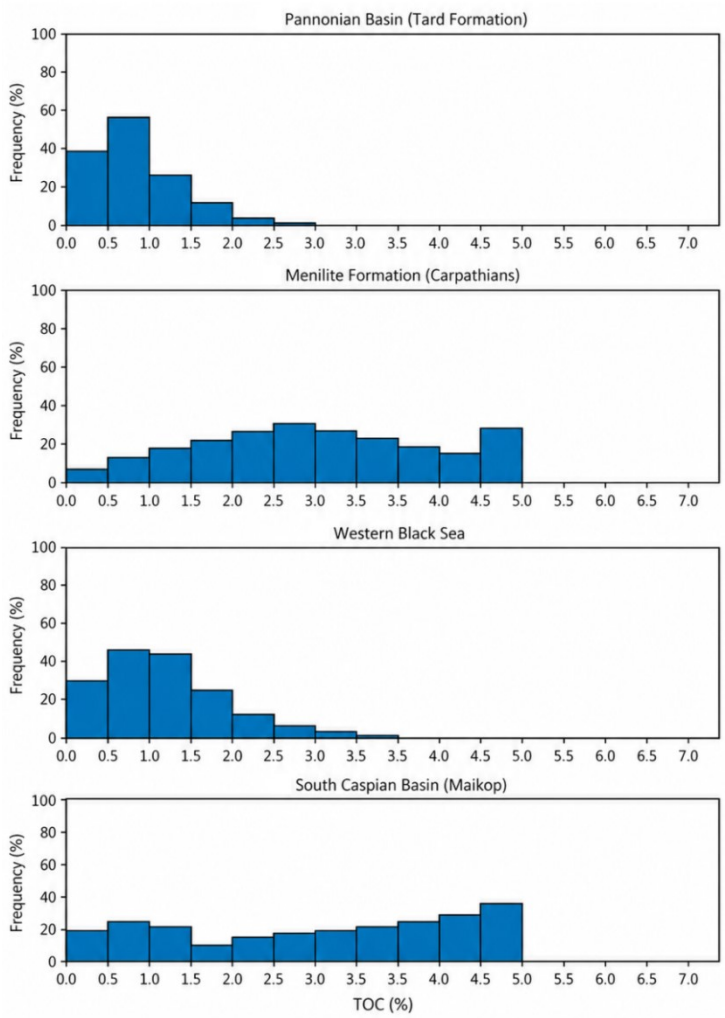


Fig. 1. TOC distribution in Oligocene-Lower Miocene source rocks of the Alpine-Caucasus region (South Caspian Basin, Western Black Sea, Central Paratethys, Menilite Formation (based on data from [5–7, 10–11, 13, 15–17])

In the Maikop system of the SCB, Tmax values are predominantly 410–450 °C and correspond to a wide range of HI values. The overall field includes both hydrogen-rich intervals with HI > 300–400 mg HC/g TOC and intervals characterized by substantially lower values. At Tmax > 460 °C, HI decreases sharply, indicating catagenetic depletion of the initial generative potential. Relatively low present-day HI values in deeply transformed source rocks therefore cannot be interpreted directly as evidence of poor initial OM quality.

The partial overlap of HI-Tmax fields across the region is particularly significant. High present-day HI values predominantly characterize intervals in which a substantial part of the initial hydrogen-rich potential has been preserved, whereas decreasing HI in more deeply buried and thermally transformed successions may reflect progressive realization of this potential during hydrocarbon generation. Maximum present-day HI values therefore do not correspond to the highest degree of source-rock potential realization.

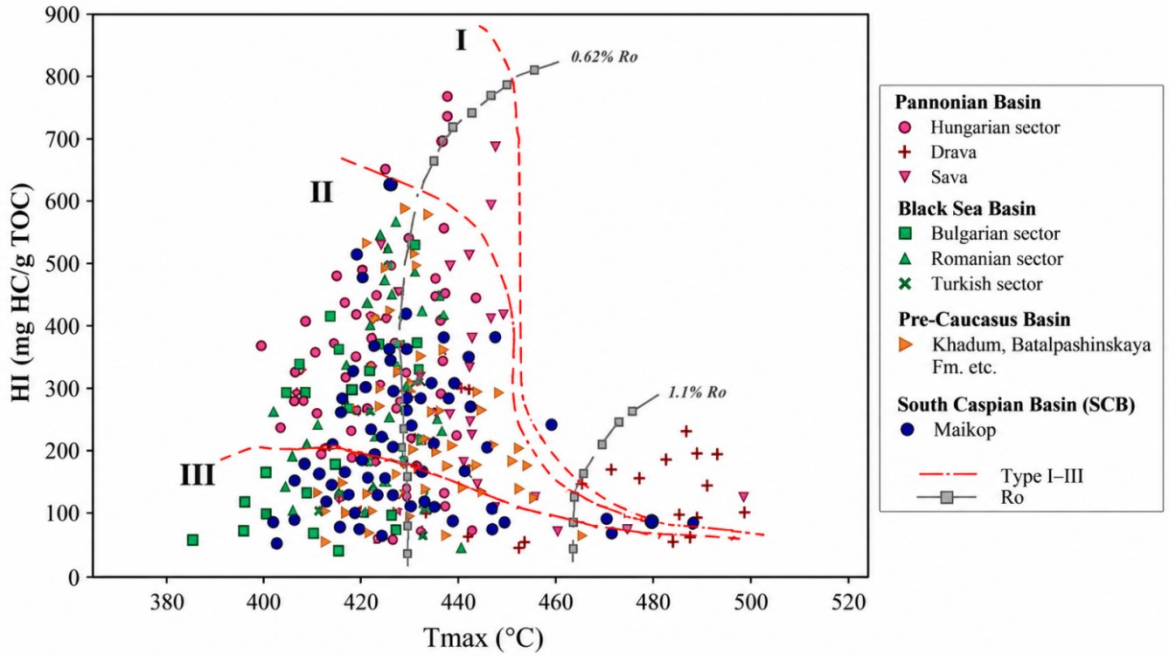


Fig. 2. Tmax-HI diagram of Maikop deposits and their stratigraphic equivalents in the Alpine-Caucasus region (South Caspian, Black Sea, Pannonian, Pre-Caucasus basins and the Outer Carpathians), based on Rock-Eval pyrolysis data [1, 5–7, 10, 13, 18–23]

This relationship is particularly important for the regional interpretation of the Maikop system. Its source-rock significance is determined by the combination of source-rock continuity, prolonged burial, and substantial catagenetic transformation. Regional comparison therefore requires consideration of the spatial extent and transformation history of source-rock intervals together with their present-day geochemical parameters.

Miocene spatial and stratigraphic differentiation

During the Miocene, source-rock development was characterized by increasing spatial and stratigraphic differentiation. Variations in hydrological regime, biological productivity, and terrigenous input were associated with the formation of organic-rich diatomaceous, diatomite-bearing, clayey, and marly intervals whose distribution was less regionally continuous than that of the principal Oligocene source-rock succession. The Miocene record therefore reflects not a uniform reduction in source-rock potential, but a redistribution of high-potential intervals within an increasingly heterogeneous depositional framework.

High initial potential is particularly characteristic of diatomaceous and other hydrogen-rich intervals. In the South Caspian part of the region, these form a distinct source-rock level above the Maikop succession. TOC reaches several weight percent in individual intervals, whereas HI reaches 700–770 mg HC/g TOC. High HI values combined with Tmax of approximately 417–420°C indicate substantial preserved potential in relatively immature OM [15]. In these intervals, high present-day HI therefore primarily reflects the initial quality and preservation of organic material rather than a high degree of generative-potential realization.

The same general relationship between high initial potential and its spatially restricted preservation is expressed farther west, although the absolute values and stratigraphic distribution are more variable. Farther west, Miocene source-rock characteristics become more spatially and stratigraphically variable. In the Central Paratethys, clayey-marly successions generally show lower and more variable source-rock potential, whereas organic enrichment is confined to particular stratigraphic intervals and depositional settings. Thus, high initial OM quality during the Miocene was not restricted to a single part of the Alpine-Caucasus region;

the principal regional difference lies in the increasing spatial and stratigraphic localization of high-potential intervals rather than in a systematic westward decrease in source-rock quality.

The Oligocene-Miocene transition therefore cannot be characterized as a progressive decline in source-rock potential; rather, it marks increasing spatial and stratigraphic differentiation of its distribution. The observed regional variability therefore results from different relationships between primary OM characteristics and subsequent burial and thermal histories. Variations in OM abundance, composition, and spatial continuity were established during sedimentation, whereas differences in burial depth, burial duration, and thermal regime controlled the subsequent degree of generative-potential realization. Their variable relationship across the Alpine-Caucasus region accounts for the contrasting present-day geochemical characteristics of broadly coeval source-rock intervals.

Conclusions

Oligocene-Miocene source rocks of the Alpine–Caucasus region display pronounced spatial and stratigraphic differentiation established during organic matter accumulation and further modified by subsequent thermal evolution. During the Oligocene, the principal regional contrast is expressed in the spatial continuity of organic-rich successions, from the regionally extensive Maikop source-rock system to sectorally and locally distributed organic-rich intervals. This change in spatial organization is not accompanied by a proportional decrease in maximum geochemical parameters.

Absolute TOC and HI values do not define a unidirectional regional trend. High TOC and HI values occur in different parts of the region, whereas the spatial extent, stratigraphic continuity, and degree of subsequent catagenetic transformation of the corresponding source-rock intervals differ substantially. Maximum TOC and HI values therefore cannot be regarded as direct indicators of the degree of source-rock potential realization. Maximum TOC and HI values therefore cannot be regarded as direct indicators of the degree of source-rock potential realization.

During the Miocene, spatial and stratigraphic differentiation becomes more pronounced. High-potential diatomaceous and diatomite-bearing intervals occur alongside clayey-marly and terrigenous successions of more moderate source-rock potential. High HI values in relatively immature Miocene intervals predominantly reflect preservation of the initial potential, whereas lower present-day HI values in deeply buried Oligocene source rocks may record its more advanced realization.

Thus, regional differentiation of Oligocene–Miocene source rocks across the Alpine–Caucasus region is controlled not by their assignment to individual basins or by absolute TOC and HI values, but by the relationship between source-rock continuity, initial OM quality, and the degree of subsequent generative-potential realization. The present TOC-HI-Tmax distribution reflects thermal overprinting of primary heterogeneity in organic matter accumulation and explains the occurrence of locally high geochemical parameters in source-rock systems that differ markedly in spatial extent, stratigraphic continuity, and degree of transformation.

References:

1. Feyzullayev A.A., Guliyev I.S., Tagiyev M.F. Source potential of the Mesozoic–Cenozoic rocks in the South Caspian Basin and their role in forming the oil accumulations in the Lower Pliocene reservoirs // Petroleum Geoscience, 7(4), 2001, 409–417.

2. Guliyev I.S., Tagiyev M.F., Feyzullayev A.A. Geochemical characteristics of organic matter from Maikop rocks of eastern Azerbaijan. Lithology and Mineral Resources, 36, 2001, 280–285.

3. Robinson A.G., Rudat J.H., Banks C.J., Wiles R.L.F. Petroleum geology of the Black Sea. Marine and Petroleum Geology, 13(2), 1996, 195–223.

4. Guliyev I.S., Feyzullayev A.A., Tagiyev M.F. Isotopic-geochemical characteristics of hydrocarbons in the South Caspian Basin. Energy Exploration & Exploitation, 15, 1997, 311–368.

5. Bechtel A., Movsumova U., Strobl S.A.I., Sachsenhofer R.F., Soliman A., Gratzer R., Püttmann W. Organofacies and paleoenvironment of the Oligocene Maikop Series of Angeharan (eastern Azerbaijan). Organic Geochemistry, 56, 2013, 51–67.

6. Bechtel A., Movsumova U., Pross J., Gratzer R., Ćorić S., Sachsenhofer R.F. The Oligocene Maikop Series of Lahich (eastern Azerbaijan): paleoenvironment and oil–source rock correlation. Organic Geochemistry, 71, 2014, 43–59.

7. Guliyev I.S., Mamedov P.Z., Feyzullayev A.A., Huseynov D.A., Kadirov F.A., Aliyeva E.H.-M., Tagiyev M.F. Hydrocarbon Systems of the South Caspian Basin. Baku: Nafta-Press, 2003, 206 p.

8. Langford F.F., Blanc-Valleron M.-M. Interpreting Rock-Eval pyrolysis data using graphs of pyrolizable hydrocarbons vs. total organic carbon. AAPG Bulletin, 74(6), 1990, 799–804.

9. Hudson S.M., Johnson C.L., Efendiyeva M.A., Rowe H.D., Feyzullayev A.A., Aliyev C.S. Stratigraphy and geochemical characterization of the Oligocene–Miocene Maikop Series: implications for the paleogeography of Eastern Azerbaijan. Tectonophysics, 451, 2008, 40–55.

10. Olaru R., Krézsek C., Rainer T.M., Ungureanu C., Turi V., Ionescu G., Tari G. 3D basin modelling of Oligocene-Miocene Maikop source rocks offshore Romania and in the Western Black Sea. Journal of Petroleum Geology, 41(3), 2018, 351–365.

11. Tulan E. Evaluation of diatom-rich Oligocene to Miocene hydrocarbon source rocks in the Paratethys. Doctoral Thesis, Technical University of Leoben, 2020.

12. Vincent S.J., Kaye M.N.D. Source rock evaluation of Middle Eocene-Early Miocene mudstones from the NE margin of the Black Sea. Geological Society, London, Special Publications, 464, 2018, 329–363.

13. Sachsenhofer R.F., Popov S.V., Ćorić S., Mayer J., Misch D., Morton M.T., Pupp M., Rauball J., Tari G. Paratethyan petroleum source rocks: an overview. Journal of Petroleum Geology, 41(3), 2018, 219–245.

14. Dolton G.L. Pannonian Basin Province, Central Europe (Province 4808) – Petroleum geology, total petroleum systems, and petroleum resource assessment. U.S. Geological Survey Bulletin 2204-B, 2006, 47 p.

15. Aghayeva V., Sachsenhofer R.F., van Baak C.G.C., Bechtel A., Hoyle T.M., Selby D., Shiyanova N., Vincent S.J. New geochemical insights into Cenozoic source rocks in Azerbaijan: implications for petroleum systems in the South Caspian region. Journal of Petroleum Geology, 44(3), 2021, 349–384.

16. Kotarba M.J., Więcław D., Koltun Y.V., Marynowski L., Kuśmierek J., Dudok I.V. Organic geochemical study and genetic correlation of natural gas, oil and Menilite source rocks in the area between San and Stryi rivers (Polish and Ukrainian Carpathians). Organic Geochemistry, 38(8), 2007, 1431–1456.

17. Körmös S., Sachsenhofer R.F., Bechtel A., Radovics B.G., Milota K., Schubert F. Source rock potential, crude oil characteristics and oil-to-source rock correlation in a Central Paratethys sub-basin, the Hungarian Palaeogene Basin (Pannonian Basin). Marine and Petroleum Geology, 127, 2021, 104955.

18. Badics B., Vető I., Sajgó C., Koncz I. Source rocks and petroleum systems of the Hungarian Pannonian Basin. Geological Society, London, Special Publications, 555, 2024.

19. Troskot-Čorbić T., Krizmanić K. Source rock distribution in the Drava Depression, Pannonian Basin, Croatia. 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021), 2021.

20. Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

21. Espitalié J., Laporte J.L., Madec M., Marquis F., Leplat P., Paulet J., Boutefeu A. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. Revue de l'Institut Français du Pétrole, 32, 1977, 23–42.

22. Espitalié J., Deroo G., Marquis F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Revue de l'Institut Français du Pétrole, 40, 1985, 563–579.

23. Ulmishek G.F. Petroleum geology and resources of the Middle Caspian Basin, Former Soviet Union. U.S. Geological Survey Bulletin 2201-A, 2001.

24. Milička J., Pereszlényi M., Šefara J., Vass D. Organic geochemical study in the junction zone of the Danube Basin and the Inner West Carpathians. First Break, 12(11), 1994, 571–574.

25. Hamilton W., Wagner L., Wessely G. Oil and Gas in Austria. Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, 92, 2000, 235–262.

26. Wagreich M., Pervesler P., Khatun M., Wimmer-Frey I., Scholger R. Probing the underground at the Badenian type locality: geology and sedimentology of the Baden-Sooss section (Middle Miocene, Vienna Basin, Austria). Geologica Carpathica, 59 (5), 2008, 375–394.

УДК 550.84

МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТИПИЗАЦИИ ТРЕХМЕРНОГО ГЕОХИМИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕДНО-ПОРФИРОВОЙ СИСТЕМЫ

Паничкин Илья Олегович

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела
ilja.pani4kin@yandex.ru

Аннотация. Предложен метод геометрической типизации трехмерного геохимического поля, основанный на локальной взвешенной квадратичной аппроксимации и анализе характеристик гессиана. Метод позволяет перейти от оценки только абсолютных содержаний геохимических компонентов к анализу локальной геометрии поля, его пространственной анизотропии и структурной упорядоченности. Апробация выполнена на данных медно-порфировой системы, включающих 44 759 проб и 9 геохимических индексов. В результате выделены 12 геометрических типов точек, установлены различия пространственной структуры поля по глубине и выявлено изменение преобладающих направлений. Композитная типизация, объединяющая геометрический тип, степень анизотропии и абсолютные содержания, позволила выделить зоны различной степени рудной минерализации.

Ключевые слова: геохимическое поле, геометрическая типизация, гессиан, пространственная анизотропия, медно-порфировая система, рудная минерализация, геометрия Нийенхейса.

Введение. Традиционная интерпретация геохимических данных преимущественно основана на анализе абсолютных содержаний компонентов и их пространственного распределения [1–5]. При этом близкие по величине содержания могут соответствовать участкам геохимического поля с различной пространственной структурой, что затрудняет выявление слабоконтрастных и сложнопостроенных рудоконтролирующих зон. Развитие методов математической геологии и анализа геометрии пространственных полей позволяет дополнить количественную оценку содержаний характеристиками локальной формы поля. В связи с этим актуальна разработка подхода к геометрической типизации трехмерного геохимического поля, учитывающего локальную кривизну, направленность и степень пространственной анизотропии.

Цель работы – разработка и апробация метода геометрической типизации трехмерного геохимического поля для выявления пространственных закономерностей рудной минерализации медно-порфировой системы.

Методы. Теоретической основой исследования являются представления о геометрической структуре пространственных полей, в том числе подходы геометрии Нийенхейса [6, 7]. Для анализа дискретного трехмерного геохимического поля в локальной окрестности каждой точки выполняется взвешенная квадратичная аппроксимация с анизотропной гауссовой весовой функцией. По коэффициентам аппроксимации определяется гессиан скалярного поля, собственные значения и собственные векторы которого характеризуют локальную кривизну и главные направления изменения поля. На основе сочетания знаков собственных значений и величины градиента выделяются 12 геометрических типов точек, включая максимумы, минимумы, седловины и склоновые участки. Для количественной оценки направленности структуры рассчитываются показатели линейной и плоскостной анизотропии [8]. Итоговая геометрическая типизация формируется путем совместного учета локального геометрического типа, степени анизотропии и абсолютных значений геохимических показателей.

Результаты. Метод апробирован на данных медно-порфировой системы, включающих 44 759 проб и 9 геохимических индексов. Распределение исходных геометрических типов при горизонтальном анализе представлено на рисунке 1. Седловинная составляющая включает стационарные седловины (типы 3–4) и седловинные склоно-

вые участки (типы 9–10). Для большинства индексов основной вклад в нее вносят именно типы 9–10, тогда как доли типов 3–4 невелики. Для семи из девяти индексов наибольшие доли приходятся на типы 9–11. Иная картина характерна для Periphery Index и Arsenic Halo, где резко преобладает тип 5 – около 42 и 41 % соответственно. Это показывает, что пространственная структура поля неоднородна и не может быть сведена к одному доминирующему геометрическому классу.

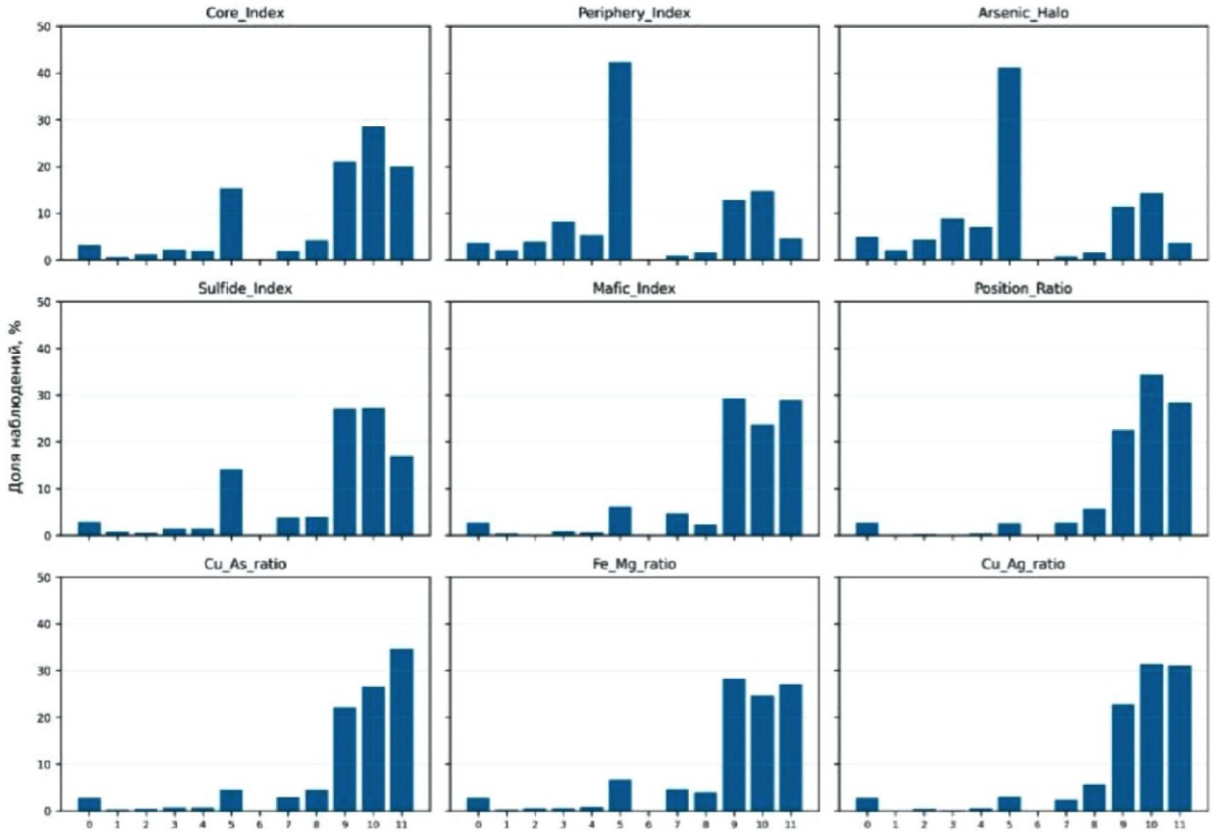


Рисунок 1 – Распределение исходных геометрических типов по геохимическим индексам при горизонтальном анализе

Сопоставление вертикальной и горизонтальной составляющих выявило существенные различия их пространственной организации: средний угол между преобладающими направлениями составил 52,6–56,5°. Установлено изменение ориентировки геометрических структур по глубине – от северо-западных направлений 328–340° в верхней части разреза до направлений 158–215° в нижней части. Композитная типизация, объединяющая геометрический тип, степень анизотропии и абсолютные содержания геохимических компонентов, позволила выделить зоны различной степени рудной минерализации. К рудным зонам отнесено 75 % выборки, в том числе 22,1 % – к категории рудного ядра.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что анализ локальной геометрии трехмерного геохимического поля позволяет выявлять пространственные особенности, которые не описываются только абсолютными значениями содержаний. Изменение преобладающих направлений геометрических структур по глубине свидетельствует о неоднородности пространственной организации исследуемой медно-порфировой системы и обосновывает необходимость учета трехмерной анизотропии. Сопоставление геохимических индексов показало наибольшее структурное сходство для отношений Cu/Ag и Cu/As: совпадение преобладающих направлений составило 60,3 %. Это указывает на близость их пространственной организации в пределах исследуемого объекта. Предложенная геометрическая типизация дополняет традиционный анализ абсолютных содержаний и обеспечивает формализованное выделение участков с различными характеристиками локальной геометрии и анизотропии.

Заключение. Разработан метод геометрической типизации трехмерного геохимического поля, основанный на локальной взвешенной квадратичной аппроксимации и анализе характеристик гессиана. Метод позволяет дополнить традиционную оценку абсолютных содержаний анализом локальной формы, направленности и пространственной анизотропии геохимического поля. Апробация на данных медно-порфировой системы показала возможность выделения различных геометрических типов, выявления изменений пространственной структуры по глубине и формирования зон различной степени рудной минерализации. Предложенный подход может использоваться как дополнительный инструмент при построении и интерпретации трехмерных геолого-геохимических моделей.

Список литературы:

1. Боровко Н.Н. Статистический анализ пространственных геологических закономерностей. – Л. : Недра, 1971. – 176 с.
2. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. – М. : Недра, 1977. – 572 с.
3. Вистелиус А.Б. Основы математической геологии. – Л. : Наука, 1980. – 389 с.
4. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. – М. : Недра, 1986. – 342 с.
5. Chilès J.-P., Delfiner P. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. 2nd ed. – New York : Wiley, 2012. – 726 p.
6. Nijenhuis A. X-forming sets of eigenvectors // Indagationes Mathematicae. – 1951. – Vol. 13. – P. 200–212.
7. Коняев А.Ю. Геометрия Нийенхейса и ее приложения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М. : Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2025. – 342 с.
8. Geometrical diffusion measures for MRI from tensor basis analysis / C.F. Westin, S. Peled, H. Gudbjartsson [et al.] // Proceedings of the 5th ISMRM. – Vancouver, 1997. – P. 1742.

УДК 622.276

АЛГОРИТМ ВЫБОРА СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СКВАЖИН

Петрушин Евгений Олегович

Цех по добыче нефти и газа № 4 Мурьяунское Месторождение НГДУ «Нижнесортымскнефть»
мастер по добыче нефти, газа и конденсата
eopetrushin@yahoo.com

Аннотация. В статье показано, что состав технологических жидкостей, длительность их воздействия и репрессия на пласт являются основными факторами, которые определяют размер зоны проникновения жидкостей в пласт и степень снижения его проницаемости. В большинстве случаев при заканчивании и глушении скважин в состав технологических жидкостей не вводятся необходимые добавки, обеспечивающие их совместимость с породой и флюидом пласта. Для таких жидкостей особенно важным становится длительность контакта с пластом. При выполнении текущих ремонтов время контакта обычно не превышает 5 сут., при заканчивании скважин время воздействия бурового раствора на пласт составляет 3–7 сут., а иногда – 20–30 сут. В течение такого длительного времени формируется значительная по размерам зона проникновения фильтрата, которая вызывает высокую степень снижения проницаемости пласта. Разработана методика, позволяющая оценивать эффективность первичного и вторичного вскрытия, которая также может применяться для оценки эффективности глушения скважин и различного вида обработок пласта (реагентной, кислотной и т.п.). Особенность методики состоит в том, что в ней учитывается совместное влияние перфорации и образовавшихся в пласте зон, причём имеется возможность определять степень изменения проницаемости в зонах.

Ключевые слова: размер зоны проникновения бурового раствора в пласт; длительность контакта бурового раствора с пластом; степень снижения проницаемости пласта; восстановление производительности скважин; коэффициент восстановления проницаемости; отношение фактической продуктивности скважины к её потенциальной продуктивности; схема выбора способа восстановления продуктивности скважин.

Восстановление производительности скважин подразумевает, что эксплуатационные характеристики пласта в призабойной зоне скважины ранее были каким-либо образом нарушены. При этом снижение коллекторских свойств пласта происходит чаще всего в результате воздействия на него технологических жидкостей при заканчивании или ремонте скважин. Как правило, отрицательное воздействие различных жидкостей на продуктивный пласт недооценивается, а это приводит к значительному снижению дебитов скважин и увеличению сроков их выхода на эксплуатационный режим после завершения работ.

Состав технологических жидкостей, длительность их воздействия и репрессия на пласт являются основными факторами, которые определяют размер зоны проникновения жидкостей в пласт и степень снижения его проницаемости. В большинстве случаев при заканчивании и глушении скважин в состав технологических жидкостей не вводятся необходимые добавки, обеспечивающие их совместимость с породой и флюидом пласта. Для таких жидкостей особенно важным становится длительность контакта с пластом. При выполнении текущих ремонтов время контакта обычно не превышает 5 сут., при заканчивании скважин время воздействия бурового раствора на пласт составляет 3–7 сут., а иногда – 20–30 сут. В течение такого длительного времени формируется значительная по размерам зона проникновения фильтрата, которая вызывает высокую степень снижения проницаемости пласта.

Отрицательное влияние зоны загрязнения пласта можно проследить на примере скважины № 158 нефтяного месторождения, расположенного на территории Ханты-

Мансийского автономного округа (таблица 1), которая примечательна тем, что в ней проведено 4 замера гидродинамических исследований после перфорации, т.е. имеется возможность увидеть работу скважины в динамике. Потенциальный дебит скважины по результатам обработки КВД от 31 марта 2023 года составляет 351 м^3/сут. (при депрессии 7 МПа). Непосредственно после перфорации в марте 2022 года из скважины получен фонтан нефти дебитом 160 м^3/сут. (при той же депрессии), т.е. зона ухудшенной проницаемости, образовавшаяся за 6 суток контакта бурового раствора с пластом, привела к снижению потенциального дебита скважины почти в 2 раза. По двум замерам КВД, проведённым в течение первого месяца после перфорации, скин-эффект равен 5–6; через 5 и 11 месяцев он снизился до 3 и 1,5 соответственно. И только через год после вскрытия пласта скважина какое-то время работала с дебитом 349 м^3/сут. Таким образом, всего 6 суток контакта пласта с несовместимым буровым раствором привело к двукратному снижению продуктивности скважины, а полная очистка образовавшейся зоны загрязнения произошла лишь через год.

Таблица 1 – Показатели по скважине № 158 нефтяного месторождения

Исходные показатели	Скважина 158
Объект	ЮВ-1
Проницаемость пласта, мкм^2	0,142
Пористость, доли ед.	0,19
Глинистость, доли ед.	0,10
Коэффициент анизотропий проницаемости	2
Радиус скважины, м	0,108
Радиус контура питания, м	100
Параметры бурового раствора	
Тип	глинистый (АКР)
Плотность, г/см^3	1,1
Фильтрация в нормальных условиях, см^3/30 мин.	5
Время контакта раствора с пластом, сут.	6
Перфорация	
Способ перфорации	депрессия
Тип перфоратора	ПКТ-89СМ
Плотность перфорации, отв./м	10
Глубина канала в мишени API, мм	620
Диаметр канала перфорации, мм	10
Сопоставление расчётных и фактических данных	
Коэффициент продуктивности, м^3/сут. · МПа:	
потенциальный	50,1
рассчитанный средний (после перфорации)	36,2
фактический	34,9

Известное утверждение о том, что в высокопроницаемом пласте, который легко очищается, можно не использовать совместимый с ним буровой раствор, не выполняется при их длительном контакте. Даже применение в этом случае перфоратора с глубиной каналов 620 мм не позволило устранить негативное влияние значительной по размерам зоны проникновения фильтрата бурового раствора. Таким образом, для обоснованного выбора способа восстановления продуктивности скважины необходимо знать радиус проникновения технологических жидкостей в пласт, а также степень снижения проницаемости коллектора и каким-либо образом оценить состояние пласта.

Разработана методика, позволяющая оценивать эффективность первичного и вторичного вскрытия, которая также может применяться для оценки эффективности глушения скважин и различного вида обработок пласта (реагентной, кислотной и т.п.). Особенность методики состоит в том, что в ней учитывается совместное влияние перфорации и образовавшихся в пласте зон, причём имеется возможность определять степень изменения проницаемости в зонах. Для количественной оценки состояния пласта используется показатель ОП – отношение фактической продуктивности скважины к её потенциальной продуктивности. Следует отметить, что проницаемость зон

может быть любой, как значительно ниже исходной проницаемости пласта, так и выше (например, при кислотной обработке).

Степень снижения проницаемости характеризуется коэффициентом восстановления проницаемости, который может определяться экспериментально или расчётным путём. В работах [1–3] приведена формула для расчёта коэффициента восстановления проницаемости β, полученная при анализе большого объёма экспериментальных данных по фильтрации наиболее распространённых буровых растворов в различных условиях и обеспечивающая широкий диапазон применения предлагаемой методики.

Коэффициент β зависит от проницаемости, пористости, глинистости пласта, депрессии при освоении, радиуса проникновения жидкости в пласт, её динамического напряжения сдвига и специальных свойств жидкости (межфазного натяжения на границе «жидкость – нефть», краевого угла смачивания и показателя увлажняющей способности), которые не всегда известны. В этом случае, используя средние значения неизвестных параметров, можно получить приближённую оценку, которая затем уточняется по результатам геофизических и гидродинамических исследований.

Хорошее совпадение расчётных и реальных данных подтверждено многими примерами, в частности, для скважины № 158, сопоставляя результаты расчётов с фактическими данными, можно определить время, в течение которого сказывается влияние зоны загрязнения (рисунок 1). Непосредственно после перфорации реальный дебит несколько выше расчётного после первичного вскрытия (фиолетовая линия). Это свидетельствует о том, что каналы перфорации ещё не очищены от породы. В течение двух месяцев каналы интенсивно очищались (фактический дебит – коричневая линия), и только через 6 месяцев началось расформирование зоны загрязнения и завершилось через год.

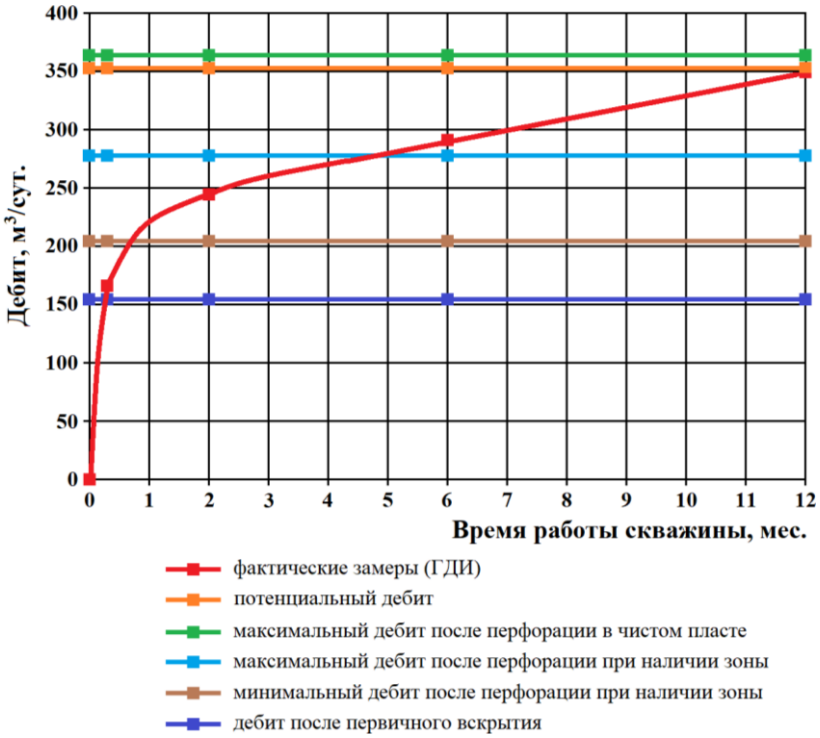


Рисунок 1 – Влияние неингибированного бурового раствора на продуктивность скважины № 158

На рисунке 2 приведена зависимость величины ОП от времени контакта жидкости глушения с пластом. При использовании для глушения незагущенных растворов радиус зоны проникновения их фильтратов за время ремонта может достигать 5–6 м (исходный скин-эффект пласта равен 0, зона расформирована, если исходный скин-эффект пласта > > 1, то радиус зоны проникновения значительно снижается). Коэффициент восстановления проницаемости и ОП для незагущенных систем близки к 0, в то время как для вязких систем (200 мПа · с) радиус зоны не превышает 1 м, а величина ОП = 0,6–0,8.

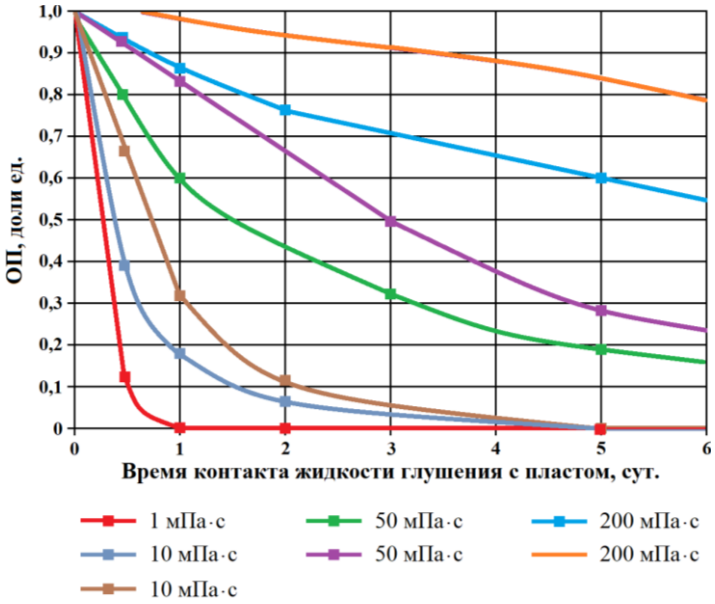


Рисунок 2 – Зависимость ОП от *времени* контакта пласта с *жидкостью* различной вязкости: красная линия, синяя линия, зелёная линия и голубая линия – пласт без перфорации; коричневая линия, сиреневая линия и оранжевая линия – параметры каналов перфорации: 12 отв./м, глубина 675 мм, диаметр 11 мм, фазировка 90°

Используя предложенную методику, можно оценивать практически любые варианты состояния пласта после первичного и вторичного вскрытия, глушения или различных обработок. Для того чтобы при расчёте ограничить число вариантов и исключить неэффективные, предлагается следующая схема выбора способа восстановления продуктивности скважин (рисунок 3).

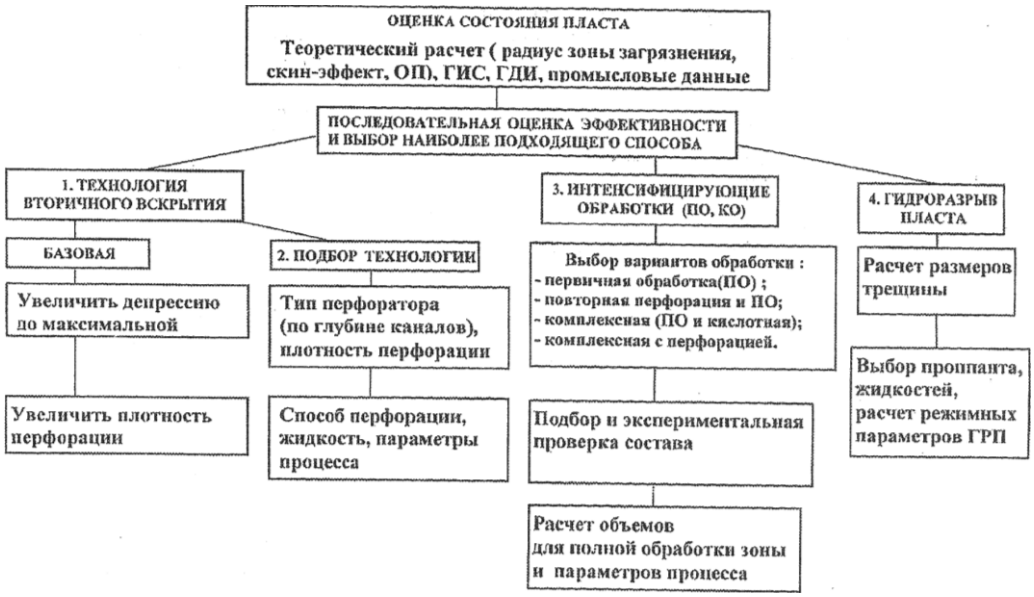


Рисунок 3 – Схема выбора способа восстановления продуктивности скважин

Ниже отражён анализ основных этапов схемы выбора способа восстановления продуктивности скважин с последовательной оценкой их эффективности и состояния продуктивного пласта.

Выявление неиспользованных резервов базовой технологии вторичного вскрытия

Определение необходимости увеличения плотности перфорации

Для этого вычисляются потенциальные возможности базового перфоратора – величина ОП в чистом пласте, зависящая только от плотности перфорации, размеров каналов, фазировки отверстий и анизотропии проницаемости пласта.

Если ОП > 1, т.е. обеспечивается совершенство вскрытия в чистом пласте, то увеличение плотности перфорации не имеет смысла, поскольку при этом ОП возрастает незначительно и не приводит к радикальному изменению ситуации.

Если ОП < 1, то определяется новая (минимально допустимая) плотность перфорации, при которой ОП > 1. Затем оценивается состояние пласта с зоной загрязнения при новой плотности перфорации.

Определение необходимости увеличения депрессии при освоении

В ряде случаев для очистки зоны загрязнения достаточно увеличить депрессию при освоении до максимально допустимой.

Если в базовой технологии депрессия при освоении ниже максимально допустимой, то необходимо провести расчёт для максимальной депрессии.

Если в результате предыдущих расчётов не удалось получить необходимое значение ОП (например, 0,9 или 1), переходят к следующему этапу.

Выбор технологии повторной перфорации

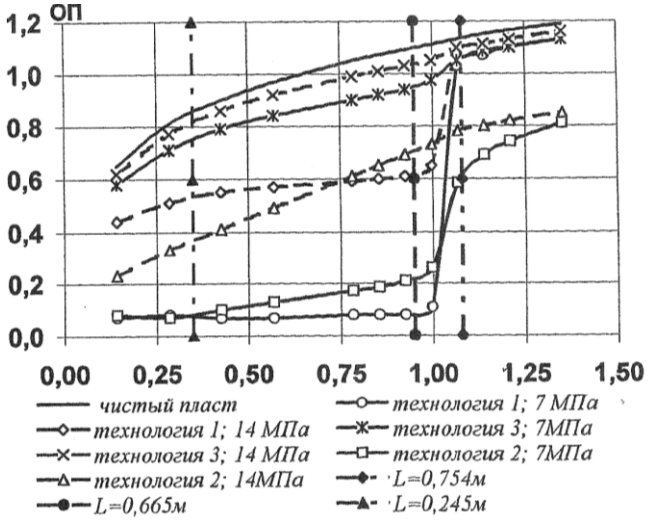
Выбор типа перфоратора и плотности перфорации

Перфоратор подбирается таким образом, чтобы глубина каналов перфорации на 30–50 % превышала толщину зоны. Если таких перфораторов нет, то контрольный расчёт проводится для перфоратора с максимальной глубиной прострела.

Плотность перфорации должна быть такой, чтобы обеспечивалось совершенство вскрытия в чистом пласте. Как правило, у высокоэффективных современных перфораторов это требование выполняется при плотности перфорации за 1 спуск.

Выбор способа перфорации

Обычно считается, что наиболее эффективна повторная перфорация при депрессии на пласт, поскольку влияние жидкости перфорации минимально или отсутствует. Но при использовании специальных жидкостей и выполнении соответствующих требований к технологии можно проводить повторную перфорацию и при репрессии на пласт. Специальные жидкости могут быть высоковязкие (нефильтрующиеся) или содержать необходимые добавки. На рисунке 4 показано влияние жидкости перфорации различного состава на ОП. В зависимости от суммарного радиуса зоны и выбранного типа перфоратора применение жидкости перфорации с добавками может дать различный эффект: ОП > 1 или ОП = 0,3–0,8.



Технология 1 – базовый буровой раствор, ингибированная жидкость перфорации;
Технология 2 – ингибированный буровой раствор, базовая жидкость перфорации $CaCl_2$;
Технология 3 – ингибированные буровые растворы и жидкость перфорации.

Рисунок 4 – Влияние времени контакта бурового раствора с пластом на величину ОП после перфорации на депрессии при различном соотношении глубины L канала перфорации и толщины h зоны проникновения фильтрата в пласт; $X = \frac{L}{h}$

Интенсифицирующие обработки

Тип обработки

Интенсифицирующие обработки условно разделены на первичную обработку и собственно кислотную обработку продуктивного пласта.

Как правило, интенсифицирующие обработки проводятся при давлениях, не вызывающих гидроразрыв пластов. В этих условиях при первичной обработке максимально достижимым результатом является восстановление исходной проницаемости пласта в ПЗС. Под первичной обработкой песчаников понимается воздействие, направленное на устранение материалов и минералов, снижающих проницаемость в приствольной зоне скважины.

Собственно кислотная обработка породы – это обработка с целью интенсификации притока после устранения кольматации ПЗС. Она включает в себя закачивание химически активной жидкости, которая, растворяя определённую часть пористой среды, увеличивает её проницаемость (исходную проницаемость пласта).

Оценка эффективности интенсифицирующих обработок

При успешно проведённой первичной обработке породы (проницаемость зоны полностью восстановлена) величина ОП будет зависеть от потенциальных возможностей перфораторов, которые использовались при вторичном вскрытии.

При успешной кислотной обработке степень возрастания проницаемости в обрабатываемой зоне характеризуется отрицательным значением скин-эффекта. Следует отметить, что величина скин-эффекта падает значительно быстрее под влиянием диффузионной кинетики, которая отмечается в известняках и доломитах, чем при поверхностной химической кинетике, наблюдаемой в песчаных породах.

Необходимо подчеркнуть, что эффективность обработки может быть достигнута при условии полной обработки зоны загрязнения и использовании для этого необходимых объёмов жидкости. Рассчитать объёмы жидкости без знания радиуса зоны загрязнения невозможно.

Выбор состава для первичной обработки

Основное требование к жидкости для *первичной обработки* – эффективно устранять нарушение эксплуатационных свойств пласта, увеличивать проницаемость и быть совместимой с породой пласта и пластовым флюидом. Совместимость подразумевает, что при контакте пласта и жидкости обработки не происходит снижение его проницаемости. Особенно это важно для песчаников, в которых могут происходить реакции, вызывающие осадкообразование.

Существуют общие рекомендации по устранению нарушений такого типа.

Водный барьер пытаются устранить снижением поверхностного натяжения между водой и нефтью или газом путём введения ПАВ и спиртов в комплексе с кислотой.

Удаление и диспергирование мигрирующих глин производится глинокислотой, состав которой зависит от минералогического состава породы пласта.

Гораздо более сложно устранить возникшие после воздействия полимерного раствора органоминералогические кольматирующие образования, которые являются результатом адсорбции отрицательно заряженных участков полимерных цепей на положительно заряженных участках рёбер глинистых частиц, мигрирующих в пласте или образующих цемент песчаных пород.

Выбор составов для кислотной обработки пластов

После проведения предварительной обработки песчаников, открывающей доступ химически активного состава к растворимым минералам породы, эффективность последующей кислотной обработки возрастёт.

Выбор состава для кислотной обработки песчаников зависит от общей химической активности минералов пласта при взаимодействии с кислотой. С минералогической точки зрения на химическую активность минерала влияют его химический состав и площадь поверхности, которые используются для определения потенциальной чувствительности минерала.

Выбор типа интенсифицирующей обработки

Выбор типа обработки производится на основании последовательных расчётов эффективности следующих вариантов (переход от варианта к варианту осуществляется, если не будет достигнута необходимая величина ОП, например, 0,9–1):

- обработка зоны загрязнения составом для первичной обработки, перфоратор базовый;
- при содержании в пласте минералов, растворимых в соляной кислоте, > 20 %;
- обработка зоны загрязнения составом для первичной обработки, затем HCl, перфоратор базовый;
- повторная перфорация (с большей глубиной каналов) при репрессии с одновременной реагентной обработкой;
- обработка зоны загрязнения составом для первичной обработки, затем обработка составом для кислотной обработки (глинокислотой), перфоратор базовый;
- повторная перфорация (с большей глубиной каналов) при репрессии с одновременной реагентной обработкой, затем обработка составом для кислотной обработки.

Практическая реализация двух последних вариантов достаточно трудоёмкая и связана со значительными материальными и временными затратами, а результат может оказаться ниже ожидаемого. Поэтому прежде чем рекомендовать их к применению, нужно оценить эффективность гидроразрыва пласта и выбрать экономически более выгодный вариант. Кроме того, в ряде случаев введение в пласт больших объёмов жидкости на водной основе противопоказано, и тогда наиболее эффективным способом восстановления продуктивности скважины является гидроразрыв пласта.

Гидроразрыв пласта

Гидроразрыв пласта является достаточно сложным процессом, требующим значительных материальных и трудовых затрат, которые должны компенсироваться существенным ростом потенциальной продуктивности скважины. При ГРП технологические жидкости нагнетаются в пласт с высокими скоростями (как правило, более 3 $м^3$/мин.), образуя трещины в породе, которые затем заполняются естественным (песок) или искусственным (проппант) расклинивающим материалом.

Эффективность проведённого ГРП зависит, главным образом, от длины и ширины закреплённой трещины, а также от проницаемости упаковки расклинивающего материала в трещине.

Теоретические значения ОП могут быть достигнуты при выполнении ряда требований, обеспечивающих успешное проведение операции ГРП. Прежде всего, осуществляется предварительный отбор скважин по следующим признакам:

- расстояние до ближайшей водонагнетательной скважины не менее 500 м (если используется режим ППД);
- расстояние по вертикали от продуктивного пласта до пласта, содержащего воду, более 10 м;
- обводнённость скважины менее 25 %;
- хорошее качество цементирования обсадной колонны;
- эффективная мощность пласта от 4 до 20–25 м;
- число одновременно обрабатываемых пропластков не более 3;
- предпочтительная проницаемость менее 0,03 $мкм^2$.

Затем проводится дальнейшая детальная оценка состояния пласта и скважины и проектирование процесса ГРП, включающее в себя выбор жидкости, расклинивающего материала и расчёт режимных параметров процесса.

Таким образом, данная методика позволяет теоретически подобрать наиболее эффективную технологию восстановления производительности скважин, не прибегая к дорогостоящим методам проб и ошибок.

Список литературы:

1. Комплекс технологий, обеспечивающий высокое качество заканчивания скважин / С.А. Рябоконь, А.И. Пеньков, А.К. Куксов [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 2. – С. 16–22.

2. Выбор бурового раствора и проектирование его свойств / С.А. Рябоконь, А.И. Пеньков [и др.] // Основные принципы выбора технологии, технических средств и материалов при строительстве и ремонте скважин: сборник трудов ОАО «НПО «Бурение». – Краснодар, 2002. – Вып. 7. – С. 3–14.

3. Рябоконь С.А., Бадовская В.И. Выбор способа восстановления производительности скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. – № 6. – С. 32–37.

4. Бушуева Е.П. Определение закономерности влияния фациальной обстановки на формирование фильтрационно-емкостных свойств коллекторов Когалымского месторождения // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сборник статей XIII Международной научно-практической конференции (20 марта 2018 года, г. Пенза): в 2 частях. – Пенза : Издательство «Наука и Просвещение», 2018. – Ч. 1. – С. 58–66.

5. Жарикова Н.Х., Кусова Л.Г. Комплексный анализ и оценка эффективности проведения гидравлического разрыва пласта в условиях терригенных пластов-коллекторов нефтяного месторождения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 135–156.

6. Колесов В.И. Анализ эффективности технологии ГРП при разработке Когалымского месторождения // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам LIV студенческой Международной научно-практической конференции (29 июня – 09 июля 2017 года, г. Новосибирск). – Новосибирск : Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2017. – С. 250–257.

7. Петрушин Е.О., Арутюнян А.С. Разработка методики по оптимизации исследований скважин с целью контроля за разработкой нефтегазоконденсатного месторождения // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2025. – № 4 (388). – С. 52–63.

8. Обоснование и выбор метода ограничения водопритока в скважины с горизонтальным окончанием в условиях низкопроницаемых терригенных коллекторов на примере эксплуатационного объекта $ЮС_2$ нефтегазоконденсатного месторождения / О.В. Савенок, Н.Х. Жарикова, Е.П. Чуйкова [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 1. – С. 193–205. – DOI: 10.18799/24131830/2025/1/4563

9. Чуйкова Е.П., Кусова Л.Г., Савенок О.В. Оптимизация системы поддержания пластового давления на нефтяном месторождении X Республики Башкортостан // Рассохинские чтения – 2025: материалы 17-й международной конференции (06–07 февраля 2025 года, г. Ухта). – Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2025. – С. 191–202.

10. Arutyunyan A.S., Petrushin E.O., Kusova L.G. Improvement of hydraulic facing technology by modeling permeability formed cracks for specific mining and geological conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series «International Science and Technology Conference «Earth Science»», 2022. – P. 042021. – DOI: 10.1088/1755-1315/988/4/042021

УДК 550.4 (262.8)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ ЮЖНОГО КАСПИЯ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Полетаев Александр Владимирович
Институт геологии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики
канд. геолог.-минерал. наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
avo1@mail.ru

Полетаева Елена Владимировна
Институт геологии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики
д-р философии по геолого-минералогическим наукам, доцент,
ведущий научный сотрудник
yelenapv@mail.ru

Аннотация. Основная цель исследований заключается в изучении и выявлении зон газогидратов по сейсмическим данным. В результате интерпретации сейсмических временных разрезов, секущих глубоководную зону, выделены границы с интенсивными формами записи, указывающими на аномальность этих границ. Суммарные объемы газа, рассчитанные для изучаемой площади, составляют 8,06 трил м^3 газа.

Ключевые слова: Южно-Каспийская впадина, газогидраты, сейсмические профиля.

При изучении верхней части разреза глубокопогруженных отложений Южного Каспия использованы 17 региональных сейсмических профилей (рисунок 1, а) и данные термодинамики региона [2]. По двум площадям Южного Каспия использованы данные скоростного анализа. Интерпретация данных производилась с помощью лицензионного программного комплекса Kingdom Suite 2017. Применение сейсмических методов при изучении газогидратов основано на наличии прямой связи между особенностями геологического строения зон газогидратов и распределением в среде физических параметров. Индикатором газогидрата на временном разрезе могут быть аномальные изменения сейсмических характеристик волн: амплитуда, частота, фаза, скорости продольных и поперечных волн. Наиболее широко применяемым сейсморазведочным признаком газогидрата является наличие на сейсмических записях отражающего сейсмического горизонта BSR [1, 3–5], а также ярких пятен [1, 5]. По этим критериям интерпретированы все временные разрезы, указанные на рисунке 1, и установлены верхняя и нижняя границы зон с отражениями, характерными для зон газогидратов.

На сейсмических профилях ВЧР характеризуется сложным волновым полем. Здесь выявляются разломы, грязевые вулканы, зоны с высоким содержанием газа, зоны газогидратов. При анализе сейсмических профилей (рисунок 1, б) можно проследить аналогичные аномалии, выделенные при изучении зон газогидратов на площади Апшерон [5] и в разных регионах мира [4, 5]. Ниже приведем описание сейсмических временных разрезов.

На рисунке 1, б (VII, 1) приведен фрагмент сейсмического временного разреза. Здесь морское дно прослеживается на времени от 0,4 до 0,5 с. Происходит последовательное погружение дна моря. В интервале от 0,6 до 0,75 с выделяются участки с характерными аномалиями, соответствующими зонам газогидратов. По разрезу в интервале от 0,7 до 1,0 с прослеживаются разломы разного направления и порядка. Ниже этих зон по данным анализа амплитуды записи и теоретических основ устанавливается зона со свободным газом. На рисунке 1, б (VII, 2) представлен участок зоны газогидратов. Как видно, в нижней части профиля четко выделяются зоны газогидратов, а также зоны разломов. В ряде случаев по обе стороны от разлома наблюдаются разные углы наклона осей синфазности.

На рисунке 1, б показано продолжение временного разреза по профилю VII, фрагмент 3. Дно моря фиксируется в интервале времени от 0,97 до 1,1 с. Зона газо-

гидратов прослеживается в интервале 1,15 до 1,35 с. В нижней части разреза выделяется серия разломов.

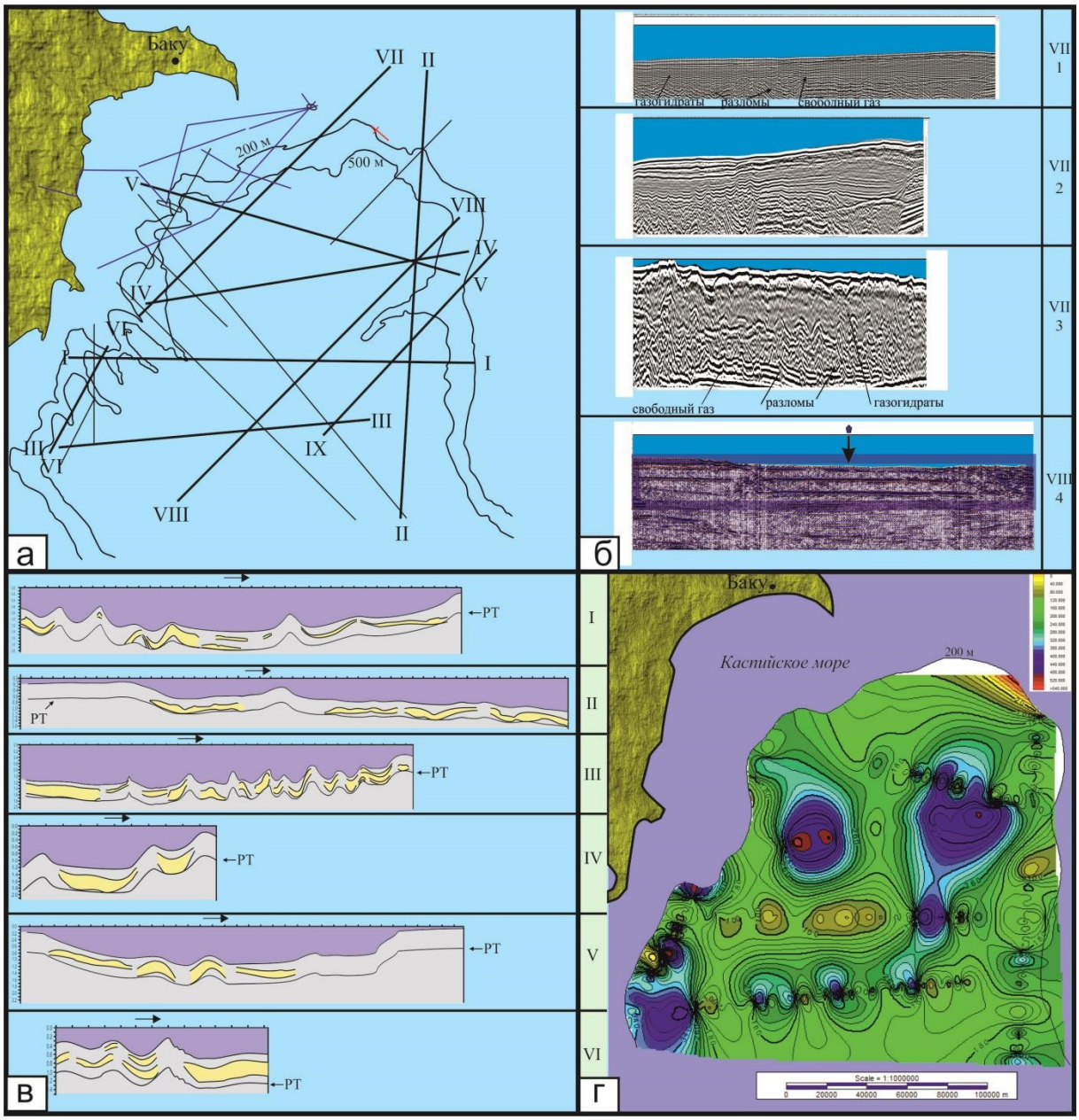


Рисунок 1 – Результаты интерпретации сейсмических данных в пределах глубоководной части Южного Каспия: а – расположение сейсмических профилей; б – фрагменты временных сейсмических разрезов по профилям VII и VIII; в – результаты интерпретации сейсмических данных с выделением зон газогидратов (желтый фон); г – карта мощностей зоны газогидратов

Большой интерес представляет фрагмент временного разреза по профилю VIII, 4. Стрелкой обозначено место отбора керна, содержащего газогидраты. По профилю установлено несколько протяженных горизонтов с интенсивной формой записи, соответствующих зонам газогидратов. Ниже этих зон не обнаружено присутствие разломов, выделенных ранее на других участках профиля VII, 2, 3. Однако в этих зонах выделяются аномалии, характерные для газа. В левой части профиля наблюдается прерывание осей синфазности горизонтов и некоторое изменение в форме записей.

На профиле I–I (рисунке 1, в) выделяется соответствующая газогидратам граница и характерные аномалии. В зоне структур, а также в зонах расположения грязевых вулканов эти границы выделяются менее четко. Газогидраты установлены не по всей площади, а имеют определённые зоны распространения. Здесь установлены значительные глубины моря от 500 до 800 м.

На профиле V–V (рисунок 1) в также прослеживаются аналогичные зоны. Однако здесь интервал интенсивных аномалий, соответствующих границам BSR, располагается в интервале глубин от 0,8 до 1,6 с. Граница раздела среды морская вода-порода создает границу кратных отраженных волн, зарегистрированную на двойном времени пробега. В связи с этим на временном разрезе наблюдаются волны как от границ зон газогидратов, так и от границы кратно-отраженных волн, образованных от границы морского дна.

На профиле IX–IX (рисунок 1) граница газогидратов маркируется в интервале времени от 0,4 до 0,9 с. В верхней части разреза ниже зон газогидратов наблюдаются разрывные нарушения и характерные газовые аномалии. Отражения от зон газогидратов выдержанные, четкие и при переходе в приподнятые участки прослеживаются фрагментарно.

Указанные зоны маркированы на разных интервалах профиля III–III (рисунок 1). Контрастность отражающих границ, расположенных на разрезе выше горизонта с газогидратами, меньше, чем расположенных под ним, то есть наблюдается некоторое «осветление» разреза. «Осветление» рассматривается как следствие уменьшения акустической контрастности отложений за счет присутствия гидратов в них. Далее фрагментарно установлены горизонты, форма записи которых указывает на их соответствие зонам газогидратов. На этом профиле структуры осложнены многочисленными разрывными нарушениями, наблюдаются аномалии, связанные с грязевулканической деятельностью, наличием газа.

Выделение границ газогидратов по профилям (I–IX) и дальнейшая их обработка в программном комплексе Kingdom Software 2017 позволила построить карты залегания границ газогидратов по площади и рассчитать мощность газогидратного слоя (рисунок 1, г). В центральной и юго-западной частях карты выделяются несколько зон с высокими мощностями отложений. В этих частях карты мощности отложений доходят более чем до 400 м, на фоне более пониженных участков от 180 до 260 м. Максимальные значения мощностей наблюдаются на структурах Д-13, Д-12 и между структурами Д-10 и Д-12. По сейсмическим данным в этой зоне по кровле продуктивной толщи установлены разломы. Максимум также отмечен и в зоне структуры Д-44. Разломы установлены и на других структурах, однако мощности слоя здесь незначительные – от 100 до 260 м. Расчет объемов УВ газов газогидратов осуществлен для всей глубоководной части Южного Каспия, ограниченной изобатой 200 м.

В результате интерпретации сейсмических временных разрезов, секущих глубоководную зону, выделены границы с интенсивными формами записи, указывавшие на границы аномальной зоны.

С целью оценки объемов газов в зонах газогидратов (GH) использована общепринятая формула:

$$GH = V \times D \times S \times F,$$

где V – объем породы, определенный по данным сейсмических методов исследований; D – средняя пористость в зоне газогидратов; S – степень емкостного заполнения пористости газогидратов, F – коэффициент расширения метана при разложении газогидрата (обычно принят как 160). S – значения выбраны и использованы исходя из анализа результатов, полученных на двух скоплениях газогидратов – Бездаг и Элм, а также из анализа данных [1–5].

Суммарные объемы газа, рассчитанные для изучаемой площади отложений, составляют 8,06 трил. $м^3$ газа.

Выводы

При изучении газогидратов глубокопогруженных отложений Южного Каспия использованы 17 региональных сейсмических профилей и данные термодинамики региона. По двум площадям Южного Каспия использованы данные скоростного анализа.

Анализ термодинамических данных показал, что в пределах Южного Каспия газогидраты могут быть установлены в интервале 0,2-2,2 с, выбранном для последующей интерпретации. Интерпретация данных производилась с помощью лицензионного

программного комплекса Kingdom Suite 2017 и по признакам выделения зон газогидратов на сейсмических записях отражающего сейсмического горизонта BSR, а также ярких пятен.

В результате интерпретации сейсмических временных разрезов, секущих глубоководную зону, выделены границы с интенсивными формами записи, указывающими на аномальность этих границ. Суммарные объемы газа, рассчитанные для изучаемой площади, составляют 8,06 трил. $м^3$ газа.

Список литературы:

1. Diaconescu C.C., Kieckhefer R.M., Knapp J.H. Geophysical evidence for gas hydrates in the deep water of the South Caspian Basin Azerbaijan // Marine and Petroleum Geology. – 2001. – V. 18. – P. 209–221.

2. Geothermal Atlas of Azerbaijan. Geological Institute of Azerbaijan National Academy of Sciences / Eds. A.A. Ali-Zadeh, S.A. Aliyev. – 2001. – 151 p.

3. Naresh Kumar Thakur, Sanjeev Rajput. Exploration of Gas Hydrates Geophysical Techniques. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 281 p.

4. Sloan D.E., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2007. – 721 p.

5. Kalachand Sain, Harsh Gupta. Gas hydrates in India: Potential and development. – India : Gondwana Research, 2012. – P. 112–131.

УДК 550.4 (262.8)

ГАЗОГИДРАТЫ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЮЖНОГО КАСПИЯ: ТЕМПЕРАТУРА И ДАВЛЕНИЕ

Полетаева Елена Владимировна
Институт геологии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики
д-р философии по геолого-минералогическим наукам, доцент, ведущий научный сотрудник
yelenapv@mail.ru

Полетаев Александр Владимирович
Институт геологии Министерства науки и образования Азербайджанской Республики
канд. геолог.-минерал. наук, доцент, ведущий научный сотрудник
avo1@mail.ru

Аннотация. Геологическое строение, геотермический градиент и батиметрия морского дна глубоководной части Каспийского моря указывают на возможность образования значительных объемов газогидратов. Цель исследования заключается в определении нижней границы формирования углеводородных газов газогидратов по данным фактических замеров температур и давления в скважинах.

Ключевые слова: Южно-Каспийская впадина, газогидраты, температура, давление.

Анализ опубликованных и неопубликованных материалов по газогидратам Каспийского моря показал, что в основном все работы базируются лишь на изучении скопления газогидратов Элм, Бождаг, площади Абшерон, а также термодинамических факторах региона (без учета реальных значений температуры и давления) с целью определения возможной зоны их скопления.

Теоретические основы формирования газогидратов опубликованы в статьях и монографиях разных авторов [1–8]. Газогидраты – твердые кристаллические вещества, так называемые газовые клатраты. Кристаллическая решетка клатратов построена из молекул воды, во внутренних полостях которых размещены молекулы газа, образующего гидрат. Известны три основные структуры газогидратов: I, II и H [1, 6, 8]. Процессы образования газогидратов начинаются с формирования центров кристаллизации на поверхности раздела газ-вода. Это может быть свободная плоская поверхность, поверхность микропузырька газа в объеме воды, поверхности капли и пленки воды сконденсировавшихся в объеме газа. Наиболее распространены массивные кристаллы газогидратов. Они формируются путем последовательной сорбции молекул газа и воды на растущей поверхности кристалла [3]. Морфологически выделено четыре основных вида газогидратов: мелковкрапленные, узловатые, слоистые, массивные. В петрографическом смысле в качестве породообразующего компонента газогидраты подразделяются на три типа: 1) гидрат – мономинеральная порода; 2) гидрат – главный породообразующий компонент (минерал); 3) гидрат акцессорный [1, 8].

В результате расхождения в значениях физических параметров, необходимых для образования газогидратов из отдельных компонентов газа, происходит фракционирование состава многокомпонентных природных газов как в гидратах, так и в остаточном свободном газе в зоне возможного гидратообразования. [1, 3, 5, 6, 8]. Начало процесса образования газогидратов определяется составом газа, состоянием воды, внешним давлением и температурой. Зависимость между давлением и температурой образования гидратов обычно изображается диаграммой гетерогенного состояния в координатах давления и температуры (PT) [1, 6, 8]. Впервые диаграмма гетерогенного равновесия была построена Г. Розебумом для гидрата хлора [1]. Ряд исследователей использовали эту диаграмму для описания зависимости равновесных условий образования гидратов газов в области умеренных давлений [6, 8]. В дальнейшем, по мере развития исследований, появились более уточненные диаграммы, теоретические выкладки и т.д. В настоящее время существует

несколько методов определения давления и температуры начала гидратообразования: а) графический; б) аналитический; в) графоаналитический; г) экспериментальный [4]. Для получения ориентировочных данных при определении условий начала образования гидратов используется графический метод.

Авторы [7] обобщили данные и провели статистические исследования химического и изотопного состава газов в 26 газогидратосодержащих областях из 21 географического региона. В результате установлено, что метан является самым распространенным компонентом, причем углекислый газ (CO_2) и сумма тяжелых углеводородов (C_{2+}) в газогидрате по частоте представлены в меньших объемах [7].

Для изучения возможных интервалов температур формирования скоплений газогидратов в пределах Азербайджанского сектора Южного Каспия использована методика [5, 8]. Метод является универсальным для определения формирования газогидратов и дает возможность рассчитать температуру формирования газогидрата, образованного для различных типов гидратов. Методические основы моделирования процессов гидратообразования реализованы в программном комплексе «Gas hydrate plus».

В работе использованы данные температур, замеренные в скважинах Южного Каспия. При выполнении исследований проведены работы по сортировке температур и давлений изучаемой территории. Сортировка данных производилась с целью установления глубины залегания отложений с температурой 24 °С, а также для изучения диапазона изменения давлений в верхней части разреза (ВЧР). Полученный объем данных (рисунок 1, 2) позволил проанализировать общую тенденцию изменения температуры по площади.

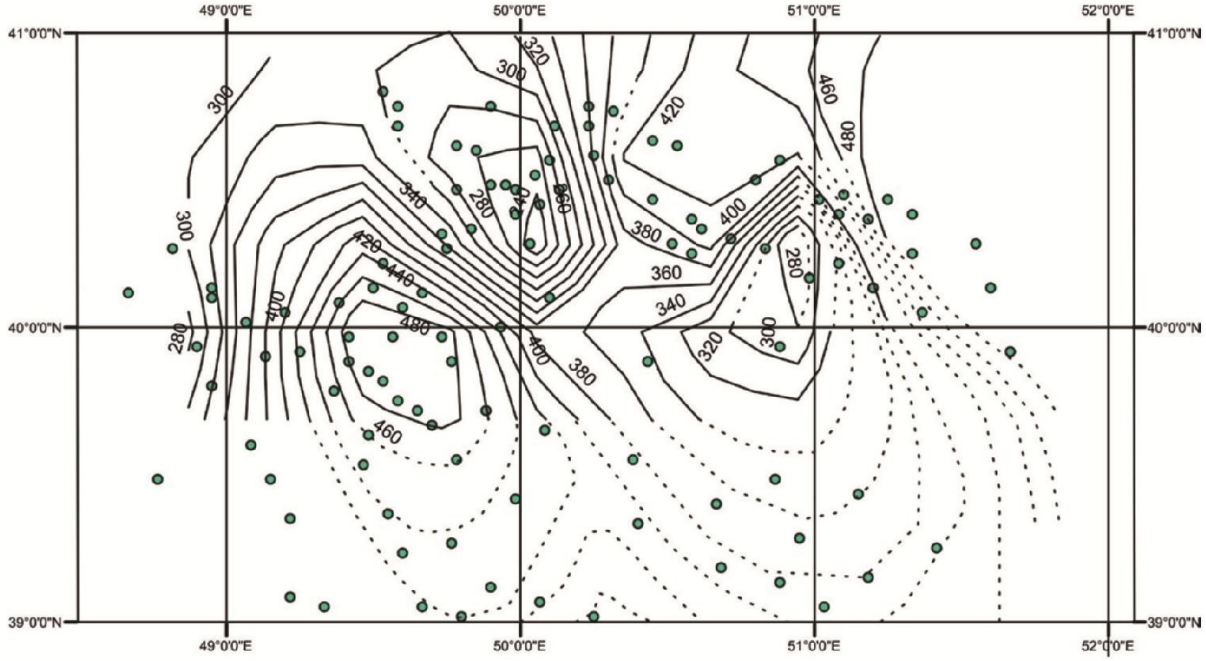


Рисунок 1 – Карта изменения глубины при фиксированной температуре 24 градуса

На рисунке 1 пунктирными линиями указаны данные распределения температур, которые восстановлены из анализа и сопоставления геологических структур и теплого поля в пределах изучаемых зон, а также подтверждены расчетными данными. Сплошными линиями показаны результаты интерполяции фактических данных. Анализ карты указывает, что температура в 24 °С в пределах Южного Каспия отмечается в интервале глубин от 280 до 480 м. Таким образом, анализ распределения температур в пределах Южного Каспия указывает, что максимальная глубина формирования газогидратов по метану может соответствовать глубине 480 м. Пластовое давление изучено на площадях Пираллахи, Нефт Дашлары, Гюнешли, Чираг, Азери. На площади Пирралахи на глубине 417 м в скважине 72 пластовое давление составляет 22 мПа (217,111 атм), а на 560 м – 38 мПа

(375,011 атм). В скважине 355 на глубине 416 м пластовое давление составляет 10 мПа (98,687 атм), а в скважине 456 пластовое давление равно 18 мПа (177,637 атм). Подобное изменение пластового давления наблюдается и по другим месторождениям и площадям. Анализ пластовых давлений по площади ВЧР указывает на колебание значений от 0,3 мПа (2,96061 атм) до 38 мПа (375,011 атм).

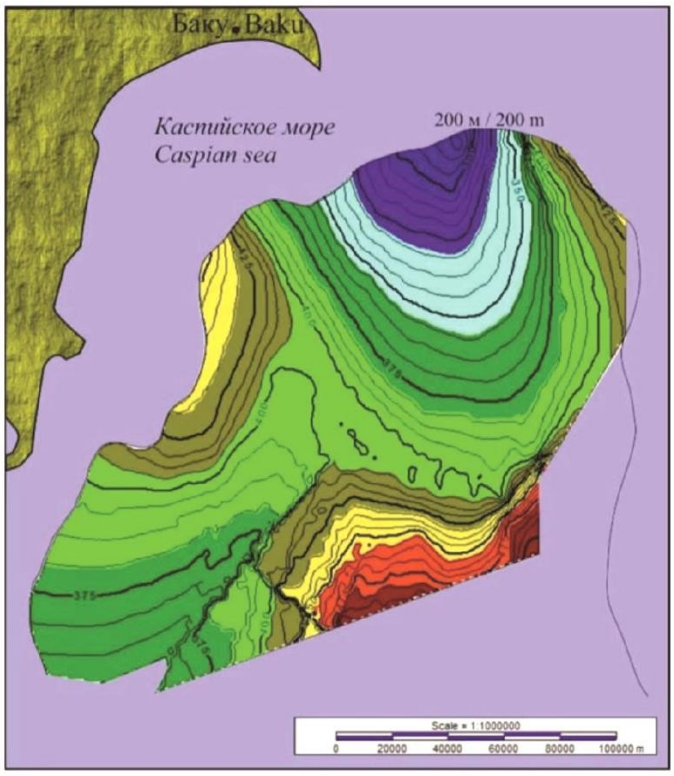


Рисунок 2 – Карта изменения глубины при фиксированной температуре 24 градуса (глубоководная часть Южного Каспия)

Расчеты термодинамического моделирования указали на возможность формирования газогидратов в пределах установленной зоны. На основе программного комплекса «Гидрат+» рассчитаны температура и давление, благоприятные для образования кристаллогидратов. За основу расчетов взяты анализы газов кристаллогидратов, отобранных на грязевых вулканах Бождаг и Элм (таблица 1, 2). Изменение температур на газогидратном скоплении Элм является аналогичным с таковым на Бождаге и варьируют в пределах от 1,62 до 24,16 °С. Данные расчеты были осуществлены для толщи морской воды.

Таблица 1. Моделирование термодинамического равновесия газогидратного скопления Бождаг

№	C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4	C_5	CO_2	Глубина Depth	*P*, атм/мПа P, atm/MPa	*t*, °C
2	77,1	18,2	2,4	0,4	1,1	0,33	0,45	150	15 (1,51996)	6,1695
3								200	20 (2,02661)	8,5317
4								250	25 (2,53326)	10,2670
5								300	30 (3,03991)	11,6980
6								350	35 (3,54657)	12,8830
7								400	40 (4,05322)	13,8730
8								450	45 (4,55987)	14,7030
9								500	50 (5,06652)	15,5020
10								550	55 (5,57318)	16,2740
20								1050	105 (10,6397)	20,0850
30								1550	155 (15,7062)	21,7450
40								2050	205 (20,7727)	23,0740
50								2550	255 (25,8393)	24,0180
51								2600	260 (26,3459)	24,1150
52								2650	265 (26,8526)	24,2120
53								2700	270 (27,3592)	24,3100

Таблица 2. Моделирование термодинамического равновесия газогидратного скопления Элм

№	C_1	C_2	C_3	iC_4	nC_4	CO_2	Глубина Depth	*P*, атм (мПа) *P*, atm (MPa)	*t*, °C
2	81,4	15,3	1,6	0,2	0,7	0,81	150	15 (1,51996)	5,2995
3							200	20 (2,02661)	7,6785
4							250	25 (2,53326)	9,4449
5							300	30 (3,03991)	10,9070
6							350	35 (3,54657)	12,1230
7							400	40 (4,05322)	13,1430
8							450	45 (4,55987)	14,0010
9							500	50 (5,06652)	14,8280
10							550	55 (5,57318)	15,6270
20							1050	105 (10,6397)	19,6480
30							1550	155 (15,7062)	21,4350
40							2050	205 (20,7727)	22,8520
50							2550	255 (25,8393)	23,8570
51							2600	260 (26,3459)	23,9600
52							2650	265 (26,8526)	24,0620
53							2700	270 (27,3592)	24,1640

Применение этих данных вместе с данными «Геотермальный атлас Азербайджана», отчетами Института Геологии и Геофизики, а также первичными данными, полученными Государственной Нефтяной Компанией Азербайджанской Республики, позволило проанализировать общую тенденцию изменения пластовой температуры в зависимости от глубины ниже данного слоя моря. Давление на глубинах воды 10, 100, 1000 м составляет 1 (0,10133 мПа), 10 (1,0133 мПа), 100 атм (10,133 мПа) соответственно, т.е. давление на каждые 10 м увеличивается на 1 атм (0,10133 мПа).

По приведенным данным пластовая температура на глубине 500 м изменяется от 23,0 до 27,8 °С, в среднем составляя 24,6 °С, что соответствует возможности образования кристаллогидратов. В связи с этим температура и давление изменяются по площади и разрезу, термодинамическое равновесие нарушается, что выражается в неравномерном распределении зон газогидратов как по площади, так и по разрезу.

Выводы

Изучение методологических основ и опубликованных работ по газогидратам позволило провести анализ фазовых диаграмм гидратообразования. Анализ методических приемов интерпретации газогидратов показывает, что глубина их формирования изменяется в довольно широких пределах, но ограничена температурой в 24 °С. Рассмотрены фактические данные распределения температуры и давления в пределах Южного Каспия. Построена карта изменения глубины при фиксированной температуре 24 °С. Рассчитано термодинамическое равновесие для газов двух газогидратных скоплений – Бождаг и Элм. Скопления газогидратов в акватории Южного Каспия характеризуются неравномерным распределением в породах. Положение их определяется неоднородностью температурного поля и давления по площади и разрезу.

Список литературы:

1. Бык С.Ш., Фомина В.И. Газовые гидраты // Успехи химии. – 1968. – Т. XXXVII. – № 6. – С. 1097–1135.

2. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М. : Недра, 1992. – 236 с.

3. Макагон Ю.Ф., Хольсти Дж.С. Вискретные кристаллы гидраты // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII. – № 3. – С. 43–48.

4. Якуцени В.П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и газовые ресурсы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 1–24.

5. Carroll J. Natural Gas Hydrates. Second ed. – Boca Raton : CRC Press, 2008. – 248 p.

6. Kalachand Sain, Harsh Gupta. Gas hydrates in India: Potential and development. – India : Gondwana Research, 2012. – V. 22. – P. 645–657.

7. Milkov A.V., Sassen R. Economic geology of offshore gas hydrates accumulations and provinces // Marine and Petroleum geology. – 2002. – V. 19. – P. 1–11.

8. Sloan D.E., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 721 p.

УДК 504.4.054

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ВО ВЗВЕШЕННОМ ВЕЩЕСТВЕ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ В РАЙОНЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Радомская Валентина Ивановна

Институт геологии и природопользования Дальневосточного отделения Российской академии наук
канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник
radomskaya@ascnet.ru

Аннотация. Обобщены результаты изучения взвешенных веществ в природных водотоках района деятельности горнопромышленного комплекса рудника Пионер. Показано, что взвешенные частицы выступают коллектором загрязняющих веществ и обеспечивают их перенос вдоль русла рек. Концентрации взвешенных твёрдых частиц варьируют от 5 до 5010 мг/дм³ при среднем значении 1300 мг/дм³; максимум отмечен для ручья Безымянный, минимум – для ручья Пятиверстный. Химический состав взвеси в целом имеет терригенное происхождение, однако выявлены обогащение Mn, Co, Cu, Zn, Mo, Cd и Bi, а также локальные аномалии As, Sb.

Ключевые слова: взвешенные вещества, золоторудное месторождение, коэффициенты обогащения, тяжёлые металлы.

Малые водотоки в районах разработки золоторудных месторождений испытывают комплексную техногенную нагрузку. Одним из наиболее информативных компонентов водных экосистем при оценке такой нагрузки является взвешенное вещество, поскольку взвесь работает как природный накопитель загрязняющих компонентов. В отличие от растворённых форм, взвесь менее подвижна в геохимическом отношении, но именно она часто определяет пространственное распределение загрязняющих элементов в русловой сети.

Район золоторудного месторождения Пионер расположен в Приамурье и характеризуется длительной историей горнопромышленного освоения. Здесь сочетаются природные источники рассеяния вещества (разрушение горных пород, эрозионные процессы, сезонная динамика стока) и техногенные факторы: карьеры, отвалы, хвостохранилища, промышленные площадки. В таких условиях важно оценить не только валовые концентрации элементов во взвеси, но и их обогащение относительно фоновых геохимических уровней.

Цель работы: изучить распределение тяжёлых металлов и металлоидов во взвешенных веществах малых водотоков района золоторудного месторождения Пионер, выявить уровни их обогащения и определить приоритетные загрязнители.

Расположение точек отбора проб представлено на рисунке 1. Точки отбора проб воды: 2–4, 10, 19, 23 относятся к р. Улунга (2 – на рудном поле, 3 – водоем на месте старых россыпных разработок, 19 –верховье, 23 – вне санитарно-защитной зоны), точка 11 – руч. Безымянный, точка отбора 20 – руч. Пятиверстный. Массу взвешенных частиц в воде определяли **гравиметрическим методом. С**одержание элементов во взвешенных осадках определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в ИПТМ РАН.

Концентрация взвешенных частиц в природных водотоках месторождения Пионер изменялась в диапазоне от 5 до 5010 мг/дм³ при среднем значении 1300 мг/дм³. Максимальный показатель (5010 мг/дм³) зафиксирован в ручье Безымянный, минимальный – в ручье Пятиверстный. Сравнение средних содержаний петрогенных элементов во взвеси с их концентрациями в осадочной оболочке континентов (по Н.А. Григорьеву) [1] показывает дефицит Mg, Ti и Fe, а также избыток Mn (таблица 1). Средние коэффициенты концентраций других элементов в основном находятся около 1 или ниже. Исключение составляет As, его средний коэффициент концентрации превышает 3 единицы. Максимальные коэффициенты концентрации отмечены для As – 21, Bi – 4,3, Pb – 3,2. Однако такие значения встречались локально, в границах горнодобывающего предприятия.

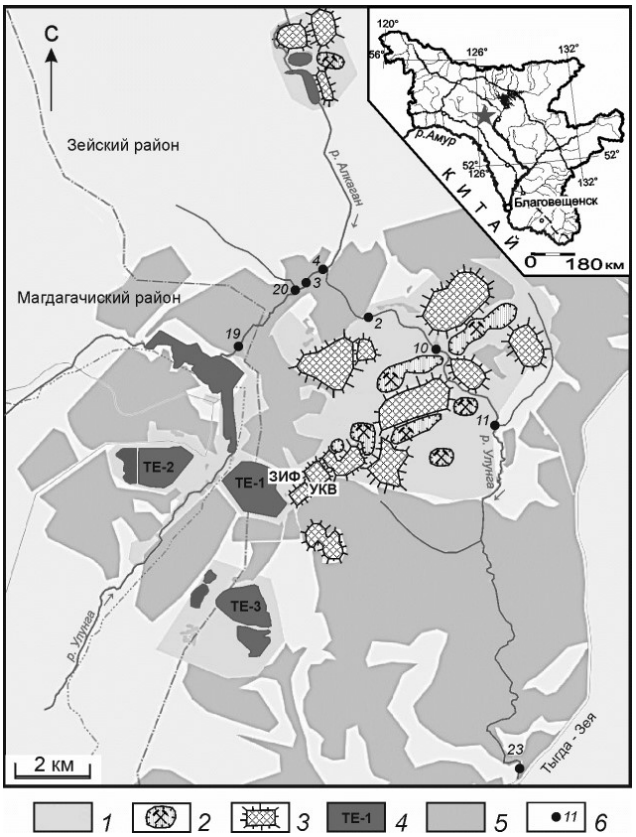


Рисунок 1 – Карта-схема золоторудного месторождения Пионер (*1* – промышленные площадки; *2* – карьеры; *3* –отвалы; *4* – технологические емкости; *5* – смешанный лес; *6* – точки отбора проб; ЗИФ – золотоизвлекательная фабрика; УКВ – участок кучного выщелачивания)

Таблица 1 – Усредненный химический состав взвешенных веществ в районе деятельности горнопромышленного комплекса рудника Пионер, в мг/кг (содержание взвешенных веществ в г/дм^3)

Элемент	Точки отбора							Осадочные породы [1]
	19	3	4	2	10	23	11	
Mg	5809	6461	3210	14100	15416	4346	9440	18300
Al	65071	57468	42772	85205	89366	35766	65956	64400
Ti	2126	1918	2267	4792	4173	2342	2861	3830
Mn	2174	1446	360	941	1107	1386	359	730
Fe	29556	17812	26735	49070	51404	26360	30968	35400
V	54,5	48,1	53,8	131	119	54,4	75,0	100
Cr	59,4	65,2	77,5	188	193	80,7	96,3	78,1
Co	18,9	12,5	8,5	17,8	21,6	26,2	9,0	14
Ni	15,8	19,7	27,5	48,1	60,9	39,7	24,0	38
Cu	11,8	16,2	28,4	64,4	53,6	42,1	30,8	31
Zn	49,3	57,9	124	127	121	166	64,8	69
As	9,9	5,3	26,3	74,1	133	52,6	140	6,80
Mo	1,2	0,84	1,3	3,5	2,6	3,1	2,7	1,53
Cd	0,074	0,11	0,17	0,18	0,18	0,83	0,062	0,78
Sb	2,5	2,8	6,2	9,8	15,2	4,3	11,1	8,90
W	1,2	1,2	1,4	3,6	2,7	1,4	2,2	1,88
Pb	22,3	22,1	13,1	37,9	38,9	15,1	32,9	12
Bi	0,25	0,25	0,45	0,99	0,93	0,34	0,84	0,23
Th	5,0	3,7	7,0	8,2	7,8	5,5	6,3	9,1
U	1,3	1,0	1,8	2,7	2,5	2,4	1,6	2,9
Взвешенный осадок	1,32	2,13	0,07	1,10	0,70	0,09	5,01	

Для определения происхождения взвешенного материала использовались коэффициенты обогащения (EF), нормированные на Al:

$$EF = (Cx/CAl)взв/(Cx/CAl)кора,$$

где в числителе отношение концентрации элемента (Cx) к Al в пробе взвеси, а в знаменателе аналогичное отношение средних содержаний в верхней части континентальной коры по Н.А. Григорьеву.

По величине EF выделяют пять категорий: EF < 2 – минимальное обогащение, отсутствие или слабое загрязнение; EF = 2–5 – умеренное обогащение и загрязнение; EF = 5–20 – значительное обогащение и загрязнение; EF = 20–40 – очень высокое обогащение и загрязнение; EF > 40 – экстремальное загрязнение.

В проанализированных пробах взвеси Cr, Ni, Ti, V, Fe, W, Th и U имели EF < 2. Для Mn, Co, Cu, Zn, Mo, Cd и Bi значения EF составили от 2 до 5, что указывает на умеренное обогащение взвеси этими элементами. Вероятно на высокий природный фон этих элементов [2] наслаивается техногенная компонента. Высокое содержание Mn, является одной из основных характеристик вод и почв Приамурья [3] и связано с повышенным региональным геохимическим фоном.

Средние значения EF выше 5 получены для As (14), Sb (11), что свидетельствует о загрязнении. Для As, Sb высокие содержания во взвеси обусловлены деятельностью горнодобывающего комплекса. Эти элементы можно рассматривать как приоритетные загрязнители на данном месторождении.

В порядке убывания максимального коэффициента обогащения элементы образуют следующий ряд: As (29), Sb (16), Zn (4,7), Mo (4,3), Mn (3,8), Co (3,3), Bi (3,3), Cd (2,8), Cu (2,3).

Таким образом, приоритетными загрязнителями взвешенных веществ следует считать As и Sb; в меньшей степени Zn, Mo, Mn, Co, Bi, Cd и Cu. Для контроля состояния водотоков необходим мониторинг взвеси, особенно в тёплый сезон, когда формируется основная часть стока и переноса загрязняющих веществ.

Список литературы:

1. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург : УрО РАН, 2009. – 382 с.

2. Оценка геохимического состава почвенно-грунтового покрова техногенно измененной территории золоторудного месторождения Пионер (Верхнее Приамурье) / В.И. Радомская, Л.М. Павлова, Н.В. Моисеенко [и др.] // Геохимия.– 2025. – № 2. – С. 165–186.

3. Микроэлементы в экосистемах Приамурья / В.А. Доровских, Т.В. Заболотских, С.А. Мусина. – Благовещенск, 2006.– 155 с.

УДК *553.041 (476)*

О ВКЛАДЕ ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА-ЮГРЫ В ДОБЫЧУ НЕФТИ И ГАЗА В РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI В.

Солодовников Александр Юрьевич

Тюменское отделение «СургутНИПИнефть»
д-р географ. наук, доцент, начальник научно-исследовательского отдела проектирования подземных объектов водоснабжения и экологии
sa100365@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается ресурсный потенциал нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в первой четверти XXI в. Приведены сведения о количестве месторождений, числящихся на государственном балансе, в том числе по типу флюида. Дана характеристика запасов углеводородного сырья по автономному округу и самым крупным месторождениям. Показаны объёмы добычи нефти и газа за 2001–2025 гг. и в сравнении с общероссийскими показателями.

Ключевые слова. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, запасы, нефть, газ, месторождения, добыча, недропользователи.

Как известно Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО-Югра) является самым крупным нефтедобывающим регионом страны и одним из крупнейших в мире. На его территории на 01.01.2023 г. с подтверждением в государственном балансе нефти, газа и конденсата открыто 484 месторождения углеводородного сырья, из которых: нефтяных – 421 (87 %), нефтегазоконденсатных – 23 (4,8 %), газовых – 18 (3,7 %), газонефтяных – 17 (3,5 %), газоконденсатных – 5 (1 %) [1]. Месторождения открыты на больше части территории автономного округа.

Ресурсная база месторождений огромна. По данным центра недропользования ХМАО-Югры, МПР и Экологии РФ, извлекаемые запасы нефти по всем категориям на начало 2023 г. составляют 11,3 млрд т [1-2], газа – 976,7 млрд м^3 и 504 млрд м^3 соответственно. Крупнейшими по запасам являются Самотлорское и Приобское месторождения (таблица 1).

Таблица 1 – Крупнейшие месторождения ХМАО-Югры, содержащие нефть [2]

Месторождение	Тип по флюиду	Запасы категорий, млн т	
		$АВС_1$	$В_2С_2$
Тайлаковское	Нефтяно	130,1	29,9
Малобалыкское	Нефтяное	152,6	24,0
Фёдоровское	Нефтегазоконденсатное	173,6	31,3
Приразломное	Нефтяное	211,6	160,3
Красноленинское	Нефтегазоконденсатное	560,2	582,7
Самотлорское	Нефтегазоконденсатное	808,3	21,7
Приобское	Нефтяное	1 326,5	275,8

Добыча нефти на территории округа ведётся с 1960 г., промышленная – с 1964 г., газа – с 1963 г. За время эксплуатации месторождений на его территории было добыто 13,2 млрд т нефти [3], газа за постсоветский период (1992–2025 гг.) – 969,3 млрд м^3 [3–6]. По количеству добытой нефти округ занимает 1 место в России, газа – 3 после ЯНАО и Иркутской области (по итогам 2025 г.).

В начале XXI в. ХМАО-Югра продолжает оставаться крупнейшим нефтегазодобывающим регионом страны. За первую четверть 3-го тысячелетия на его территории было добыто 6 млрд т нефти и почти 800 млрд м^3 газа. На долю автономного округа пришлось около половины добычи нефти страны и менее 5 % – газа. Подавляющая часть углеводородов была добыта вертикально-интегрированными компаниями, число которых в настоящее время насчитывает 9. Кроме них добычу нефти и газа ведут около 2-х десятков независимых недропользователей.

Таблица 2 – Вклад ХМАО-Югры в добычу углеводородов России в 2001–2025 гг. [3–7]

Год	ХМАО-Югра				Россия			
	нефть с газовым конденсатом		газ		нефть с газовым конденсатом		газ	
	млн т	%	млрд м^3	%	млн т	%	млрд м^3	%
2001	194,2	55,8	26,9	4,6	348,1	100,0	581,2	100,0
2002	209,9	55,3	27,0	4,5	379,6	100,0	595,4	100,0
2003	233,1	55,3	29,5	4,8	421,3	100,0	620,3	100,0
2004	255,8	55,7	26,3	4,2	458,8	100,0	633,5	100,0
2005	268,0	57,0	27,5	4,3	470,0	100,0	641,0	100,0
2006	275,6	57,4	29,3	4,5	480,5	100,0	656,1	100,0
2007	278,6	56,7	28,4	4,3	491,3	100,0	65461	100,0
2008	277,6	58,9	30,0	4,5	488,5	100,0	664,8	100,0
2009	270,6	54,7	31,1	5,3	494,3	100,0	582,9	100,0
2010	266,0	40,0	31,4	4,7	505,1	100,0	665,5	100,0
2011	263,2	38,3	31,4	4,6	511,4	100,0	687,5	100,0
2012	260,6	50,3	32,3	4,8	518,0	100,0	671,5	100,0
2013	254,2	48,6	33,0	4,8	523,3	100,0	684,0	100,0
2014	250,2	47,5	32,2	4,9	526,7	100,0	654,2	100,0
2015	242,8	45,5	32,0	5,0	534,0	100,0	645,9	100,0
2016	239,2	43,7	35,5	5,4	547,5	100,0	652,6	100,0
2017	234,6	43,0	33,9	4,8	546,8	100,0	704,1	100,0
2018	235,9	43,1	34,3	4,6	555,9	100,0	741,0	100,0
2019	235,3	42,0	34,7	4,6	560,3	100,0	758,1	100,0
2020	209,7	40,9	32,4	4,5	512,8	100,0	712,9	100,0
2021	214,1	40,8	31,9	4,0	524,5	100,0	783,1	100,0
2022	222,8	42,3	31,0	4,6	527,3	100,0	679,6	100,0
2023	216,0	40,7	29,4	4,6	530,6	100,0	659,2	100,0
2024	204,6	39,7	28,1	4,1	516,0	100,0	684,9	100,0
2025	202,9	39,6	27,2	4,1	512,0	100,0	662,7	100,0
Всего	6 011,5	48,2	796,1	4,8	12 484,6	100,0	16 676,1	100,0

Основной вывод

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что несмотря на более чем 60 летний период добычи углеводородов, недра ХМАО-Югры всё ещё обладают огромным нефтегазовым потенциалом, востребованность которого сохранится многие десятилетия.

Список литературы:

1. Недропользование в Ханты-Мансийском автономном округе-Югре в 2022 г. – Тюмень – Ханты-Мансийск : Издат. дом «ИздатНаукаСервис», 2023. – 224 с.

2. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 г. Государственный доклад МПР и Экологии РФ. – Москва : ООО «Минерал-Инфо», 2023. – 640 с.

3. Об итогах социально-экономического развития Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за 2025 г. Распоряжение губернатора ХМАО-Югры от 20.05.2026 № 153-рп.

4. Солодовников А.Ю. География Тюменской области : нефтяная и газовая промышленность: монография. – Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2020. – 440 с.

5. Об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югры в 2021 г. // Доклад службы по контролю и надзору в сфере охраны окружающей среды, объектов животного мира и лесных отношений Ханты-Мансийского автономного округа. – Ханты-Мансийск, 2021. – 188 с.

6. Об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югры в 2023 г. // Доклад Природнадзора Югры. – Ханты-Мансийск, 2024. – 209 с.

7. Статистический ежегодник: Стат. сб. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра в 2-х частях. Ч II. (2017–2024) / Управление Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу. – Т., 2025.

УДК 622.276

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ РИФЕЙСКОЙ ЗАЛЕЖИ ЮРУБЧЕНО-ТОХОМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Степанов Руслан Илдарович
Сибирский Федеральный университет, Институт нефти и газа
rusya.stepanov.2017@bk.ru

Прокатень Елена Вячеславовна
Сибирский Федеральный университет, Институт нефти и газа
канд. геолог.-минерал. наук, доцент кафедры геологии нефти и газа
EProkaten@sfu-kras.ru

Аннотация. Юрубчено-Тохомское месторождение одно из наиболее известных и уникальных в Красноярском крае и Российской Федерации. Оно обладает уникальным продуктивным резервуаром, который обладает наличием трещин, каверн и сложным строением пустотного пространства. Для повышения работы и увеличения нефтеотлачи пластов применяются на месторождении самые разные способы (кислотное туннелирование, кислотная обработка скважин, селективная кислотная обработка) и т.д. Они позволяют восстановить проницаемость призабойной зоны пласта и повысить дебит добывающих скважин. В представленной работе рассматривается возможность использования микробиологического метода увеличения нефтеотдачи, на примере Юрубчено-Тохомского месторождения.

Ключевые слова: кислотная обработка скважины, микробиологические методы увеличения нефтеотдачи карбонатный коллектор трещиноватость кавернозность.

Микробиологические методы воздействия на продуктивный пласт это способ увеличения нефтеотдачи, применяемый на месторождениях, в результате которого происходит взаимодействие бактерий и их жизнедеятельность. Основные механизмы вытеснения нефти с применением данной методики является в следующем [1]:

Образование микроорганизмами ПАВ биогенной природы, что приводит к снижению межфазного натяжения на границе раздела фаз «нефть – вода», «нефть – горная порода», получение различного вида органических кислот (карбоновые кислоты биогенного происхождения), которые расширяют поровые каналы горных пород, повышение пластового давления $P_{пл}$ за счет выделения микроорганизмами газов N_2, CO_2, CH_4, H_2, увеличение смачиваемости породы водой [2]. При воздействии чаще всего применяются бактерии, которые участвуют в увеличении нефтеотдачи, а именно УВОБ – углеводородные бактерии (аэробы), которые развиваются в зоне активного присутствия, или же наличия кислорода и ББ – бродильные бактерии (аэробы и анаэробы), которые живут как в аэробной так и в анаэробной зоне, МОБ – метанообразующие бактерии (анаэробы), которые развиваются в анаэробной зоне, где имеется недостаток кислорода и СВБ – сульфатовосстанавливающие бактерии, которые развиваются в анаэробной зоне [3]. Микроорганизмы легко поглощают АСПО, остатки продуктов жидкости глушения и буровых растворов и является универсальным методом увеличения нефтеотдачи.

Юрубчено-Тохомское месторождение обладает уникальным геологическим строением продуктивного резервуара, наличием зон повышенной трещиноватости и кавернозности [4]. В большинстве случаев при разработ-ке и эксплуатации столь уникального по своему строению месторождения, наблюдается загрязнение призабойной зоны разного рода продуктами технических жидкостей и результатами работ при проведении некачественного вторичного вскрытия продуктивного пласта. Применение микробиологического воздействия на призабойную зону скважин позволяет восстанавливать показатели работы скважин и тем самым увеличивать добычу нефти. Результаты приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Результаты применения микробиологического воздействия на призабойную зону пласта.

Скважина	Дебит до обработки, $м^3$/сут	Дебит после обработки, $м^3$/сут
Р-457	20	80
Р-089	55	65
Р-345	65	111
Р-789	23	100
Р-890	30	85

Заключение

Таким образом в представленной работе было установлено что применение микробиологических способов увеличения нефтеотдачи в условиях карбонатного коллектора Юрубчено-Тохомского месторождения, позволяет увеличивать нефтеотдачу в разного рода условиях, являясь уникаль-ным средством повышения работы скважин, в условиях карбонатного трещиноватого коллектора.

Список литературы:

1. Управление продуктивностью нефтяных и газовых скважин и методы увеличения нефтеотдачи пластов : учебник / А.К. Битнер, Р.Ш. Аюпов, Н.Г. Квеско [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2025. – 344 с
2. Биометоды увеличения нефтеотдачи: учеб. пособие / Н.А. Еремин, Р.Р. Ибаатуллин, Т.Н. Назина [и др.] ; под ред. Н.Т. Мищенко. – М. : РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 125 с.
3. Муслимов Р.Х. Современные методы повышения нефтеизвлечения: проектирование, оптимизация и оценка эффективности : учеб. пособие. – Казань : Фэн, 2005. – 688 с
4. Степанов Р.И., Прокатень Е.В., Обзор методов выделения параметров зон трещиноватости при оценке фильтрационных свойств трещин с учетом геолого-геофизических данных сложно построенного рифейского карбонатного коллектора Юрубчено-Тохомского месторождения // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 11(671). – С. 15–26.

УДК 502.5:551.345

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Стетюха Владимир Алексеевич

Забайкальский государственный университет
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Строительство»
stetjukha_chita@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются причины, факторы и масштабы трансформации экосистем на южных границах криолитозоны. Приводится оценка влияния нарушения теплового баланса на дневной поверхности на глубину залегания высокотемпературных многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: сезонно-талый слой, многолетнемерзлые грунты, техногенные воздействия, геоэкология.

Трансформация экосистем происходит в условиях одновременного влияния на них глобального потепления и техногенных факторов воздействия. Если среднегодовая температура воздуха в 2024 году на 1,5 градуса превышала средний показатель 1850–1900 годов, то на ближайшие десятилетия прогнозируются еще более высокие темпы повышения температуры воздуха [1].

Глобальное потепление на планете приводит к увеличению температуры грунта и к понижению верхней границы многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в криолитозоне. В докладе [2] отмечается заметное увеличение температуры грунта на территории Забайкальского края в период с 1976 по 2024 годы. В южных регионах края на глубине 0,8 м температура повышалась с интенсивностью до 0,41–0,6°С за 10 лет, на глубине 1,6 м – до 0,21–0,4 °С за 10 лет. Повышение температуры ММГ на некоторых месторождениях Шилкинско-Аргунской геокриологической области Забайкалья за несколько последних десятилетий составило от минус 2–3 °С до минус 0,1–1 °С [3]. По данным [4] увеличение глубины сезонного оттаивания с 1909 по 2008 год на открытых участках в Байкальском регионе составило около 1–1,6 м.

Деградация ММГ на Юге Сибири в естественных условиях кроме температуры воздуха зависит от температуры и влажности грунта, граничных условий на дневной поверхности, от испарения с поверхности, от альбедо поверхности, от влажности и температуры приповерхностного слоя. Большую роль играют такие условия региона как высокий уровень солнечной радиации, небольшая глубина залегания и высокая температура ММГ, амплитуда колебаний температуры наружного воздуха.

Состояние естественного равновесия в криолитозоне нарушается и при техногенных воздействиях на массивы грунтов. К основным факторам воздействия на экосистемы относятся:

– ландшафтно-деструктивные воздействия при горных работах (карьеры, отвалы, дамбы, траншеи, хранилища отходов);

– нарушения теплового баланса на поверхности при вырубке леса и кустарника, при нарушении торфяной подушки и почвенно-растительного покрова;

– нарушения водного баланса при орошении и осушении территорий;

– нарушения водного и теплового балансов при отсыпке насыпей;

– нарушения режимов поверхностных вод;

– нарушения теплового баланса при возведении промышленных и гражданских объектов.

Последствиями деградации ММГ становятся разрушения нефтепроводов и дорог, наледи, трещины, оползни, нарушения устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов, повреждения объектов промышленного и гражданского строительства.

Примеры трансформации экосистем в условиях горного производства приводятся в работе [3]. В работе [5, 6] представлены результаты увеличения глубины сезонного оттаивания и снижения несущей способности оснований зданий и сооружений, что приводит к деформациям оснований, повреждениям и разрушениям объектов.

По данным экспериментальных исследований при строительстве в Ангаро-Ленском бассейне [7] на участке, сложенном суглинками с влажностью 30 %, определялась глубина оттаивания при вырубке хвойного леса. При сохранении мохорастительного покрова глубина сезонного оттаивания на площадке 1 через 1 год увеличилась с 0,55 м до 1,2 м, на площадке 3 увеличилась с 0,45 м до 0,99 м. После вырубки леса с удалением на площадке 3 мохорастительного покрова сезонно талый слой увеличился с 0,45 м до 1,65 м.

Каждый конкретный регион и объект характеризуются своим неповторимым сочетанием естественных условий залегания ММГ и сочетанием факторов техногенных воздействий на среду. Перечисленные факторы воздействий и их последствия осложняют хозяйственное освоение и ухудшают экологическое состояние территорий. Прогнозирование развития деструктивных процессов в криолитозоне является актуальной задачей.

Возможный эффект от конкретной группы воздействий при деградации ММГ может прогнозироваться с использованием математического моделирования с применением уравнений тепломассопереноса. Математическая модель способна устанавливать как кратковременный эффект от внешнего воздействия, так и прогнозировать долговременное развитие процессов, угрожающих стабильному состоянию экосистем в регионе.

Для решения задачи автором разработана программа расчета с использованием уравнений нестационарного тепломассопереноса в массивах грунта [8]. Уравнения баланса тепла и влаги учитывают все виды воздействия на грунтовый массив у дневной поверхности. В алгоритмах вычислений учитываются тепловые потоки, обусловленные солнечной радиацией, испарением, тепловым излучением поверхности. Учитываются скорость ветра, облачность, количество осадков, альбедо поверхности, критерии фазовых переходов. Физические параметры грунта корректируются с изменением его температуры и влажности в разные сезоны года.

Нарушение теплового баланса после удаления растительности на дневной поверхности в связи с большим количеством солнечных дней в Забайкальском регионе оказывает заметное влияние на глубину оттаивания. В работе исследуется влияние нарушений теплового баланса при вырубке леса и кустарника в природно-климатических условиях Центрального Забайкалья на величину сезонного оттаивания суглинка с плотностью скелета 1400 г/см^3 методом математического моделирования. Рассматриваются наиболее уязвимые к внешним воздействиям массивы грунтов с влажностью 20 % и температурами ММГ минус 0,3 °С и минус 0,4 °С. Характер распределения температуры в массиве грунта в естественных условиях принимается по данным экспериментов в регионе.

В результате вычислений установлено влияние температуры наружного воздуха и температуры ММГ на изменение глубины сезонного оттаивания при вырубке леса. При повышении среднегодовой температуры наружного воздуха от –0,5 °С до +0,5 °С при температуре ММГ минус 0,4 °С увеличение сезонно талого слоя (СТС) составляет на затененных участках 0,1 м через 1 год и 0,2 м через 5 лет, на открытых участках 0,3 м через 1 летний сезон и 0,4 м через 5 лет. В аналогичных условиях при температуре ММГ минус 0,3 °С увеличение сезонно талого слоя через 1 год на участке с лесом составляет 0,1 м, через 5 лет – 0,35 м, на участке без леса через 1 год – 2,9 м, через 5 лет – 3,3 м. С повышением температуры наружного воздуха до +3 °С увеличение температуры грунтов происходит более интенсивно. При температуре ММГ –0,4 °С на участке с лесом уже после первого летнего сезона сезонно талый слой увеличивается на 0,4 м, на участке без леса – увеличивается на 1,05 м.

Характер распределения температуры грунта по глубине при повышении температуры воздуха до +0,5 °С и при температуре ММГ – 0,3 °С через 5 лет после вырубки леса и на участке с лесом приводится на рисунке 1. Различие в температурах грунта в октябре для покрытых лесом и открытых участках в большей части массива через 5 лет составляет от 1 до 2 °С.

Математическое моделирование развития процессов в криолитозоне в условиях сочетания глобального потепления и техногенных факторов воздействия, создаваемых при хозяйственной деятельности, позволяет решать актуальную задачу по обеспечению экологической безопасности в условиях криолитозоны, снижению экологических рисков, связанных с деградацией ММГ.

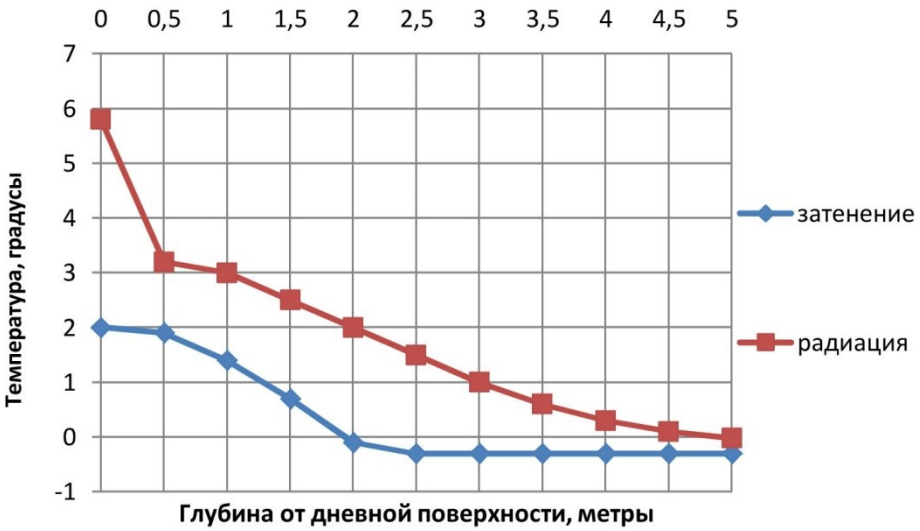


Рисунок 1 – Распределение температуры в массиве грунта в октябре через 5 лет до и после изменения условий на дневной поверхности

Список литературы:

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб. : Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с. – URL : https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/compressed.pdf. (дата обращения 12.02.25).

2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. – М. : РОСГИДРОМЕТ, 2025. – 135 с. – URL : https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/ (дата обращения 25.03.25).

3. Верхотуров А.Г. Влияние деградации многолетнемерзлых пород на условия разработки месторождений полезных ископаемых в Забайкалье // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос». – Тюмень : Типография "Сити-Пресс", 2011. – С. 114–116.

4. Куликов А.И., Убугунов Л.Л., Мангатаев А.Ц. О глобальном изменении климата и его экосистемных следствиях // Аркидные экосистемы. – 2014. – Т. 20. – № 3 (60). – С. 5–13.

5. Мосенкис Ю.М. Строительство на вечномерзлых грунтах Забайкалья. Ошибки проектирования, строительства и эксплуатации зданий. – Омск, 2024. – 256 с.

6. Сальников П.И. Устойчивость фундаментов зданий на мерзлых грунтах в Южном Забайкалье. – Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1996. – 208 с.

7. Перетрухин Н.А., Потатуева Т.В. Взаимодействие земляного полотна и вечномерзлых грунтов. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 1987. – 160 с.

8. Стетюха В.А. Тепловые и геомеханические процессы в неустойчивых геокриологических системах: монография. – Чита : ЗабГУ, 2012. – 158 с.

УДК 553.94:550.8

ОБОСНОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ШАГА СЕТИ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ОПРОБОВАНИЯ УГЛЕЙ СЛОЖНОСТРУКТУРНОГО ПЛАСТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КРОССВАЛИДАЦИИ

Тагаев Егор Андреевич

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела
tagaev.egor@mail.ru

Аннотация. Предложен способ выбора параметров сети опережающего опробования на основе полного исключения скважин при проверке моделей и искусственного прореживания фактической сети. Рассмотрен пласт Н16 Эльгинского месторождения, направление «Дальний Запад-3». На локальной выборке из 83 интервалов в 36 скважинах кригинг с внешним дрейфом обеспечил R^2 = 0,718 для линейной зольности. По результатам вычислительного эксперимента базовым принят номинальный шаг 25 × 25 м. Его локальное изменение в диапазоне 20–30 м связывается с ошибками двух моделей, пространственной обеспеченностью и неоднородностью третьей пачки. Указаны ограничения переноса результатов на другие участки.

Ключевые слова: уголь, пласт Н16, опережающее опробование, адаптивная сеть, линейная зольность, кригинг с внешним дрейфом, пространственная кроссвалидация.

Постановка задачи

При отработке сложноструктурного угольного пласта требуется заблаговременно выявлять участки повышенной зольности и уточнять положение минерализованных пачек. Усреднение качества по полной мощности может скрывать высокозольные интервалы. Для Эльгинского месторождения ранее показана пространственная неоднородность вклада тонких породных прослоев в общую зольность [1]. Поэтому расстояния между скважинами следует связывать с детальностью распознавания конкретной пачки, а не только со средней плотностью наблюдений.

В настоящем исследовании рассматривается третья минерализованная пачка пласта Н16 Северо-Западного участка Эльгинского месторождения. Цель работы – обосновать выбор базового шага и участков локального сгущения сети по ошибкам прогноза, полученным при пространственной проверке. Предлагаемая процедура объединяет геологическое сопоставление интервалов, сравнение прогнозных моделей, анализ анизотропии и проверку кандидатных шагов искусственным прореживанием.

Исходные данные и целевые показатели

Использована локальная база опережающего опробования направления «Дальний Запад-3». Исходные 106 интервальных записей относились к 36 физическим скважинам. Повторяющиеся серии исключались путем выбора одной наиболее полной серии для каждой скважины. Расчетная выборка включает 83 интервала: 25 первой пачки, 19 второй, 34 третьей и 5 четвертой. Керновые и технологические пробы не добавлялись к этой выборке как равноправные пространственные наблюдения.

Интервалы соседних пачек сохранены в модели как контекст; номер пачки учитывается отдельным признаком. Принадлежность к третьей пачке устанавливается по разметке, глубинам и положению в разрезе. Рабочий уровень зольности 20 % применяется для оценки риска повышенной зольности, а не для исключения низкозольных интервалов из геологически подтвержденной третьей пачки. Приведенные далее общие метрики относятся ко всем 83 интервалам и не подменяют отдельную оценку точности по 34 интервалам целевой пачки.

Для каждой пробы учитывались координаты скважины, середина интервала по глубине, мощность и номер пачки. Рассматривались зольность на сухое состояние A_d, выраженная в процентах, и линейная зольность, равная произведению зольности на мощность интервала и выраженная в %·м. Линейный показатель отражает совместное

изменение качества и геометрии пачки. Он не является массовым запасом золы и не заменяет процентную зольность.

Мощность и положение пачки должны быть известны независимо от прогнозируемого лабораторного значения. Если геометрия интервала в новой точке только прогнозируется, необходимо дополнительно учитывать ее ошибку. Поэтому точность, полученная при известной мощности, нельзя автоматически распространять на прогноз до бурения при неизвестном строении пачки.

Пространственная проверка моделей

Единицей внешней проверки принята физическая скважина. При каждом цикле Leave-One-Well-Out (LOWO) из обучения одновременно исключаются все ее интервалы. По оставшимся скважинам заново оценивается модель, затем прогнозируются значения в исключенной скважине. Для локальной базы выполнено 36 внешних циклов. Такое разделение предотвращает использование соседних интервалов той же скважины в качестве обучающих наблюдений. Необходимость учитывать структуру зависимых данных при кроссвалидации обоснована в работе [2].

Сопоставлены кригинг с внешним дрейфом (Kriging with External Drift, KED) и CatBoost с кригингом остатков. В KED внешний дрейф задается нормированной мощностью и индикаторами пачек; пространственная часть учитывает корреляцию необъясненных отклонений. Использование вспомогательных признаков совместно с кригингом рассмотрено в [3]. В гибридной модели нелинейный тренд формируется алгоритмом CatBoost [4], а затем уточняется пространственной поправкой. Остатки для этой поправки получают во вложенной проверке по обучающим скважинам.

Обе модели используют одинаковые внешние разбиения. Настройки и параметры вариограмм оцениваются без использования лабораторных значений исключенной скважины. Сопоставляются коэффициент детерминации R^2, среднеквадратическая ошибка RMSE и средняя абсолютная ошибка MAE. Результаты приведены в таблице 1. Ошибки зольности выражены в процентных пунктах, ошибки линейной зольности – в %·м.

Таблица 1 – Результаты LOWO по 83 интервалам в 36 скважинах

Показатель	Модель	R^2	RMSE	MAE
Зольность	KED	0,606	3,426	2,458
Зольность	CatBoost + кригинг остатков	0,567	3,592	2,495
Линейная зольность	KED	0,718	9,168	6,622
Линейная зольность	CatBoost + кригинг остатков	0,683	9,720	7,113

KED принят основной моделью, поскольку на исследованной выборке он дает меньшие RMSE и MAE для обеих целей. Более высокий R^2 линейной зольности характеризует прогноз именно интегрального показателя. Он не означает такой же точности для процентной зольности и не доказывает независимости результата от мощности. Различие моделей по общим метрикам не проверялось здесь на статистическую значимость; CatBoost с кригингом остатков сохранен для сопоставления локальных ошибок.

Обоснование базового шага сети

Для перехода от качества модели к параметрам сети фактическое расположение скважин подвергалось искусственному прореживанию. Проверялись номинальные квадратные ячейки со сторонами 20, 25, 30, 35, 40 и 50 м при нескольких положениях решетки. В каждом внешнем цикле сначала исключалась тестовая скважина, затем прореживалась только обучающая часть и повторно оценивались модель и вариограмма. Ошибки рассчитывались по внешним прогнозам исходного набора интервалов. Сценарии сопоставлялись по медианным результатам разных положений решетки.

Такой эксперимент оценивает устойчивость прогноза при уменьшении числа наблюдений. Для нерегулярной фактической сети номинальный шаг характеризует правило отбора скважин, а не точное расстояние между каждой парой соседей. Результаты для линейной зольности приведены в таблице 2 и дополнительно показаны на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, при шаге 25 × 25 м сохраняется значение 0,717 против 0,718 в исходной конфигурации. Это послужило основанием принять 25 м в качестве базового номинального шага. Шаг 30 м рассматривается как допустимый на участках устойчивого прогноза. Более редкие схемы 40 и 50 м сопровождаются снижением общей точности.

Таблица 2 – Сопоставление сценариев прореживания сети

Номинальный шаг, м	R^2 линейной зольности	Принятое решение
Фактическая сеть	0,718	Исходный уровень точности
20 × 20	0,710	Ориентир для локального сгущения
25 × 25	0,717	Базовый рекомендуемый шаг
30 × 30	0,714	Для устойчивых участков
35 × 35	0,711	Пограничный вариант
40 × 40	0,698	Не принят как единый шаг
50 × 50	0,695	Не принят как единый шаг

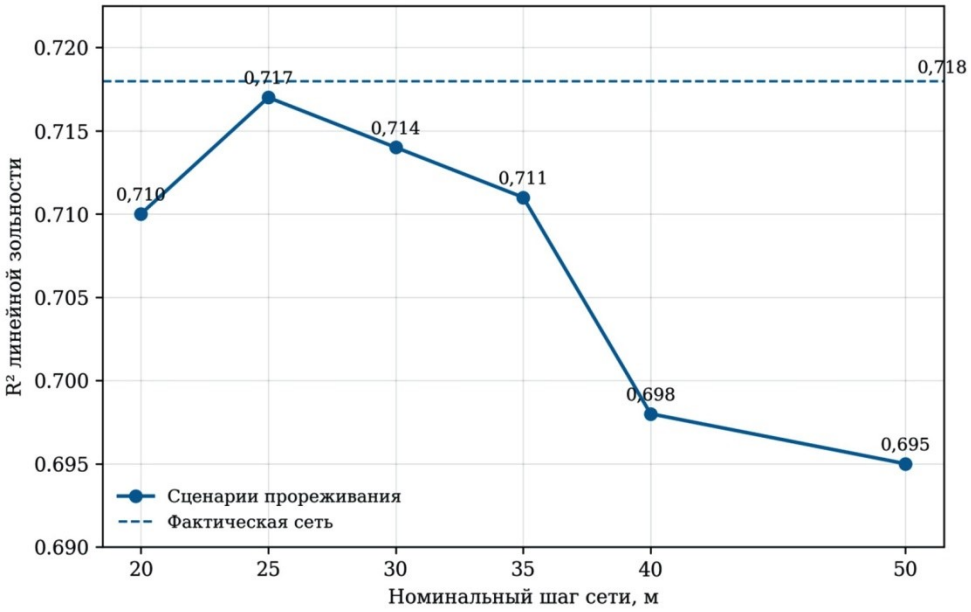


Рисунок 1 – Изменение точности прогноза линейной зольности при варьировании номинального шага сети

Немонотонность результатов, в частности меньшее значение R^2 при шаге 20 м, не доказывает преимущества разреженной сети. Она может отражать различия состава сохраненных скважин и положения решетки. Искусственное прореживание не моделирует появление новых скважин, поэтому выбор 20 м для локального сгущения является проектной рекомендацией. Фактическое уменьшение ошибки после дополнительного бурения требует отдельной проверки.

Локальное изменение шага и ориентирование сети

Базовый шаг уточняется по согласованности локальных ошибок KED и CatBoost с кригингом остатков. Для каждой исключенной скважины сначала определяется MAE каждой модели по ее интервалам, затем рассчитывается среднее этих двух значений. В исследованной базе ориентировочными границами классов ошибки приняты 1,5 и 2,8 процентного пункта, близкие к 33-му и 67-му процентилям распределения. Это эмпирические границы данной выборки, а не универсальные допустимые ошибки.

При согласованной ошибке не более 1,5 процентного пункта и достаточном пространственном окружении предлагается шаг 30 м. Для промежуточного класса сохраняется 25 м; при ошибке более 2,8 процентного пункта рассматривается локальное сгущение до 20 м. Рекомендация уточняется по переходу прогнозной зольности через рабочий уровень 20 %, изменению мощности, расхождению моделей и наличию участков без достаточного числа соседних скважин. Перед бурением также проверяется правильность сопоставления пачек.

Совпадение крупных ошибок разных моделей повышает приоритет проверочного опробования, но не устанавливает причину отклонений однозначно. Обе модели используют общую базу и не являются статистически независимыми. Локальные LOWO-ошибки известны только в наблюденных скважинах; при выборе новых точек они служат ориентиром совместно с геометрией сети и геологической интерпретацией.

Направление максимальной пространственной непрерывности локальных данных имеет азимут около 121°. Анизотропия используется при размещении дополнительных скважин: приоритет получают разрывы поперек этого направления, где показатель изменяется быстрее. У вытянутой аномалии проверочные точки рекомендуется размещать по короткой оси. При этом проведенное сравнение квадратных ячеек не дает самостоятельного численного обоснования произвольного соотношения продольного и поперечного шагов.

Ситово-фракционный анализ используется для технологической интерпретации неоднородности. В двух исследованных пробах третьей пачки зольность наиболее тяжелой фракции плотностью более 1800 кг/м³ составила 74,2-74,5 %. Это показывает наличие высокозольной тяжелой составляющей в исследованном материале. Из-за малого числа проб и недостаточной координатной привязки эти результаты не определяют геометрию сети напрямую и не рассматриваются как количественное подтверждение точности пространственной модели.

Выводы

Предлагаемый метод связывает выбор шага сети с ошибкой прогноза в полностью исключенных скважинах и устойчивостью модели при прореживании фактических наблюдений. Для локальной базы направления «Дальний Запад-3» базовым принят номинальный шаг 25 × 25 м; переход к 30 или 20 м определяется условиями конкретного участка. Ориентация дополнительных наблюдений учитывает анизотропию, а приоритет сгущения – согласованные ошибки моделей, геологические переходы и недостаток пространственной информации.

Полученные параметры относятся к исследованной конфигурации данных. Для производственного применения необходимо подтвердить точность отдельно по третьей пачке, учесть доступность мощности в новых точках и проверить эффект дополнительного бурения. Выбор шага на тех же данных не является независимым доказательством оптимальности сети. После поступления новых проб требуется повторная проверка и актуализация зон. Перенос предложенных численных шагов на другие участки без такой проверки не обоснован.

Список литературы:

1. Батугин С. А., Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А. Оценка влияния тонких породных прослоев на зольность угля Эльгинского месторождения // Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 4. – С. 1–15. – DOI: 10.15862/136TVN415. – URL : https://naukovedenie.ru/PDF/136TVN415.pdf (дата обращения: 17.09.2026).

2. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure / D.R. Roberts, V. Bahn, S. Ciuti [et al.] // Ecography. – 2017. – Vol. 40. – № 8. – P. 913–929. – DOI: 10.1111/ecog.02881. – URL : https://doi.org/10.1111/ecog.02881 (дата обращения: 17.09.2026).

3. Hengl T., Heuvelink G.B.M., Rossiter D.G. About regression-kriging: From equations to case studies // Computers & Geosciences. – 2007. – Vol. 33. – № 10. – P. 1301–1315. – DOI: 10.1016/j.cageo.2007.05.001. – URL : https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001 (дата обращения: 17.09.2026).

4. CatBoost: unbiased boosting with categorical features / L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2018. – Vol. 31. – URL : https://papers.neurips.cc/paper/7898-catboost-unbiased-boosting-with-categorical-features.pdf (дата обращения: 17.09.2026).

УДК 622.244.442

ПРИМЕНЕНИЕ АКРИЛОВЫХ ПОЛИМЕРОВ «PRAESTOL» ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Тихонов Евгений Владимирович

ООО «БУРСЕРВИС»
технический директор отдела буровых растворов
evgeny.tikhonov@internet.ru

Аннотация. В статье приведены исследования буровых растворов с полимером марки «Praestol 2530», который представляет собой высокомолекулярный, частично гидролизованный полиакриламид со средней анионной активностью. Этот полимер малотоксичен и экологически сертифицирован. Рассмотрено влияние различных марок «Praestol» на технологические параметры малоглинистой суспензии, а также влияние «Praestol 2530» и аналогов на технологические параметры 9,2 % глинистой суспензии. Установлено, что «Praestol 2530» обладает в сравнении с другими синтетическими полимерами высокой флокулирующей способностью и устойчивостью к механодеструкции.

Ключевые слова: полимер марки «Praestol 2530»; реологические характеристики водных растворов полимеров; динамическое напряжение сдвига; пластическая вязкость; гелеобразующая способность; устойчивость к механодеструкции; флокулирующая способность.

Различные рецептуры полимерных буровых растворов (недиспергирующих безглинистых, недиспергирующих с низкой концентрацией твёрдой фазы, полимерглинистых, полимеркарбонатных и др.) широко применяются при строительстве скважин. При этом требования, предъявляемые к составу и свойствам буровых растворов, постоянно возрастают. Основным фактором, определяющим ужесточение комплекса требований к составу и свойствам бурового раствора, является увеличение доли месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. При решении проблемы вовлечения в разработку залежей нефти сложного геологического строения и высоковязкой нефти, содержащейся в низкопроницаемых коллекторах, следует учитывать два аспекта.

Во-первых, при низкой продуктивности скважин ввод их в эксплуатацию целесообразен лишь при минимальных затратах на строительство. В силу этого буровой раствор, как важнейший элемент технологии бурения, должен обеспечивать предотвращение осложнений, высокую механическую скорость проходки и стойкость породоразрушающего инструмента.

Во-вторых, при заканчивании скважин в осложнённых геолого-технических условиях необходимо обеспечить максимально возможное сохранение естественной проницаемости продуктивных пластов. При высокой степени кольматации призабойной зоны зачастую очистка её созданием депрессии при освоении невозможна, т.к. при этом происходит прорыв сторонних флюидов к интервалу фильтра по заколонному пространству. Скважины с загрязнённой призабойной зоной имеют высокий показатель скин-эффекта и низкую продуктивность. Работы по воздействию на призабойную зону физико-химическими методами или увеличением плотности перфорации в таких скважинах, как правило, имеют низкую успешность и эффективность.

Одним из направлений повышения эффективности строительства скважин, особенно при освоении трудноизвлекаемых запасов и запасов, находящихся под особо охраняемыми или непроходимыми территориями, является заканчивание скважин горизонтальным стволом. Широкое внедрение данного метода немыслимо без специальных систем буровых растворов – прежде всего, безглинистых полимерных растворов со специально подобранными реологическими характеристиками и улучшенными противоизносными и смазывающими свойствами.

Было исследовано 6 модификаций полимера «Praestol». По результатам исследований буровых растворов отмечена достаточно высокая эффективность полимера

марки «Praestol 2530». Это высокомолекулярный, частично гидролизованный полиакриламид со средней анионной активностью, порошкообразный продукт насыпной плотностью 600–700 кг/м^3. Полимер малотоксичен, экологически сертифицирован, производство и применение согласовано с органами охраны окружающей среды.

Экспериментально установлено, что водные растворы полимера «Praestol 2530» имеют достаточно высокие реологические показатели, сопоставимые с бентонитовым наполнителем типа DKS-extender (таблица 1).

Таблица 1 – Реологические характеристики водных растворов полимеров

Полимер	Концентрация полимера, % вес.					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
Praestol 2530	7/38	10/77	17/110	20/144	28/172	35/258
Poly-Kem D	7/29	27/48	31/47	48/71	51/53	–
DKS-extender	11/24	14/46	25/77	42/109	51/218	–

Примечание: в числителе – пластическая вязкость η, мПа · с, в знаменателе – динамическое напряжение сдвига τ_0, дПа.

Отличительной особенностью полимера является аномально высокое значение соотношения динамического напряжения сдвига τ_0 к пластической вязкости η. Это соотношение при концентрации полимера 0,1–0,7 % вес. находится в диапазоне 540–740 с$^{-1}$. Для сравнения в аналогичных условиях для полимеров Poly-Kem D и DKS-extender соотношение $\frac{\tau_0}{\eta}$ не превышает 420 с$^{-1}$. Это свидетельствует о высокой гелеобразующей способности «Praestol 2530», которая может быть усилена в безглинистых системах солями-комплексообразователями. Псевдопластичность полимерглинистых систем особенно проявляется для буровых растворов с малым содержанием твёрдой фазы. В таблице 2 приведены экспериментальные данные по влиянию на технологические показатели малоглинистого (4,7 % вес.) бурового раствора различных модификаций «Praestol» при одинаковой концентрации (0,05 % вес.).

Таблица 2 – Влияние различных марок «Praestol» на технологические параметры малоглинистой суспензии

Технологические параметры / Состав раствора	Глинистая суспензия (К)*	К + 0,05 % Praestol 2500	К + 0,05 % Praestol 2510	К + 0,05 % Praestol 2515	К + 0,05 % Praestol 2530	К + 0,05 % Praestol 2540	К + 0,05 % Praestol 2300 Д
Плотность ρ, кг/м^3	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030
Условная вязкость Т, сек	17	21	47	115	н/т	кап	25
Статическое напряжение сдвига через 1 и 10 минут СНС$_{1/10}$, дПа	24/33	40/48	127/134	193/225	225/242	363/465	38/48
Показатель фильтрации Ф, см^3/30 мин.	15,7	13,0	8,8	10,4	8,0	8,4	12,0
Толщина глинистой (фильтрационной) корки К, мм	1,3	1,2	1,1	1,2	0,8	1,0	1,2
Коэффициент трения глинистой корки $\varphi_{тр}$, мПа	0,57	0,40	0,10	0,28	0,15	0,10	0,30
Пластическая вязкость η, мПа · с	4	7	7	5	10	20	8
Динамическое напряжение сдвига τ_0, дПа	29	58	172	196	359	311	82
Водородный показатель pH	9,08	9,19	8,89	9,07	9,13	8,95	9,15
Показатель реологической нелинейности *n*	0,49	0,43	0,22	0,15	0,16	0,30	0,40

Примечания: * – контрольная глинистая суспензия (К) приготовлена из глинопорошка с выходом 9 м^3 раствора из 1 тонны глиноматериала.

Экспериментально доказана (см. таблицу 2) возможность получения буровых растворов низкой плотности (1030 кг/м^3) с ярко выраженными псевдопластичными свойствами (показатель нелинейности n = 0,15–0,22), сопоставимыми с эффектом применения биополимеров. Отмечено, что с увеличением плотности глинистой суспензии с 1030 до 1060 кг/м^3 загущающая способность «Praestol 2530» резко возрастает (таблица 3).

Экспериментальные данные (см. таблицу 3) свидетельствуют о более высокой загущающей способности «Praestol 2530» в сравнении с аналогами. Так, при одинаковой концентрации (0,05 %) «Praestol» увеличивает вязкостные свойства контрольной 9,2 % глинистой суспензии до «нетекучего» состояния, а другие полимеры в 2–3 раза при одинаковом снижении показателя фильтрации.

Таблица 3 – Влияние «Praestol 2530» и аналогов на технологические параметры 9,2 % глинистой суспензии

Технологические параметры / Состав раствора	Глинистая суспензия (К)*	К + 0,05 % Praestol 2530	К + 0,05 % DKS-extender	К + 0,05 % DK-drill	К + 0,05 % Poly-Kern D	К + 0,05 % Smectex	К + 0,05 % EZ Mud
Плотность ρ, кг/м^3	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060
Условная вязкость Т, сек	17	н/т	36	70	35	27	30
Статическое напряжение сдвига через 1 и 10 минут СНС$_{1/10}$, дПа	16/31	–	51/77	66/95	59/119	29/55	48/93
Показатель фильтрации Ф, см^3/30 мин.	17	7,2	8	9	7	10	6
Толщина глинистой (фильтрационной) корки К, мм	–	1,0	0,8	1,2	1,0	1,5	1,0
Коэффициент трения глинистой корки $\varphi_{тр}$, мПа	0,70	0,34	–	0,50	0,50	–	0,55
Пластическая вязкость η, мПа · с	5	–	14	14	10	13	9
Динамическое напряжение сдвига τ_0, дПа	18	–	55	54	50	56	34
Водородный показатель pH	10,20	10,16	9,0	8,50	9,05	9,05	9,10

Примечание: * – контрольная глинистая суспензия (К) приготовлена из глинопорошка с выходом 6,2 м^3/т.

Экспериментально установлено, что «Praestol 2530» обладает в сравнении с другими синтетическими полимерами высокой флокулирующей способностью и устойчивостью к механодеструкции (таблица 4).

Таблица 4 – Показатели механодеструкции и эффективности флокуляции

Название полимера	Показатель механодеструкции $п_{мех}$	Показатель флокулирующей способности $п_{фл}$
DK-drill A	0,46	81
Poly-Kem D	0,69	132
Kan-Floc	–	111
Praestol 2530	0,65	210
EZ Mud DP	0,78	–

Показатель механодеструкции $п_{мех}$ и показатель флокулирующей способности $п_{фл}$ *определяются по следующим формулам:*

$$п_{мех} = \frac{T_0 - T_{10}}{T_0};\ п_{фл} = \frac{T_1}{T_2},$$

где T_0 – начальная условная вязкость водного раствора полимера; T_{10} – условная вязкость после 10 циклов циркуляции через узел деструкции; T_1 – время осветления 4 % суспензии из глины с выходом раствора 2,4 м^3/т; T_2 – время осветления этой суспензии при добавке флокулянта.

Достаточно высокая устойчивость к механодеструкции пропорционально показателю $п_{мех}$ уменьшает число дополнительных обработок бурового раствора для восстановления его технологических свойств при циркуляции в стволе скважины. Высокая флокулирующая способность «Praestol 2530» ($п_{фл}$ = 210) обеспечивает эффективность применения полимера для очистки буровых растворов от твёрдой фазы.

Применение полимеров «Praestol» в качестве флокулянта для физико-химической очистки промывочной жидкости в интервале бурения с промывкой технической водой позволяет повысить производительность очистных устройств для удаления избыточной твёрдой фазы при бурении высококоллоидальных глинистых пород.

С использованием результатов экспериментальных исследований разработаны рекомендации и технология применения «Praestol 2530» в составе буровых растворов при строительстве скважин на Крайнем Севере, в том числе для бурения интервалов многолетнемёрзлых и обваливающихся пород. Наличие в разрезе осыпающихся сланцевых пород («шоколадные глины») в значительной степени осложняет проводку ствола, сопровождается многократными и продолжительными проработками и промывками скважины. Например, при забое 2895 м при вскрытии «шоколадных глин» в скважине № 1041 Северо-Уренгойского месторождения промывки и проработки для очистки ствола от шламовых пробок велись в течение 8 суток.

Для предотвращения обвалообразований путём снижения фильтрации бурового раствора и повышения качества очистки наклонного ствола за счёт оптимизации реологии восходящего потока промывочной жидкости в скважинах №№ 1044 и 1081 Северо-Уренгойского газоконденсатного месторождения проведены опытно-промысловые испытания полимера «Praestol 2530». Обработка бурового раствора полимером производилась в интервале бурения под эксплуатационную колонну до глубины 3520 м. При этом пробурено более 4000 м горных пород. Результаты промысловых испытаний подтвердили высокую эффективность «Praestol 2530» для управления качеством малоглинистых растворов при бурении наклонно-направленных стволов (42–47°) в литологически неоднородных, обваливающихся породах. При испытаниях в скважинах №№ 1044 и 1081 установлено, что применение «Praestol 2530» в составе бурового раствора исключает дополнительные промывки и проработки ствола и снижает расход химических реагентов, в том числе карбоксиметилцеллюлозы. На практике отмечено, что при расходе «Praestol 2530» в количестве 0,15 кг на 1 метр проходки расход КМЦ уменьшается в 2,3 раза (с 1,5 до 0,65 тонн). При этом добавка 215 кг «Praestol 2530» заменяет синтетические полимеры М-14, Унифлок, Smectex в общем количестве 340 кг.

Промышленное применение «Praestol 2530» продолжено при бурении глубоких разведочных скважин на Ямбургской, Тояхской, Митияхинской структурах и эксплуатационных скважин на валанжинские отложения Уренгойского и Северо-Уренгойского ГКМ. С использованием нового полимера пробурено более 100 тысяч метров горных пород на 5 месторождениях Крайнего Севера. Средний расход реагента при бурении ствола под эксплуатационную колонну валанжинской скважины составил 0,28 кг/м и в зависимости от условий применения расход полимера изменялся от 0,15 до 0,30 кг/м. Основной объём буровых работ (70 %) с использованием «Praestol 2530» проводился на Северо-Уренгойском ГКМ в интервале бурения 1350-3250 м. Анализом промысловых данных строительства 15 скважин (кусты №№ 104, 105, 107 и 108) этого месторождения выявлено, что применение «Praestol 2530» обеспечивает высокое качество бурового раствора. При содержании глинистой фазы 17,4–23,6 % вес. буровой раствор имел низкий показатель фильтрации (2,0–2,2 $см^3$/30 мин.), обеспечивший снижение «размокания» обваливающихся пород и сохранение устойчивости стенок скважины. Низкие адгезионные свойства (коэффициент трения 0,05–0,06) и малая толщина фильтрационной глинистой корки (0,5 мм) обеспечили прихватобезопасность бурового раствора при проводке наклонного ствола (до 47°) в литологически сложном геологическом разрезе месторождений Крайнего Севера.

На месторождениях Удмуртии полимеры «Praestol» применяются в составе безглинистого полимерного бурового раствора в сочетании с сернокислым алюминием. Технология приготовления раствора предусматривает использование минерализованной пластовой воды. Применяемый в настоящее время полимер марки «Praestol

2300D» обеспечивает требуемые структурно-механические и фильтрационные свойства бурового раствора. Расход полимера составляет до 4 кг/м^3 раствора. Типичный диапазон технологических свойств бурового раствора: плотность – 1060–1160 кг/м^3, условная вязкость – 20–25 сек, показатель фильтрации – 2–6 см^3/30 мин., пластическая вязкость – 2–12 мПа · с, *динамическое напряжение сдвига* – до 1 Па. В качестве кольматирующей и коркообразующей добавки при вскрытии продуктивного пласта используется добавка до 3 % карбоната кальция.

Данный тип бурового раствора широко используется при бурении горизонтальных стволов, как при строительстве новых скважин, так и при ремонте скважин методом зарезки бокового ствола. Всего с использованием бурового раствора данного типа пробурено более нескольких сотен горизонтальных стволов.

Анализ применения полимерных растворов на месторождениях Удмуртии показывает, что за счёт низкого содержания твёрдой фазы и хороших смазывающих свойств значительно повышены технико-экономические показатели бурения горизонтальных стволов. Так, механическая скорость бурения возросла более чем в 4 раза, а средняя проходка на долото увеличилась почти на 70 %.

Буровой раствор характеризуется высокими ингибирующими и недиспергирующими свойствами. Это позволяет обеспечить устойчивость ствола скважины в интервалах пород, склонных к гидратации, предотвратить снижение проницаемости призабойной зоны за счёт набухания глинистых частиц в продуктивном пласте, предотвратить диспергирование и гидратацию бурового шлама и, таким образом, снизить затраты на обработку и очистку бурового раствора.

Большой комплекс лабораторных и опытно-промышленных работ, проводимых при освоении скважин, законченных с использованием безглинистых буровых растворов, показал, что фильтрационные корки, содержащие полимер (кислоторастворимый карбонатный кольматант), могут быть легко удалены специальными реагентами-окислителями полимерных материалов. По результатам опытных работ отмечается практически полное восстановление начальной проницаемости коллекторов.

По результатам испытаний установлено, что полимеры «Praestol» могут быть использованы в качестве флокулирующей добавки в установках по нейтрализации и обезвоживанию бурового раствора. Правильный подбор оптимальной марки полимера позволяет повысить эффективность флокуляции и сократить затраты на обработку раствора.

Список литературы:

1. Батыров М.И., Руденко С.И., Савенок О.В. Построение регрессионной модели для определения факторов, влияющих на свойства и технологические параметры бурового раствора // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2019. – № 1. – С. 297–315.

2. Будовская М.Е. К вопросу формирования кольматационного экрана при бурении скважин с применением бурового раствора на углеводородной основе в условиях месторождений Восточной Сибири / М.Е. Будовская, М.В. Двойников, П.А. Блинов [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 3 (351). – С. 29–34. – DOI: 10.33285/0130-3872-2022-3(351)-29-34

3. Гаржа Д.А., Демерза Ю.А., Попова Г.Г. Исследование возможности применения флокулянтов Praestol в процессах утилизации нефтешламов // Молодая наука – 2014: материалы V Открытой международной молодёжной научно-практической конференции, посвящённой Году культуры в Российской Федерации (16–17 мая 2015 года, г. Туапсе). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2015. – С. 132–134.

4. Григулецкий В.Г., Савельев Ю.П. Динамические и тепловые поля при турбулентном течении бурового раствора в кольцевом пространстве труб // Нефть, газ и бизнес. – 2016. – № 10. – С. 3–21.

5. Камаев И.В. Бурение горизонтальных участков скважин с применением бурового раствора на основе прямой эмульсии и винтового забойного двигателя / И.В. Камаев, А.Б. Харитонов, Е.В. Тихонов [и др.] // Бурение & Нефть. – 2023. – № 3. – С. 48–51.

6. Киселёв П.В., Махоро В.А. Разработка и применение специальных буровых растворов для бурения горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 3. – С. 22–24.

7. Лобанов Ф.И., Коробов А.С., Минибаев В.В. Опыт применения флокулянтов «Праестол» для очистки сточных вод и обезвоживания шлама при строительстве скважин и переработке нефти // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 3. – С. 43–47.

8. Минибаев В.В. Получение акриловых полимеров с заданными свойствами для регулирования технологических характеристик буровых растворов // Нефть. Газ. Новации. – 2013. – № 12 (179). – С. 41–43.

9. Минибаев В.В. Новая цифровая модель фильтрации бурового раствора при первичном вскрытии низкопроницаемых отложений / В.В. Минибаев, Е.Ю. Камбулов, В.Г. Григулецкий [и др.] // Бурение и нефть. – 2023. – № S2. – С. 6–15.

10. Савенок О.В., Диоманде Б.Х. Выбор типа бурового раствора и расчёт параметров промывочной жидкости при строительстве наклонно-направленной добывающей скважины глубиной 2560 м на Тагринском месторождении // Инновационные решения актуальных проблем в области высокомолекулярных металлоорганических соединений: сборник научных работ международной научно-практической онлайн-конференции (28 мая 2021 года, г. Ташкент). – Ташкент : Ташкентский научно-исследовательский институт химической технологии, 2021. – С. 88–92.

11. Тихонов Е.В. Анализ проблем бурения скважин и вскрытия нефтегазовых пластов в осложнённых условиях // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 206–222.

12. Тихонов Е.В. Подбор рецептур бурового раствора для устранения и предотвращения осложнений при бурении скважин в условиях вечной мерзлоты // Булатовские чтения. – 2024. – Т. 1. – С. 314–320.

УДК.622.276

ТЕХНОЛОГИИ УЛАВЛИВАНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕРОДА В ВЫРАБОТАННЫХ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТАХ В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АФРИКИ

Хамза Х.А.
Кубанский государственный технологический университет
аспирант третьего курса по направлению «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», кафедра нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна
hassanfils500@gmail.com

Величко Е.И.
Кубанский государственный технологический университет
канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедра нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна
johnbottle@mail.ru

Мягкий Я.Б.
Кубанский государственный технологический университет
доцент кафедры нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна
strigobor@mail.ru

Гилаев Г.Г.
Кубанский государственный технологический университет
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело»
gggilaev@gmail.com

Аль-Кадхи К.Ф.А.
Кубанский государственный технологический университет
студент по направлению «Бурение нефтяных и газовых скважин», кафедра нефтегазового дела имени профессора Г.Т. Вартумяна
kamalalqadhi670@gmail.com

Аннотация. Технологии улавливания, использования и хранения углерода (УИХУ) на выработанных нефтяных месторождениях Центральной Африки представляют собой одновременно перспективное направление декарбонизации и способ продлить жизнь стареющих активов. Регион (Габон, Конго, Экваториальная Гвинея, Ангола, Чад, Камерун) обладает значительным количеством истощённых залежей, которые геологически пригодны для закачки CO_2. Ниже приведён обзор ключевых аспектов.

Ключевые слова: УИХУ; улавливание CO_2; геологическое хранение углерода; выработанные месторождения; декарбонизация; нефтеотдача; углеродная нейтральность.

1. Улавливание CO_2 в условиях Центральной Африки

Основные источники антропогенного CO_2 в регионе – это попутный нефтяной газ, факельное сжигание, газопереработка и строящиеся заводы по производству сжиженного природного газа (СПГ). Технологии улавливания адаптируются под эти потоки:

– Посткомбустионное улавливание (аминная очистка) – на газотурбинных электростанциях промыслов и нефтеперерабатывающих заводах.

– Прекомбустионное улавливание – на установках паровой конверсии метана при производстве водорода для гидроочистки.

– Улавливание из дымовых газов факельных систем – пилотные решения с мембранным разделением или химическими циклами, позволяющие одновременно монетизировать попутный газ и извлекать CO_2.

– Кислый газ с месторождений – многие залежи региона (особенно докембрийского подсолевого комплекса у берегов Анголы и Конго) содержат высокие кон-

центрации CO_2 в пластовом газе (до 70–80 %). Этот CO_2 уже сепарируется на промыслах и может сразу направляться на закачку без дорогостоящего улавливания.

2. Использование CO_2 для повышения нефтеотдачи (CO_2-МУН) на выработанных пластах

Для зрелых месторождений Центральной Африки закачка диоксида углерода с целью увеличения нефтеотдачи (CO_2-МУН) – экономически наиболее оправданный вариант. Пласты-кандидаты: песчаники мелового и третичного возраста (формации Гамба, Ика, Сенджи в Габоне и Конго) и карбонатные постройки нижнего мела (шельф Анголы).

– Механизм: CO_2 закачивается в пласт, смешивается с остаточной нефтью, снижая её вязкость и вытесняя к добывающим скважинам. Часть CO_2 остаётся в ловушке.

– Потенциал: по оценкам, дополнительный коэффициент извлечения нефти может составить 5–15 % от начальных запасов. Для истощённых гигантов вроде Раби (Габон) или залежей бассейна Нижнего Конго CO_2-МУН способен продлить рентабельную добычу на 15–20 лет.

– Инфраструктурная синергия: многие месторождения уже имеют систему поддержания пластового давления, которую можно переоборудовать под закачку CO_2.

3. Хранение углерода в истощённых резервуарах

Выработанные нефтяные и газовые пласты – идеальные природные хранилища:

– Доказанная герметичность: ловушка удерживала углеводороды миллионы лет; покрышки (эвапориты и глины аптского и сеноманского ярусов) обладают прекрасными изолирующими свойствами.

– Изученная геология: высокая плотность сейсмики 3D и каротажных данных снимает неопределённость.

– Объёмы хранения: по скромным подсчётам, суммарный ресурс хранения только в истощённых залежах Гвинейского залива превышает 5–10 гигатонн CO_2.

Особый интерес представляют:

– Глубоководные выработанные песчаники (Ангола, Конго) – после прекращения добычи могут быть переведены в режим постоянного захоронения CO_2.

– Истощённые газовые шапки – позволяют безопасно закачивать CO_2 в газонасыщенную часть без риска прорыва в нефтяную оторочку, пока та доразрабатывается.

4. Текущие проекты и инициативы в регионе

– Ангола – совместно с нефтегазовыми мейджорами (TotalEnergies, bp, Eni) прорабатывает проект УИХУ на блоке 17 (месторождение Жирассол). Рассматривается закачка попутного CO_2 высокого давления в водоносный горизонт и выработанные коллекторы, что позволит сократить углеродный след экспортной нефти.

– Конго – Eni запустила проект по сжижению газа с предварительным удалением CO_2. Отделяемый CO_2 планируется закачивать в пласт для повышения нефтеотдачи на зрелых сухопутных месторождениях (район М'Бунду). Это первый африканский проект, ориентированный на полный цикл УИХУ с подтверждённым эффектом увеличения нефтеотдачи.

– Габон – в рамках новой редакции нефтяного кодекса создаётся правовая база для захоронения CO_2. Операторы истощённых сухопутных блоков изучают рентабельность CO_2-МУН с привлечением углеродных кредитов.

– Камерун и Чад – проекты трубопроводного транспорта CO_2 от газоперерабатывающих мощностей к выработанным структурам бассейна Доба (Чад) и бассейна Рио-дель-Рей (Камерун) находятся на стадии предварительного технико-экономического обоснования.

Заключение

Выработанные нефтяные пласты Центральной Африки представляют собой стратегический природный актив для внедрения технологий улавливания, использова-

ния и хранения углерода (УИХУ). Сочетание благоприятных геологических условий – доказанной герметичности ловушек, высокой изученности резервуаров и наличия мощных региональных покрышек – с близостью крупных источников высококонцентрированного CO_2 (кислые газы подсолевых отложений, заводы СПГ и системы подготовки попутного газа) создаёт уникальное окно возможностей. Реализация CO_2-МУН на зрелых месторождениях Гвинейского залива способна не только продлить срок их рентабельной эксплуатации на десятилетия, но и обеспечить постоянное геологическое захоронение значительных объёмов диоксида углерода.

Пилотные инициативы Eni в Конго и проработки проектов TotalEnergies и bp в Анголе демонстрируют, что технологический цикл УИХУ технически реализуем и постепенно становится экономически оправданным при учёте углеродных кредитов и механизмов статьи 6 Парижского соглашения. В то же время остаются ключевые вызовы: формирование правового поля для долгосрочной ответственности за хранение CO_2, необходимость масштабной модернизации старого фонда скважин и создания трубопроводной инфраструктуры, а также снижение стоимости улавливания. При системном подходе страны Центральной Африки могут трансформироваться из поставщиков сырой нефти в операторов углеродных хабов, диверсифицируя экономику и монетизируя уникальный геологический потенциал выработанных недр.

Список литературы:

1. IPCC (2005). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage / B. Metz, O. Davidson, H.C. de Coninck [et al.] // Cambridge University Press. – Cambridge, UK and New York, NY, USA. – 442 p.

2. IEA (2020). CCUS in Clean Energy Transitions // International Energy Agency, Paris. (Актуальные обновления за 2022–2025 гг. в серии докладов IEA CCUS.)

3. Global CCS Institute (2023). Global Status of CCS 2023. – Melbourne, Australia. (Ежегодные отчёты за 2021–2025 гг. содержат региональные профили Африки.)

4. IRENA (2023). Carbon Capture and Storage: Status, Barriers and Prospects in Africa // International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

5. OGCI (Oil and Gas Climate Initiative) (2022). CCUS in Africa – Opportunities and Challenges // OGCI Technical Report.

6. Eni S.p.A. (2022–2023). Congo LNG Project and M'Boundi CO_2-EOR Pilot // Корпоративные отчёты об устойчивом развитии и заявления по проекту (www.eni.com).

7. TotalEnergies (2023–2024). Decarbonization Strategy: CCUS in Angola Block 17 and Beyond // Публикации на официальном сайте TotalEnergies.

8. Chevron (2022). Carbon Capture and Storage Opportunities in the Congo Basin. SPE-200012-MS. (Представлено на Ежегодной технической конференции и выставке SPE.)

9. Evaluation of the CO_2 storage potential in the Lower Congo Basin, West Africa / S.R. Lawrence [et al.] // B: Geological Society, London, Special Publications. – 2002. – Vol. 233. – P. 251–268.

10. Геологическая служба Габона и Министерство нефти Габона (2023). Поправки в Нефтяной кодекс Габона в части геологического хранения CO_2 // Официальный вестник Габона.

11. Angolan National Agency for Oil, Gas and Biofuels (ANPG) (2023). Regulatory Framework for Carbon Capture and Storage in Angola // Публичные консультации.

12. SPE, EAGE, OTC (2020–2025). Секции «CCUS and EOR in West and Central Africa» в материалах Offshore Technology Conference (OTC, Houston) и конференций SPE/AAPG // Доступ через OnePetro.org (поиск по ключевым словам: CO_2-EOR, mature fields, West Africa, Central Africa, depleted reservoirs, carbon storage).

УДК 574.635

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ УРБОЭКОСИСТЕМЫ ШУВАЛОВСКОГО КАРЬЕРА

Чукаева Мария Алексеевна

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории МЭО НЦ «Экосистема»
shellx@bk.ru

Аннотация. Данная статья посвящена оценки эффективности применения фитотехнологии для восстановления урбоэкосистемы Шуваловского карьера. Приведены результаты натурного эксперимента, моделирующего процесс фитоочистки загрязненных вод Шуваловского карьера с применением трех видов макрофитов: рогоза широколистного (*Typha latifolia* L.), камыша озерного (*Scirpus lacustris* L.) и белокрыльника болотного (*Calla palustris* L.). Установлено значимое снижение концентрации Mn, Fe, Ni, Cu, Pb и нефтепродуктов на выходе из установки. Рассчитаны коэффициенты биоаккумуляции металлов макрофитами. Сделан вывод о перспективности использования белокрыльника болотного в фитоочистных системах городской среды.

Ключевые слова: Шуваловский карьер, фиторемедиация, *Calla palustris* L., биоаккумуляция, макрофиты.

В ходе проведенной ранее комплексной биогеохимической оценки территории Шуваловского карьера выявлена глубокая трансформация природного гидрохимического и литохимического фона. Выявлен нетипичный сульфатно-хлоридный натриево-кальциевый состав вод с экстремально высокими концентрациями сульфат-ионов. Рассчитанный суммарный индекс загрязнения позволил отнести поверхностные воды к VII классу качества («чрезвычайно грязная»), приоритетными поллютантами выступают Mn, Ni, Fe, Cu, NH_4^+ и нефтепродукты. Оценка донных отложений, в которых доля подвижных форм Mn, Pb и Ni превысила 50 % от их валового содержания, позволила оценить донные отложения как опасный потенциальный источник вторичного загрязнения, а также подтвердила хронический характер загрязнения водного объекта. Биотестирование подтвердило фитотоксичность воды и донных отложений. На территории водосбора выявлен локальный очаг чрезвычайно опасного загрязнения почвогрунтов с суммарным показателем Zc = 225 по подвижным формам металлов. Биотестирование почвогрунтов подтвердило их низкую продуктивность и высокую фитотоксичность [1].

Эффективным решением обозначенных проблем урбоэкосистемы будет использование для процессов фиторемедиации местных видов растений с высоким потенциалом к биоаккумуляции. Согласно целому ряду исследований совместное использование нескольких видов растений с разной корневой системой и разными сезонными моделями роста может значимо повысить эффективность работы фитоочистных сооружений [2].

Для создания фитоочистной системы производился отбор видов высшей водной растительности, отвечающих ряду важных критериев [3]:

– неприхотливость к условиям среды – виды растений должны быть устойчивы к колебаниям температуры, уровню воды и другим характеристикам среды;

– высокая скорость и эффективность размножения – быстрое размножение растений обеспечивает формирование плотного и устойчивого растительного покрова, необходимого для эффективной очистки;

– устойчивость к условиям заболоченных территорий – отобранные виды растений должны быть адаптированы к специфическим условиям повышенной влажности и возможного застоя воды;

– резистентность к нефтезагрязнению и полиметаллическому стрессу в сочетании с функцией гипераккумуляции.

После проведения обзора и сравнительного анализа различных видов высшей водной растительности, пригодных для использования в системе фитоочистных сооружений, были выбраны три вида, наиболее полно отвечающие вышеуказанным требованиям: рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.) и камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.), известные своей неприхотливостью и эффективностью очистки воды, а также белокрыльник болотный (*Calla palustris* L.). Решение оценить фиторемедиационный потенциал белокрыльника было принято так как это неприхотливое, холодостойкое и теневыносливое прибрежное растение, которое быстро разрастается и хорошо размножается вегетативно. Также по результатам ранее проведённых исследований акватории было сделано предположение о его способности к аккумуляции тяжелых металлов [5].

Растения были собраны в естественных условиях и в течение двух недель акклиматизировались на месте проведения эксперимента. Прошедшие адаптацию макрофиты в соотношении 60:20:20 (белокрыльник болотный : камыш озерный : рогоз широколистный) были помещены в экспериментальную фитоочистную установку, в которой находился раствор, моделирующий загрязнённые воды Шуваловского карьера. Для контроля фоновых концентраций загрязняющих веществ была сформирована контрольная группа растений, не участвовавшая в очистке. Эксперимент проводился в течение месяца. Для анализа эффективности процесса очистки отбор проб модельного раствора осуществлялся в трёх различных точках: на входе в очистную установку, внутри установки и на выходе из неё.

Экспериментальная установка, работающая в аэробных условиях, продемонстрировала высокую эффективность в удалении растворимых форм металлов и нефтепродуктов из раствора загрязненных природных вод. Исходная средняя концентрация Mn на входе в установку составляла 13,5 мг/дм³. После нахождения в установке в течение месяца, средняя концентрация Mn на выходе снизилась до 0,16 мг/дм³. Концентрация Fe снизилась с 0,6 мг/дм³ до 0,05 мг/дм³; Ni – с 0,2 мг/дм³ до 0,08 мг/дм³, Pb – с 0,08 мг/дм³ до 0,01 мг/дм³, Cu с 0,05 до 0,005 мг/дм³, нефтепродуктов с 0,2 до 0,02 мг/дм³. Таким образом, результаты исследования демонстрируют высокую эффективность и потенциал данной технологии для экологически безопасной очистки загрязнённых водных объектов урбоэкосистем.

По завершении экспериментального исследования проводился анализ накопленной биомассы на содержание приоритетных загрязнителей отдельно для каждого вида макрофита. Для этого отбирался достаточный объем растительной биомассы каждого вида, обеспечивающий статистическую достоверность результатов. Собранные растения вместе с корнями промывались дистиллированной водой, высушивались до воздушно-сухого состояния и измельчались в лабораторном блендере. Далее надземная часть вместе с корнями измельчались до состояния порошка, отбиралась навеска по 0,25 г и проводилось мокрое озоление с использованием концентрированной азотной кислоты (2 мл) и перекиси водорода (2 мл), в системе микроволнового разложения. Полученные суспензии переносились в мерные колбы и доводились дистиллированной водой до 25 мл. Растворы анализировались методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе ICPE-9000 (Shimadzu, Япония). После чего для изученных макрофитов производился расчёт коэффициентов биоаккумуляции по формуле:

$$\mathrm{BAF} = \frac{C_р}{C_в}, \quad (1)$$

где $C_р$ – концентрация элемента в растении мг/кг, $C_в$ – концентрация элемента в воде мг/дм^3.

Результаты представлены в графической форме на рисунке 1.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой способности исследуемых растительных организмов накапливать тяжелые металлы в своих тканях, что, в свою очередь, приводит к эффективному поглощению поллютантов из водного раствора и его очистки. Как видно из рисунка 1, все из изучаемых металлов были обнаружены в контрольных образцах растений, культивируемых в питательном растворе без добавления токсикантов. Это объясняется тем, что Fe, Mn, Ni и Cu – это эссенциальные мик-

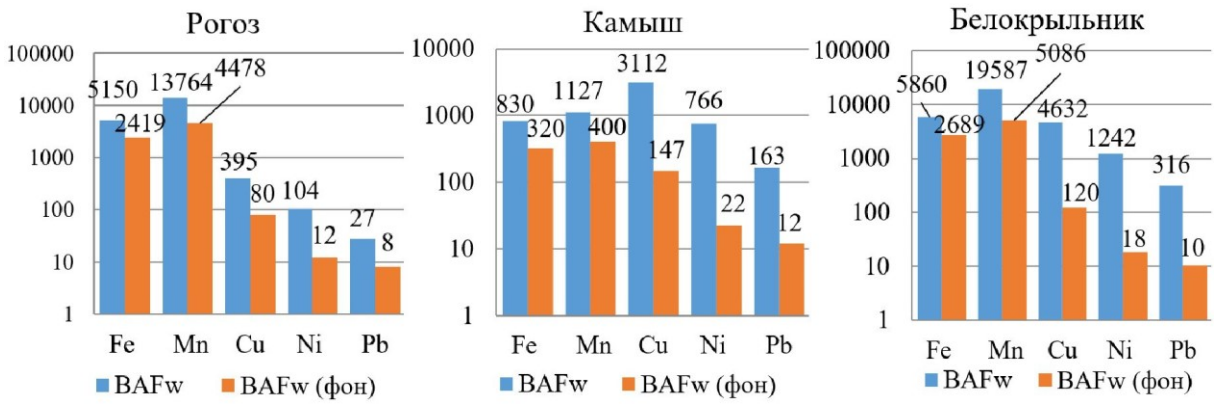


Рисунок 1 – Коэффициенты биоаккумуляциии макрофитов из загрязнённой воды Шуваловкого карьера (BAFw) и фоновой секции (BAFw фон)

роэлементы для растений, участвующие во множестве важных физиологических и биохимических процессах, однако их избыток может приводить к серьезным нарушениям в росте и развитии; Pb в незначительных количествах содержался в питательном растворе. Поэтому важно отметить, что в образцах белокрыльника, выращенных в питательном растворе и в растворах, содержащих значительные концентрации металлов, не было зафиксировано значимых различий в приросте биомассы и во внешнем виде (не было отмечено замедления развития, следов некроза, пожелтения листьев и т.д.). При этом из рисунка 1 видно, что белокрыльник активно накапливает изученные металлы из загрязнённых модельных растворов. По сравнению с фоновыми значениями, концентрация Fe, Mn, Cu, Pb и Ni в растениях увеличилась в 2,2; 3,9; 39; 69 и 32 раза соответственно. Наибольшее аккумуляционная способность была выявлена по отношению к Fe (5860 мг/кг) и Mn (19587 мг/кг). Таким образом, белокрыльник болотный является перспективным видом – гипераккумулятором металлов для внедрения в фитооочистные системы городской среды.

Список литературы:

1. Чукаева М.А. Комплексная биогеохимическая оценка территории Шуваловского карьера // Перспективные научные исследования: теория, методология и практика применения: сборник статей международной научной конференции (Санкт-Петербург, Сентябрь 2026). – 2026. – С. 30–35. – DOI: 10.58351/260901.2026.88.46.002

2. Wang G.X.A mosaic community of macrophytes for the ecological remediation of eutrophic shallow lakes // Ecological Engineering. – 2009. – Vol. 35. – № 4. – P. 582–590. – DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.06.006

3. Брешиани Р. Фитоочистка как инновационный метод водоочистки // Безопасность строительного фонда и городских территорий. – 2017. – № 1. – С. 55–61. – DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.885-900

4. Assessment of heavy metal accumulation potential of aquatic plants for bioindication and bioremediation of aquatic environment / D.S. Petrov, A.E. Korotaeva, M.A. Pashkevich, M.A. Chukaeva // Environmental Monitoring and Assessment. – 2023. – Vol. 195. – № 1. – DOI: 10.1007/s10661-022-10750-0

СТРОИТЕЛЬСТВО. ТРАНСПОРТ

УДК 504.064.47

ПРИМЕНЕНИЕ ОТРАБОТАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ (СЕРВИСНЫХ ЦЕНТРОВ) КАК СПОСОБ ЕГО ПЕРЕРАБОТКИ

Аникеева Анастасия Александровна

Уфимский государственный нефтяной технический университет
студентка 2 курса группа МЗС01в-25, кафедра охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов (ООСРИПР)
tuluza@lenta.ru

Аннотация. В работе представлен обзор по утилизации отработанного моторного масла. Предложено применение отработанного масла в качестве топлива для котлов отопления.

Ключевые слова: отработанное масло, переработка, утилизация, котел отопления.

С каждым годом растёт количество автомобилей в России и их влияние на экологию становится более заметным. Одной из важнейших проблем автомобильного транспорта является загрязнение экологии. Для обеспечения технического обслуживания и ремонта легкового и грузового автотранспорта применяются различные масла.

Отработанное масло (ОМ) – это отработанные масла, слитые из двигателей автомобилей, станков, компрессорных установок и трансмиссионных систем – опасные отходы, токсичные загрязнители окружающей среды и фактор риска для здоровья людей. Отработанным маслом называют загрязненный при эксплуатации продукт, непригодный для первоначального назначения. ОМ – техногенные отходы, которые негативно влияют на атмосферу, почву, природные водоемы [1].

В настоящее время существуют следующие способы переработки ОМ:

– Регенерация до исходного состояния. Этот способ направлен на восстановление свойств отработанного масла путём удаления примесей, накопленных в процессе эксплуатации. Цель регенерации – вернуть продукт к состоянию, максимально приближенному к исходному. Процесс регенерации включает комплекс последовательных этапов, разделённых на три основные группы: физические методы, предполагающие использование фильтрации, центрифугирования, термического воздействия и гравитационного разделения; физико-химические технологии, в числе которых экстракция, коагуляция, сорбция, использование ионообменных смол и других реагентов для удаления загрязняющих компонентов; химическая обработка, в рамках которой применяются щёлочи, кислоты, карбиды и катализаторы, позволяющие разрушать и осаждать устойчивые соединения.

– Восстановление. По своей сути метод схож с регенерацией, но отличается ожидаемым результатом. Если при регенерации продукт возвращается к первоначальному качеству, то восстановление лишь улучшает эксплуатационные характеристики масла, продлевая его срок службы. Очистка проводится от основных загрязняющих веществ, без полной реконструкции химического состава. Такой подход особенно актуален в тех случаях, когда повторное использование планируется в менее критичных технических условиях.

– Крекинг. Крекинг представляет собой термическое расщепление молекулярной структуры масла с последующим превращением его в топливные компоненты. В ходе обработки вещество разлагается на более лёгкие фракции, которые можно ис-

пользовать в качестве энергетического ресурса. Полученное горючее применяется для обогрева, в котельных установках или для генерации энергии [2].

Наиболее эффективным и безопасным способом утилизации ОМ является его сжигание в жидкотопливных автоматических котлах для получения тепла, и использовать для отопления помещений (сервисных центров) не посредственно на месте [3].

Котел отопления на отработанном масле – решение проблем с утилизацией отработки, а также источник практически даровой энергии.

Такие устройства выпускаются на промышленных предприятиях, проходят все необходимые проверки и испытания, имеют сертификаты качества и безопасности, не вызывают вопросов у пожарных и контролирующих служб.

Результаты патентного поиска в области утилизации отработанного масла: Патент RU 214919U1 Печь на отработанном масле с технологией сжигания отработанного масла с минимизацией выбросов вредных веществ в атмосферу Рябников К.М. Патент RU 19412U1 Нагревательное устройство Неустроев Е.Н. Патент RU 66008U1 Устройство для обогрева на жидком топливе Красельников А.И. [5,6,7].

Если детально рассмотреть всю цепочку переработки и регенерации отработанных масел, можно придти к неожиданному выводу: выбросы при сжигании отработанных масел в специальном оборудовании (котлах и воздухонагревателях с надувными горелками) значительно меньше, чем количество вредных веществ при переработке отработанных масел [4].

Эксплуатация котла не требует лицензирования или специальных разрешений так же как для любого оборудования, работающего на жидком топливе.

В связи с растущей важностью экологических проблем в современном обществе мировая экономика была вынуждена переориентироваться на экологически чистые технологии с низким уровнем загрязнения, основанные на переработке отходов. Кроме того, эти технологии не только обеспечивают экономическую ценность продуктов в конце их жизненного цикла, но и позволяют решить проблему ненадлежащего хранения отходов на свалках.

Эффективный путь утилизация отработанного масла путем переработки для отопления (сервисных центров) как способ его переработки имеет особое значение, как для экономики, так и для защиты окружающей среды.

Список литературы:

1. Электронный ресурс: – Режим доступа : https://rcycle.net/othody/otrabotannoe-maslo (дата обращения: 08.09.2026 г.).

2. Электронный ресурс: – Режим доступа : https://promecology.spb.ru/articles/metody-utilizatsii-otrabotannogo-masla/?ysclid = mn33undor794255056 (дата обращения: 08.09.2026 г.).

3. Электронный ресурс: – Режим доступа: жидкотопливный автоматический котел STV4 https://ufa.stavpech.ru/catalog/avtomaticheskie_kotly/kotel_na_otrabotannom_masle_stv4_400_kvt/ (дата обращения: 08.09.2026 г.)

4. Электронный ресурс: – Режим доступа : отраслевой портал https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid = 144 (дата обращения: 08.09.2026 г.)

5. Патент RU 214919U1 Российская Федерация, МПК R24C 5/02. Печь на отработанном масле с технологией сжигания отработанного масла с минимизацией выбросов вредных веществ в атмосферу / Рябников К. М.; заявитель и патентообладатель ООО «Ростовский завод котельного оборудования». – № 2022124010; заявл. 09.09.2022; опубл. 21.11.2022 Бюл. № 33.

6. Патент RU 19412U1 Российская Федерация, МПК F24C 5/04. Нагревательное устройство / Неустроев Е. Н.; заявитель и патентообладатель Неустроев Евгений Николаевич – № 2001110839/20; заявл. 20.04.2001; опубл. 27.08.2001.

7. Патент RU 66008U1 Российская Федерация, МПК F23D 5/00. Устройство для обогрева на жидком топливе / Красельников А. И.; заявитель и патентообладатель Красельников Александр Ильи. – № 2007112433/22; заявл. 03.04.2007; опубл. 27.08.2007 Бюл. № 24.

УДК 311.314:656.08 (571.56-25)

АНАЛИЗ АВАРИЙНОСТИ В Г. ЯКУТСКЕ ЗА ПЕРИОД 2020–2025 ГГ.

Ишков Александр Михайлович
Академия наук Республика Саха (Якутия)
Академик РС(Я), д-р техн. наук, профессор
lshkovalexander81@qmail.com

Бояршинов Анатолий Леонидович
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
канд. техн. наук, доцент;
Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
ведущий инженер
boyarshinov52@mail.ru

Антонов Гаврил Александрович
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
студент 2 курса магистратуры, напр. «Организация безопасности движения»

Аннотация. В данной научной статье рассматривается анализ ДТП за 2020–2025 гг. в г.Якутске. Показана статистика и дан анализ ДТП по Республике Саха (Якутия) за эти же годы: по видам ДТП, по дням и тяжести последствий недели, по времени суток, количества непосредственных нарушений ПДД, количества сопутствующих нарушений ПДД, количество непосредственных нарушений ПДД, непосредственных нарушений ПДД. Сравнение количества и доли нарушения ПДД разными участниками дорожного движения по годам.

Ключевые слова: Аварийность, человеческие потери, безопасность движения, водитель.

Сбор сведений Госавтоинспекцией проводится по каждому ДТП. Однако в официальную статистику попадают ДТП, в которых есть пострадавшие и (или) погибшие.

Так, общая статистика ДТП на территории г. Якутска представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Статистика аварийности за период 2020–2025 годы на территории г. Якутска

Год	Общее количество ДТП	Количество учетных ДТП	Погибло	Ранено	Повреждено транспортных средств
2020	2584	345	15	416	4715
2021	3328	369	14	464	6151
2022	3929	370	17	453	7303
2023	4469	490	19	626	8181
2024	3357	406	22	511	6094
2025	3123	373	24	488	5669
Всего	20790	2353	111	2958	38113

С 2020 года до конца 2023 года сохраняется тенденция роста всех показателей аварийности на территории г. Якутска.

При этом, тенденция роста тяжести последствий от ДТП (количество погибших в ДТП) сохраняется по сей день.

По видам ДТП статистика представлена в таблице 2.

Как показывает анализ аварийности наиболее тяжкие последствия случаются при столкновениях, наездах на препятствие и наездах на пешеходов.

Таблица 2 – Статистика аварийности по видам ДТП за период 2020–2025 годы на территории г. Якутска

	столкновение			наезд на пешехода		
	ДТП	погибло	ранено	ДТП	погибло	ранено
2020	160	5	221	112	6	108
2021	168	2	236	133	7	135
2022	164	9	226	133	5	137
2023	222	7	339	180	2	183
2024	170	6	253	156	5	159
2025	171	11	260	123	6	128
	опрокидывание			съезд с дороги		
	ДТП	погибло	ранено	ДТП	погибло	ранено
2020	8	1	10	12	2	22
2021	10	3	12	10	0	10
2022	3	0	3	17	0	28
2023	6	0	7	10	4	15
2024	4	1	3	8	1	12
2025	6	0	6	9	1	10
	наезд на препятствие			наезд на велосипедиста		
	ДТП	погибло	ранено	ДТП	погибло	ранено
2020	15	0	16	25	1	25
2021	20	1	31	14	1	13
2022	20	1	25	16	1	15
2023	24	4	20	14	0	14
2024	20	2	24	24	1	23
2025	31	4	37	21	0	21

Значительное количество ДТП происходит в светлое время суток в будние дни, когда транспортный поток более плотный и связан в основном с трудовой миграцией (дом – работа – дом). Наглядно аварийность показана в таблице 3.

Таблица 3 – Аварийность по дням недели

	Количество ДТП					
	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Понедельник	54	51	50	72	74	64
Вторник	40	53	48	75	57	54
Среда	47	40	46	56	50	54
Четверг	50	52	56	75	57	52
Пятница	55	63	69	67	60	64
Суббота	54	61	56	84	56	53
Воскресенье	45	49	45	61	52	32
Всего	345	369	370	490	406	373

Наглядно видно, что в среду и воскресенье приходится наименьшее количество ДТП. При этом, тяжесть последствий распределяется по другим дням недели в таблице 4

Таблица 4 – Тяжесть последствий по дням недели

	Погибло						Ранено					
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Понедельник	2	1	2	1	3	3	63	65	65	85	87	79
Вторник	2	3	2	2	1	1	49	63	59	93	61	73
Среда	3	5	1	0	1	6	51	46	54	70	66	74
Четверг	1	0	2	3	3	0	60	69	69	85	78	65
Пятница	2	2	0	1	4	1	62	76	77	88	81	75
Суббота	2	3	8	8	1	5	72	77	69	111	68	67
Воскресенье	3	0	1	2	4	6	58	57	59	86	60	41
Всего	15	14	16	17	17	22	415	453	452	618	501	474

Наибольшее количество погибших и раненых в ДТП приходится на субботу. В среднем 4 погибших и 77 пострадавших по субботам.

Как показывает статистика, количество пострадавших в ДТП зависит от многих факторов – вид ДТП, транспортного средства, количества участников ДТП и т.д.

По времени суток аварийность увеличивается в утреннее, дневное и вечернее время, когда транспортный поток становится наиболее плотным, таблица 5.

Таблица 5 – Распределение количества ДТП по времени суток

количество ДТП	ночное время 00:00 – 05:59	утреннее время 06:00 – 11:59	дневное время 12:00 – 17:59	вечернее время 18:00 – 23:59
2020	28	83	130	104
2021	29	79	137	124
2022	27	89	146	108
2023	26	119	194	151
2024	20	110	148	128
2025	35	103	132	103

Исходя из данных определено, что рост аварийности приходится на дневное и вечернее время.

Большинство ДТП совершаются по вине водителей. Так, основными непосредственными нарушениями ПДД РФ водителями являются нарушение правил расположения транспортных средств на проезжей части, несоблюдение очередности проезда, непредставление преимущества в движении пешеходу, неправильный выбор дистанции, нарушение правил проезда пешеходного перехода.

Наглядно общее количество непосредственных нарушений водителями представлено в таблице 6.

Таблица 6 – Анализ количества непосредственных нарушений ПДД

Годы	Количество учетных ДТП	ДТП с непосредственными нарушениями ПДД	Доля ДТП с нарушениями ПДД	Погибло	Ранено
2020	345	315	91 %	11	388
2021	369	332	90 %	8	420
2022	370	334	90 %	13	417
2023	490	439	90 %	15	568
2024	406	382	94 %	14	479
2025	373	362	97 %	19	464

Как показывает анализ ДТП, практически все ДТП совершаются при непосредственном нарушении водителями ПДД. За последние 3 года наблюдается рост количества нарушений.

Однако, в некоторых случаях ДТП совершаются при сопутствующих условиях. Из сопутствующих нарушений ПДД являются оставление места ДТП, управление транспортным средством лицом, не имеющим права на управление транспортных средств, управление транспортного средства в состоянии алкогольного опьянения, нарушения водителями правил применения ремней безопасности, нарушение правил применения мотошлема, эксплуатация технически неисправного транспортного средства таблица 7.

Таблица 7 – Анализ количества сопутствующих нарушений ПДД

Годы	Количество учетных ДТП	ДТП с сопутствующими нарушениями ПДД	Доля ДТП с нарушениями ПДД	Погибло	Ранено
2020	345	177	51 %	11	220
2021	369	210	57 %	6	269
2022	370	204	55 %	14	262
2023	490	245	50 %	13	335
2024	406	267	66 %	14	328
2025	373	250	67 %	14	325

При рассмотрении непосредственных нарушений ПДД установлена отрицательная динамика (таблица 8).

Таблица 8 – Анализ непосредственных нарушений ПДД

Нарушения ПДД	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Несоблюдение очередности проезда	79	61	72	93	90	88
Нарушение правил расположения ТС на проезжей части	43	52	80	90	75	85
Нарушение правил проезда пешеходного перехода	43	58	43	48	40	34
Неправильный выбор дистанции	39	33	40	52	38	40
Нарушение правил выезда на встречную полосу в местах, где это разрешено	29	44	18	25	13	6
Нарушение требований сигналов светофора	16	22	12	30	10	10
Несоблюдение условий, разрешающих движение транспорта задним ходом	12	12	8	12	5	9
Не предоставление преимущества в движении пешеходу	0	16	36	61	83	64

При анализе аварийности в первую очередь изучаются нарушения водителями ПДД в целях их дальнейшего недопущения. При этом, наблюдается рост количества нарушений таких как несоблюдение очередности проезда, нарушение правил расположения транспортных средств на проезжей части, не предоставление преимущества пешеходу, при снижении количества нарушений нарушения правил выезда на встречную полосу в местах, где это разрешено, несоблюдение условий, разрешающих движения транспорта задним ходом и нарушение требований сигналов светофора.

Отмечается, что снижение указанных нарушений достигнуто в основном благодаря постепенной работе Госавтоинспекции и Окружной администрации г. Якутска за счет технических решений в виде установки табло обратного отсчета времени на светофорных объектах, расположенных на территории г. Якутска. Количество выездов на полосу для встречного движения начало снижаться с 2022 года с момента введения в эксплуатацию объекта капитального ремонта Окружного шоссе с принудительным разделением встречных транспортных потоков и с дальнейшим применением таких мер на магистральных дорогах и улицах таких как ул. Можайского, региональные автомобильные дороги «Умнас» в сторону с. Владимировка и «Нам» в мкр. Марха до местности «Ус Хатын».

Доля нарушений ПДД водителями составляет практически все 94 % – 97 %.

Таким образом, факторы совершения ДТП зависит от всех участников дорожного движения. Сравнение доли нарушений ПДД пешеходами и водителями представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнение количества и доли нарушения ПДД разными участниками дорожного движения по годам

Годы	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Количество учетных ДТП	345	369	370	490	406	373
ДТП с непосредственными нарушениями водителями ПДД	315	332	334	439	382	362
Доля нарушений водителями ПДД	91 %	90 %	90 %	90 %	94 %	97 %
ДТП с непосредственными нарушениями пешеходами ПДД	20	23	22	29	14	11
Доля нарушений пешеходами ПДД	6 %	6 %	6 %	6 %	3 %	3 %

Госавтоинспекцией на постоянной основе проводится анализ аварийности. При этом, учитывается место совершения ДТП в зависимости от масштабов анализа – перекрестки, участки дорог, микрорайоны, районы, территории.

В результате увеличения количества автотранспорта, протяжённости дорог сохраняется отрицательная динамика аварийности в г. Якутске.

Список литературы:

1. Сведения и анализ состояния аварийности на автодорогах столицы Республики Саха (Якутия) г.Якутска за 12 месяцев 2020 год.
2. Сведения и анализ состояния аварийности на автодорогах столицы Республики Саха (Якутия) г.Якутска за 12 месяцев 2021 года.
3. Сведения и анализ состояния аварийности на автодорогах столицы Республики Саха (Якутия) г.Якутска за 12 месяцев 2022 года.
4. Сведения и анализ состояния аварийности на автодорогах столицы Республики Саха (Якутия) г.Якутска за 12 месяцев 2023 год.
5. Сведения и анализ состояния аварийности на автодорогах столицы Республики Саха (Якутия) г.Якутска за 12 месяцев 2024 года.
6. Сведения и анализ состояния аварийности на автодорогах столицы Республики Саха (Якутия) г.Якутска за 12 месяцев 2025 года.

УДК 69.059.25

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ УСИЛЕНИИ ФУНДАМЕНТОВ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В СТЕСНЁННЫХ УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Кербс Яна Павловна
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
студент 4 курса группы 24 институт инженерно-экологического строительства и механизации
Kerbs.yana@mail.ru

Медовикова Анастасия Алексеевна
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
студент 4 курса группы 24 институт инженерно-экологического строительства и механизации
anastasiiaame@gmail.com

Римшин Владимир Иванович
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
д-р техн. наук, профессор
v.rimshin@niisf.ru

Аннотация. Статья посвящена организационно-технологическим решениям при усилении фундаментов объектов культурного наследия в стеснённых условиях городской застройки. Проанализированы буроинъекционные сваи, инъекционное укрепление грунтов, грунтоцементные элементы. Показана роль захваток, временных креплений и геотехнического мониторинга. Сделан вывод о решающем значении организационного планирования для сохранения исторической подлинности объектов.

Ключевые слова: объект культурного наследия, буроинъекционные сваи, захватки, геотехнический мониторинг.

Усиление фундаментов исторических зданий в условиях плотной городской застройки – сложная инженерная и организационная задача. Необходимо одновременно обеспечить механическую надёжность конструкций и сохранить их историческую подлинность. Типовые решения, применяемые в новом строительстве, здесь неприменимы. Ситуация осложняется близостью соседних зданий, развитой сетью подземных коммуникаций, ограниченным пространством для техники и материалов. Стеснённость площадки проявляется в расстоянии до соседних зданий (часто 3–5 м), отсутствии площадей для складирования, невозможности применения крупногабаритной техники, жёстких ограничениях по шуму и вибрации, наличии охранных зон инженерных сетей. Дополнительно требуется сохранять предметы охраны: исторические фундаменты, цоколи, декоративные элементы.

Среди геотехнических методов, адаптированных для исторической застройки, наиболее востребованы буроинъекционные сваи (рисунок 1), инъекционное упрочнение грунтов и грунтоцементные элементы. Буроинъекционные сваи устраиваются диаметром 150–250 мм через существующие фундаменты или рядом с ними. Бурение ведётся малогабаритными установками, способными работать в подвалах и вблизи стен. Раствор нагнетается под давлением, обеспечивая надёжный контакт с грунтом и кладкой. Сваи включаются в работу постепенно, перераспределяя нагрузку. Инъекционное упрочнение грунтов предполагает подачу цементного или полимерного состава через пробуренные шпуры. Заполняются пустоты, трещины и ослабленные зоны. Метод эффективен для остановки осадок без изменения исторической структуры фундамента [1, 2].

Ключевое организационное решение – разбивка работ на захватки. Это позволяет минимизировать единовременное вскрытие грунта, сохранить устойчивость здания, вести работы без остановки эксплуатации. Типовая последовательность в преде-

лах одной захватки включает устройство временного крепления в виде металлической балки, заводимой в штрабу в кладке и закреплённой анкерами в фундаменте; разработку грунта под подошвой на ограниченном участке; устройство монолитного элемента или буроинъекционной сваи; переход к следующей захватке после набора прочности. Длина захватки обычно не превышает 2–3 м, работы ведутся симметрично с противоположных сторон здания [3].

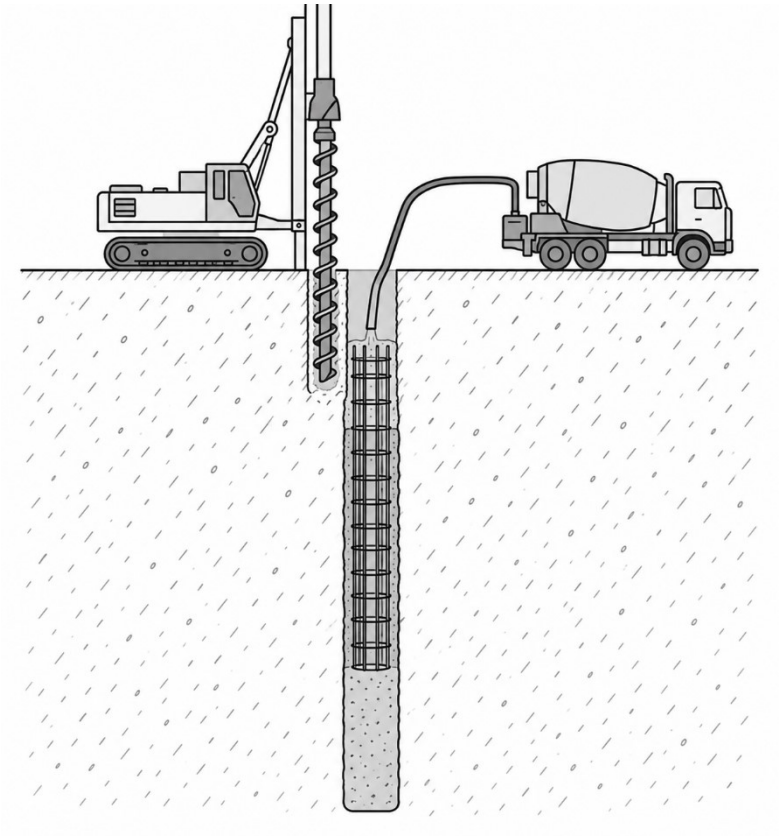


Рисунок 1 – Схематичное изображение установки буроинъекционных свай

Геотехнический мониторинг при усилении фундаментов памятников архитектуры обязателен и включает установку марок и реперов, регулярные измерения осадок и кренов, визуальный осмотр трещин и деформаций, виброметрию при работе техники. При обнаружении опасных отклонений работы приостанавливаются до выяснения причин.

Отдельно следует остановиться на выборе рациональной технологии усиления в зависимости от состояния исторической кладки и свойств основания. Буроинъекционные сваи эффективны при необходимости передачи дополнительной нагрузки на нижележащие плотные слои грунта; инъекционное упрочнение – при наличии пустот, трещин и ослабленных зон в теле фундамента и контактной зоне «фундамент–грунт»; грунтоцементные элементы – при необходимости создания армирующего массива в стороне от охраняемых конструкций. На практике чаще всего применяется комбинированная схема: сначала выполняется инъекционное заполнение пустот и трещин, затем устраиваются буроинъекционные сваи с захватками, а грунтоцементные элементы используются как дополнительный барьер или элемент ограждения. Такой подход позволяет дифференцированно управлять осадками и избегать концентрации напряжений в наиболее ослабленных участках. При этом критерием выбора служат не только несущая способность и деформативность, но и технологическая допустимость: возможность работы малогабаритной техникой, уровень вибрации, шума и влияние на соседние здания.

Грунтоцементные элементы (Jet Grouting) создают в грунте армирующие элементы, однако высокое давление может повредить соседние конструкции [4]. Технология предполагает подачу цементного раствора под давлением до 40 МПа, что обеспечивает перемешивание грунта с вяжущим и формирование колонн диаметром 600–

1200 мм. В исторической застройке метод применяется ограниченно – преимущественно на участках, удалённых от охраняемых объектов.

Ключевое организационное решение – разбивка работ на захватки. Это минимизирует единовременное вскрытие грунта, сохраняет устойчивость здания и позволяет вести работы без остановки эксплуатации [3]. В пределах одной захватки вначале устраивается временное крепление – металлическая балка заводится в штрабу глубиной 150–200 мм и закрепляется анкерами с шагом 500–800 мм. Затем разрабатывается грунт под подошвой на глубину 500–800 мм вручную или малогабаритной техникой. После этого устраивается монолитный элемент усиления или буроинъекционная свая с нагнетанием раствора под давлением 0,2–0,6 МПа. По завершении выполняется обратная засыпка с послойным уплотнением, а переход к следующей захватке – только после набора прочности (через 3–7 суток). Длина захватки не превышает 2–3 м, работы ведутся симметрично с противоположных сторон здания. Схема включает существующую кладку, временную балку в штрабе, анкеры, буроинъекционную сваю, монолитный элемент усиления и границы захваток.

Существенную роль играет и организационно-технологическая документация, регламентирующая взаимодействие участников работ на объекте культурного наследия. Помимо ППР, разрабатываются технологические регламенты на каждый вид усиления, схемы операционного контроля качества и журналы мониторинга. В них фиксируются допустимые отклонения геометрических параметров свай и анкеров, давление нагнетания раствора, продолжительность набора прочности, а также предельные значения дополнительных осадок и кренов. Особое значение имеет согласование решений с органами охраны памятников и научным сопровождением: любые изменения первоначального проекта, связанные с обнаружением скрытых дефектов кладки или коммуникаций, должны оперативно отражаться в исполнительной документации. Такой подход обеспечивает не только механическую надёжность усиления, но и сохранение исторической подлинности объекта, а также снижает риск аварийных ситуаций при производстве работ в стеснённых условиях.

Отдельного внимания заслуживает безопасность. В стеснённых условиях необходимо исключить повреждение соседних зданий и коммуникаций. Применяются защитные экраны, виброизоляция, ограничение скорости техники, защитные настилы и ограждения. Все работники проходят инструктаж с учётом специфики объекта культурного наследия

Таким образом, усиление фундаментов объектов культурного наследия в стеснённых условиях требует сочетания современных геотехнических методов и продуманной организации работ. Наиболее рациональны буроинъекционные сваи и инъекционное укрепление грунтов, применяемые захватками с временными креплениями. Обязательный мониторинг обеспечивает безопасность и сохранность памятника.

Список литературы:

1. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика. – М. : Издательство АСВ, 2020. – 322 с.

2. Римшин В.И., Кецко Е.С., Трунтов П.С. Большой строительный словарь. – Т. 2. П–Я / под ред. В.И. Римшина. – М. : Издательский дом АСВ, 2022. – 626 с.

3. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шумилова Е.Ю. Технология и организация производства строительного комплекса: учебное пособие. – Минеральные Воды: Северо-Кавказский филиал БГТУ им. В. Г. Шухова, 2021. – 261 с.

4. Ланько С.В. Влияние грунтоцементных конструкций на деформируемость ограждений котлованов в условиях городской застройки : автореф. дис. … канд. тех. наук 05.23.02 / Ланько Сергей Владимирович. – М., 2013. – 23 с.

УДК 712.5

ОЗЕЛЕНЕНИЕ КРОВЕЛЬ И ФАСАДОВ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Манастырный Дмитрий Николаевич

Донской государственный технический университет
студент
dimamanastirniy@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются приемы озеленения кровель и фасадов многоэтажных жилых комплексов как способ компенсировать нехватку зеленых насаждений в плотной застройке. По научным публикациям систематизированы виды озеленения, описаны конструкция озелененной кровли, фасадные системы и особенности подбора растений. Показаны климатические, экономические и эксплуатационные ограничения применения таких решений в России.

Ключевые слова: зеленая архитектура, озеленение кровель, вертикальное озеленение, зеленые фасады, жилой комплекс.

Введение

Современные мегаполисы страдают от загрязнения воздуха, шума и нехватки зеленых насаждений. Ответом на эти проблемы служит «зеленая архитектура», предлагающая шире применять горизонтальное и вертикальное озеленение зданий [1, с. 226]. Когда свободной земли под газоны и деревья остается мало, особый интерес для многоэтажных жилых комплексов представляют поверхности самого здания: кровли и стены [2, с. 83]. ***Цель работы*** – обобщить сведения о видах, конструктивных особенностях и условиях применения озеленения кровель и фасадов жилых комплексов на основе анализа публикаций [1–3].

1. Понятия и исторические предпосылки

Горизонтальным называют озеленение кровли здания и крыш пристроенных к нему сооружений, вертикальным – выращивание растений на вертикальных поверхностях [1, с. 226]. По мнению автора [3, с. 66–69], к вертикальному озеленению можно отнести и ярусное расположение озелененных террас, как в миланском комплексе «Bosco Verticale», тогда как одиночная крыша к нему не относится. Поэтому в многоэтажных жилых комплексах граница между кровельным и фасадным озеленением условна, и оба направления целесообразно рассматривать вместе (рисунок 1). Озеленение зданий известно много столетий: в Скандинавии и Средней Азии кровли покрывали мхом и травой ради утепления и стока воды, в России сады на крышах описаны с XVII в., а в 1920-х гг. архитекторы включили плоские эксплуатируемые озелененные кровли в структуру новой жилой среды [1, с. 226–227].



Рисунок 1 – Обобщенная схема видов озеленения кровель и фасадов жилых зданий (составлено автором по данным [1–3])

2. Озеленение кровель

Площадь покрытий жилых зданий только в Москве достигает сотни миллионов м², а эксплуатируемая кровля дает дополнительную площадь, равную площади застройки [1, с. 227]. Озеленение снижает летнюю температуру города, уменьшает загрязнение воздуха, поглощает шум, защищает кровельное покрытие от ультрафиолета и механических повреждений, сокращает расходы на кондиционирование и отопление; в Англии и Германии выяснено, что поверхность травяной крыши нагревается слабее, чем кровля с рулонным или гравийным покрытием [1, с. 227, 230]. По характеру использования кровли делят на интенсивные и экстенсивные (табл. 1).

Таблица 1 – Интенсивные и экстенсивные озелененные кровли (составлено по данным [1, с. 227–228])

Признак	Интенсивное озеленение	Экстенсивное озеленение
Использование	Многофункциональное: сады, ландшафтные объекты, площадки для отдыха и спорта	Доступ людей ограничен; экологическая и эстетическая функции
Растительность	Газоны, клумбы, кустарники, деревья; грунт по глубине залегания корней	Газонные травы, рулонные газоны, маты с сиккулентами, почвопокровные растения
Основание	Железобетонные плиты с уклоном 1,5–2 %; уклонообразующий, пароизоляционный, теплоизоляционный, водоизоляционный, корнезащитный и разделительный слои	Легкое покрытие; на типовых жилых зданиях возможно без усиления конструкций при уклоне не более 6 %

Конструкция озелененной кровли многослойна: несущая плита, гидроизоляция, утеплитель, дренажный слой, геотекстиль, посадочно-дренажный слой и грунт с растениями [1, с. 227]. Растения на высоте испытывают перепады температуры и ветер, поэтому нужны солнце- и ветрозащитные экраны и тщательный подбор видов [1, с. 227]. Для снижения нагрузки применяют системы вроде «Флорадрен» (ячеистые полиэтиленовые элементы массой 2 кг/м², накапливающие дождевую воду) и теплоизоляцию из пеностекла [1, с. 228–229]. В Москве газон устроен на крыше гастронома «Новоарбатский» (2007 г.), сквер – над подземным гаражом на улице Наметкина (1997 г.) [1, с. 228].

3. Озеленение фасадов

Фасадное озеленение улучшает облик здания, защищает от ветра, повышает теплотехнические характеристики и очищает воздух [2, с. 83–84]. По приему различают сплошное озеленение глухих фасадов и одиночное, для небольших участков; по задаче – функциональное, экологическое и декоративное [2, с. 84]. Зарубежная классификация делит зеленые стены на зеленые фасады (вьющиеся растения на решетках, тросах, в горшках) и живые стены (панели и модули с предварительно выращенными растениями, не требующие почвы, но нуждающиеся в большей защите) [3, с. 66–67].

По принципу работы выделяют три системы [2, с. 84–85]. Войлочная (полимерный войлок с кармашками, мох сфагнум, гидропонное питание, капельный полив) проста в уходе и подходит для обширного озеленения. Модульная (герметичные пластиковые панели со скрытым орошением) допускает замену растений и подходит для частичного озеленения. Контейнерная (металлический каркас с горшками) очищает воздух, но дорога, и пригодна для декоративных решений.

Растения должны переносить ветер, мороз и засуху: на теневых сторонах нужны теневыносливые виды, в верхней части – выдерживающие солнце и порывы ветра, а для России в целом подходят вечнозеленые и морозостойкие [2, с. 85]. Для Ростовской области предложены можжевельник казацкий, плющ, плетистая роза и клематис [2, с. 86], для Москвы – многолетние лианы: актинидия до 6 м и виноград амурский до 20 м [1, с. 229]. Наиболее известный пример – миланский «Вертикальный лес» (480 крупных и средних деревьев, 300 карликовых, 11 тыс. многолетников, 5 тыс. ку-

стов), где растения защищают помещения от солнца и пыли, а полив автоматизирован [1, с. 229]. Российский пример – проект озеленения фасада ЖК «Звездный» в Каменске-Шахтинском: модульная система, субстрат из мха сфагнума с керамзитом, гидропонный полив [2, с. 85]. Помимо стен, к вертикальному озеленению относят вертикальные клумбы, эко-граффити из мха и вертикальные фермы [3, с. 68–71].

Список литературы:

1. Туркина Е.А., Чистяков Д.А., Калугин А.Н. Тенденции развития горизонтального и вертикального озеленения зданий // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 1. – С. 226–231. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-gorizontalnogo-i-vertikalnogo-ozeleneniya-zdaniy (дата обращения: 01.10.2026).

2. Журавская Е.А., Скабэ Я.А. Зеленые стены: новый тренд в архитектуре жилых комплексов // Молодой исследователь Дона. – 2024. – Т. 9. – № 3. – С. 83–88. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/zelenye-steny-novyy-trend-v-arhitekture-zhilyh-kompleksov (дата обращения: 01.10.2026).

3. Мхитарян К.О. Типология форм вертикального озеленения в городской среде // Известия КГАСУ. – 2017. – № 1(39). – С. 65–71. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-form-vertikalnogo-ozeleneniya-v-gorodskoy-srede (дата обращения: 01.10.2026).

УДК 712.4

ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ЖИЛЫХ КОМПЛЕКСОВ

Манастырный Дмитрий Николаевич

Донской государственный технический университет
студент
dimamanastirniy@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются цифровые инструменты управления зеленой инфраструктурой жилых комплексов: придомовыми насаждениями, озелененными кровлями и фасадами. По научным публикациям и национальному стандарту описаны цифровые схемы озеленения, автоматизация полива с датчиками и параметры кровель и фасадных систем, значимые для цифровой модели. Показаны ограничения внедрения в России и предложена последовательность применения таких решений в жилых комплексах.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура, жилой комплекс, цифровые схемы озеленения, автоматический полив, озелененные кровли, вертикальное озеленение.

Введение

Уплотнительная застройка мешает сохранять и расширять озелененные территории традиционными способами: для парков, скверов и дворовых насаждений не хватает земли [1, с. 53]. По данным Greenpeace, приведенным в [1, с. 53], с 2000 по 2015 г. площадь зеленых зон сократилась на 700 га в Москве и на 6400 га в Стамбуле, тогда как в Лондоне выросла на 260 га. Альтернативой считают вертикальное озеленение, включая фасады, балконы и лоджии [1, с. 53]. Не менее важна управляемость созданных насаждений: действующая методика инвентаризации, по мнению автора [2, с. 80], технологически устарела, так как опирается на полевые работы и бумажные картосхемы. Параллельно развивается концепция «умного» благоустройства, использующая датчики и аналитику данных [3, с. 431–432]. ***Цель работы*** – выявить, какие цифровые подходы к учету и обслуживанию зеленых насаждений описаны в источниках [1–4] и как их применить в жилых комплексах. Использован аналитический обзор.

1. Объекты зеленой инфраструктуры и параметры учета

В жилом комплексе можно выделить насаждения на земле, озелененные кровли и озелененные фасады. Придомовые насаждения относятся к насаждениям общего назначения [2, с. 80]. Кровли регулирует национальный стандарт [4], действующий во всех климатических зонах России [4, с. 1]; он требует включать площадь кровли, озелененной по стационарному экстенсивному, полуинтенсивному или интенсивному типу, в баланс зеленых насаждений территории независимо от этажности здания [4, с. IV]. Типы кровель различаются толщиной субстрата, растениями и уходом (таблица 1); конструкция включает водоизоляционный, защитный, корнезащитный, влагонакопительный, дренажный и фильтрующий слои, субстрат и растительный слой [4, с. 6–10].

Таблица 1 – Параметры типов озеленяемых крыш, значимые для цифрового учета (составлено по данным [4, с. 7–10, 20–21])

Признак	Интенсивный тип	Полуинтенсивный тип	Экстенсивный тип
Слой субстрата, мм	Не менее 300	От 150 до 300	Как правило, от 90 до 150
Растения	Газоны, многолетники, кустарники, деревья	Газоны, травянистые растения, кустарники, изредка древесные	Мхи, лишайники, суккуленты, травянистые растения, злаки
Уход и полив	Постоянный уход, регулярный полив	Ограниченный, но постоянный уход; потребность в поливе определяет проект	Через два года специальный уход, как правило, не нужен; полив за счет осадков
Расчетная нагрузка от растительности, кН/м²	От 0,05 (газон) до 1,50 (деревья)	От 0,10 до 0,20	0,10

Стандарт требует считать слои крыши при полном влагонасыщении, отдельно учитывать деревья и элементы благоустройства, а предельные нагрузки не нормирует и поручает определять проектом [4, с. 18–19]. Для фасадов в [1, с. 54–56] описаны три типа: вьющиеся растения в грунте у цоколя на опорах с воздушным зазором; растения в емкостях, мобильных или стационарных; гидропонные системы, вес которых вместе с растениями около 30 кг/м² [1, с. 56].

2. Цифровые схемы озеленения как основа учета

Цифровая схема озеленения – цифровая карта или план, подробно описывающий состояние насаждений и отдельных объектов озеленения в границах территории вместе с инженерными системами города [2, с. 81]. Она связана с картами коммуникаций и кадастровыми картами, поскольку для определения балансодержателя нужны точные границы участков [2, с. 81–82]. Данные собирают камерально по открытым материалам дистанционного зондирования и панорамной уличной фотосъемке (положение, порода, высота, значительные повреждения), обрабатывают в ГИС и формируют базу [2, с. 81]. Схема включает слои городской среды и слои объектов озеленения; нежелательные породы отмечают красными знаками, а состояние объектов оценивают как плохое, удовлетворительное или хорошее [2, с. 83–86].

Достоинства подхода: детальность по каждому растению и сокращение полевых работ; применение – оценка состояния, планирование ухода, контроль мероприятий, проектирование новых посадок [2, с. 86–87]. База имеет гибкую георелационную структуру [2, с. 85], поэтому ее можно дополнить кровельными и фасадными объектами с параметрами из табл. 1 и [1] (рисунок 1). Методика [2] отработана на уличных насаждениях в Новосибирске, поэтому перенос на жилые комплексы, кровли и фасады – предложение автора статьи, требующее проверки.

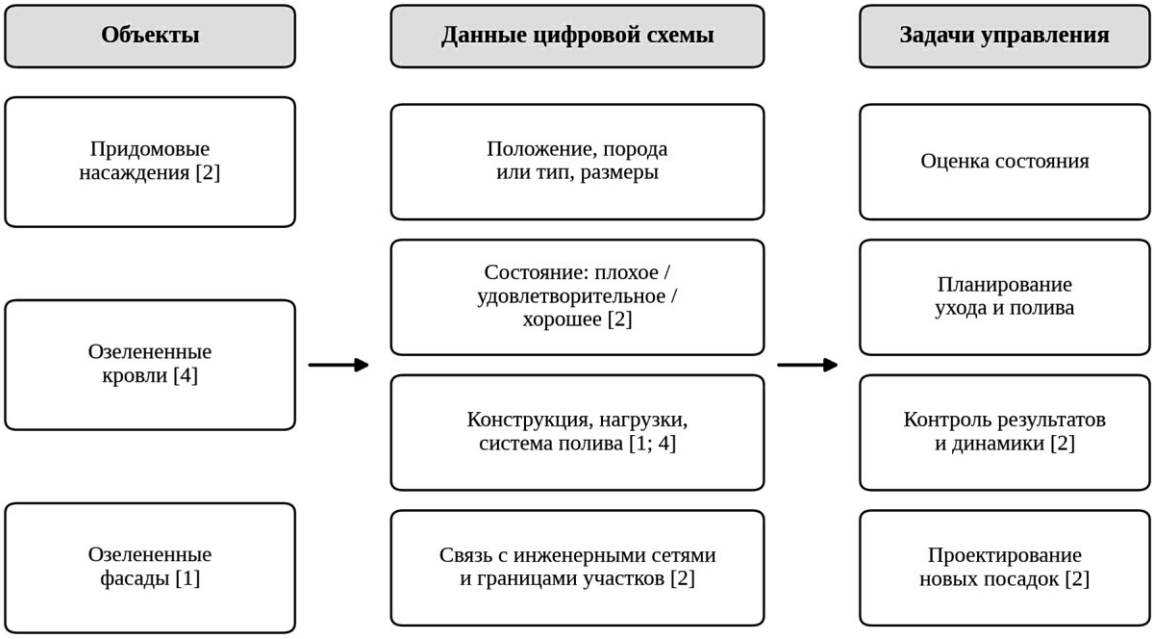


Рисунок 1 – Структура данных цифровой схемы озеленения жилого комплекса (составлено автором по данным [1; 2; 4])

3. Датчики, автоматизация и управление поливом

Авторы [3, с. 432] относят к базовым технологиям сети датчиков качества воздуха, шума и температуры, а также аналитику данных и искусственный интеллект для прогноза и оптимизации работы инфраструктуры; названы и умные поливочные системы [3, с. 431–432]. Сведения [3] обзорные и не содержат количественных оценок эффекта. Для фасадов в [1, с. 54–56] описано, что на миланском «Вертикальном лесу» влажность почвы и состояние растений контролируют сенсоры в автоматической системе орошения; в Эберсвальде полив, вращение кадок и освещение деревьев на фа-

саде полностью автоматизированы; в гидропонных стенах раствор подается в режиме рециркуляции. Мобильные вазоны на магистралях, напротив, поливают ночью коммунальной спецтехникой [1, с. 54].

Для кровель стандарт [4, с. 16–18] устанавливает: на экстенсивных кровлях вода поступает из осадков, но нужен резерв на засуху (емкости с дождевой водой или гидрант); интенсивные требуют регулярного полива; для полуинтенсивных потребность определяет проект. Управление допускается вручную или автоматически по таймеру; трубопровод защищают от коррозии и оснащают устройством полного опорожнения против замерзания; осенью и зимой полив сокращают или прекращают. Из требований [4, с. 11–14] можно вывести параметры для цифровой модели: инсоляцию, осадки, засухи, ветер, загрязнение воздуха и зоны выбросов от вентиляционного оборудования, а также показатели субстрата – влагоемкость (не менее 45 % объема для интенсивного и 35 % для экстенсивного типа), pH (5,5–8,0 и 6,5–8,0) и соли (до 2,5 и 3,5 г/л). Использовать их как пороги для датчиков – предложение автора: требований к цифровым системам в рассмотренных разделах [4] нет.

Список литературы:

1. Литвинова А.И., Евстигнеева Н.А., Евстигнеева Ю.В. Вертикальное озеленение городских пространств // Биосфера. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 52–59. – DOI: 10.24855/biosfera.v14i1.661.

2. Муллаярова П.И. Создание цифровых схем озеленения для эффективного управления городскими зелеными насаждениями. – 2019. – С. 79–88. – DOI: 10.33764/2618-981X-2019-4-2-79-88.

3. Стебенькова А.С., Верин Д.В. Умное благоустройство в городской среде: инновационные подходы к улучшению качества жизни горожан. – 2024. – № 3 (72). – С. 431–433.

4. ГОСТ Р 58875-2020. «Зеленые» стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования. Введ. 2020-06-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – URL : https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293721/4293721050.pdf (дата обращения: 04.10.2026).

УДК 656.135

ЗНАЧЕНИЕ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В УПРАВЛЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГРУЗОВОГО АВТОТРАНСПОРТА

Савич Екатерина Константиновна
Самарский университет им. С.П. Королева
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении
savich.ek@ssau.ru

Арзамасцев Александр Алексеевич
Самарский университет им. С.П. Королева
аспирант
tria16@mail.ru

Фролова Анастасия Сергеевна
Самарский университет им. С.П. Королева
студент
anastasiy-f@mail.ru

Аннотация. В статье обосновывается роль предиктивной аналитики как инструмента управления эффективностью технического обслуживания грузового автомобильного транспорта. Рассматриваются ограничения традиционных регламентных и реактивных подходов, не позволяющие учитывать фактическое техническое состояние и индивидуальные условия эксплуатации транспортных средств. Показано, что внедрение предиктивной аналитики обеспечивает переход от дискретного управления затратами к непрерывному управлению надежностью автопарка. Систематизированы эффекты применения аналитических решений на операционном, тактическом и стратегическом уровнях управления.

Ключевые слова: предиктивная аналитика, техническое обслуживание, грузовой автомобильный транспорт, цифровая трансформация.

Современная система эксплуатации грузового автомобильного транспорта предъявляет повышенные требования к надежности, безопасности и непрерывности транспортного процесса. Для автотранспортных предприятий техническая готовность подвижного состава непосредственно связана со стабильностью выполнения перевозок и конкурентоспособностью бизнеса [1–3]. В этих условиях особую актуальность приобретает внедрение предиктивной аналитики, позволяющей на основе непрерывного мониторинга прогнозировать остаточный ресурс узлов и агрегатов и своевременно планировать технические воздействия. Цель настоящей статьи состоит в обосновании роли предиктивной аналитики как инструмента управления эффективностью технического обслуживания грузового автомобильного транспорта и систематизации эффектов её применения на различных уровнях управления.

Существующие подходы к диагностике технического состояния узлов и агрегатов грузового автотранспорта по-прежнему основаны преимущественно на регламентных или реактивных стратегиях [4]. Техническое обслуживание выполняется по установленным интервалам пробега или времени эксплуатации без учета фактического состояния, интенсивности использования, особенностей маршрутов, влияющих на деградацию элементов автомобиля. В регламентном подходе основой принятия решений являются нормативные интервалы. Тогда как предиктивная аналитика, руководствуясь прогнозируемым остаточным ресурсом позволяет: оценивать риск ухудшения состояния узла, выбирать время проведения технического воздействия. Такой метод является следующим этапом развития подходов к управлению техническим состоянием грузового автомобильного транспорта.

Метод предиктивной аналитики можно представить в виде последовательного алгоритма действий. Комплексный аппарат средств: датчиков вибрации, температуры,

давления, систем телематики и бортовых компьютеров, – фиксирует данные, аккумулируя их в информационную базу о состоянии и условиях эксплуатации транспортного средства. Диагностическая процедура позволяет оценить фактическое состояние узлов и агрегатов. На основе анализа строятся прогнозные модели деградации элементов, оцениваются вероятности и критичность отказов. Результатом становится выработка рекомендаций по проведению технических воздействий, с указанием предпочтительного срока их выполнения.

Прогноз сам по себе не является конечным результатом применения аналитики. Практическая значимость прогнозируемой информации появляется в момент возникновения необходимости принятия управленческого решения. Поэтому предиктивную аналитику можно рассматривать как инструмент управления. Она связывает техническую диагностику с организацией последующих действий.

В традиционном подходе выполнение операций происходит при наступлении установленного срока. Предиктивный подход основывается на ином принципе. Он предполагает отслеживание фактического состояния транспортного средства с помощью постоянного мониторинга. При прогнозировании отклонений осуществляется планирование обслуживания с учетом выявленных рисков. Это делает возможным переход от нормативного управления к управлению техническим состоянием конкретного транспортного средства.

Можно выявить несколько уровней управления, на которых проявляются результаты применения предиктивной аналитики. Выделим три основных уровня управления: операционный, тактический, стратегический. Эффекты ее применения представлены на рисунке 1.

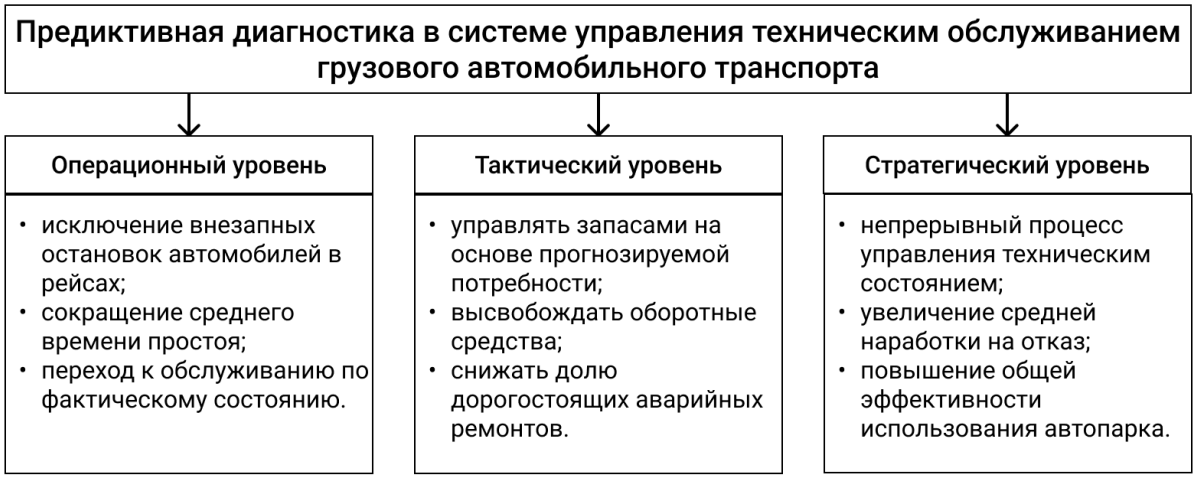


Рисунок 1 – Эффекты применения предиктивной аналитики на различных уровнях управления

К основным направлениям применения предиктивной аналитики на операционном уровне относятся выявление признаков развивающихся неисправностей, прогнозирование наступления отказов, планирование ремонтных работ до наступления отказа. Сокращение внеплановых простоев и повышение технической готовности транспортных средств являются эффектом применения метода уже на операционном уровне.

Для своевременного и быстрого ремонта, как правило, предприятию необходим запас определённых комплектующих. Использование предиктивной аналитики на тактическом уровне позволяет управлять запасами запасных частей: на основе прогноза становится возможным определить оптимальный уровень запасов по номенклатурному и количественному составу. В таком случае традиционный подход к формированию страховых запасов становится неактуальным и может трансформироваться в управление запасами на основе прогнозируемой потребности, высвобождая оборотные средства предприятия.

Собранная на нижних уровнях информация дает возможность выстроить бизнес-процессы управления жизненным циклом транспортного средства. Такие модели используются на стратегическом уровне для принятия решений на основе фактических

данных о состоянии и остаточном ресурсе узлов и агрегатов. В результате повышается эффективность эксплуатации транспортных средств.

На каждом уровне применения предиктивной аналитики достигаются определенные результаты. Повышение надежности и готовности автопарка, сокращение простоев и улучшение управляемости процессами технического обслуживания являются результатами применения данного метода.

Внедрение предиктивной аналитики связано с рядом ограничений и рисков. Ключевая проблема – необходимость значительных инвестиций. Телематическое оборудование и разработка аналитического ПО требуют больших вложений. При этом даже при наличии телематики, специалистов, способных с ней работать, на рынке труда мало. Кадровый дефицит является существенным сдерживающим фактором. Дополнительная сложность – разрозненность данных и отсутствие стандартизации. В случае использования неинтегрированных систем сложно сформировать единую систему, вследствие чего снижается достоверность прогнозов.

Преодоление перечисленных барьеров требует комплексного подхода, который включает разработку поэтапных дорожных карт внедрения, организацию партнерства с поставщиками технологических решений, внедрение программ повышения квалификации персонала, развитие методического аппарата оценки эффективности предиктивных систем.

Проведенное исследование позволяет обосновать необходимость применения метода предиктивной аналитики в системе технического обслуживания грузового автомобильного транспорта. Его комплексное применение позволит проводить необходимый ремонт в оптимальный момент с наименьшими затратами. Главными достоинствами использования предиктивной аналитики являются: сокращение внеплановых простоев, снижение затрат на аварийные ремонты, повышение коэффициента технической готовности, оптимизация управления запасами запасных частей. В стратегической перспективе предиктивная аналитика открывает новые возможности. Она позволяет перейти от управления затратами на техническое обслуживание к управлению надежностью автопарка. Акцент смещается на повышение эффективности эксплуатации.

Список литературы:

1. Методы и инструментарий предиктивной диагностики для повышения эффективности процессов технического обслуживания грузового автомобильного транспорта / Д.В. Антипов, Е.К. Савич, А.А. Арзамасцев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 5. – С. 159–165.

2. Эксплуатация автомобильного транспорта: вопросы эффективности / Л.М. Султанова, Н.А. Гутиева, Э.З. Батманов [и др.] // Альманах Крым. – 2022. – № 33. – С. 13–21.

3. Арзамасцев А.А. Методика предиктивной диагностики технического состояния узлов и агрегатов грузового автомобильного транспорта / А.А. Арзамасцев, Е.К. Савич // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6 (87). – С. 614–619.

4. Савич Е.К. Проблемы повышения эффективности процессов эксплуатации грузового автомобильного транспорта / Е.К. Савич, А.А. Арзамасцев // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 9. – С. 260–265.

УДК 658.567.1

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН В РОССИИ

Ситдикова Эмилия Рамилевна

Уфимский государственный нефтяной технический университет
магистрант кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов
emilia_sitdikova@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены механическое измельчение, девулканизация, пиролиз и энергетическое использование изношенных автомобильных шин. Показано, что для российских условий наиболее перспективна комбинированная схема: механическое разделение компонентов с последующей девулканизацией качественной резиновой крошки. Пиролиз целесообразно применять как вспомогательный метод для загрязнённых и трудноутилизируемых фракций при обязательном контроле выбросов и качества продуктов.

Ключевые слова: изношенные автомобильные шины, механическое измельчение, резиновая крошка, девулканизация, пиролиз, вторичные ресурсы.

Введение

Ежегодно в России (по данным Российского экологического оператора) образуется около 1 млн тонн изношенных шин. По данным Росприроднадзора, уровень утилизации составляет лишь 10–15 %.

Рост автомобильного парка сопровождается постоянным образованием изношенных шин. Их складирование занимает значительные площади, создаёт пожароопасность и приводит к потере ценных компонентов: резины, металлического и текстильного корда. При возгорании шин образуются токсичные продукты, а естественное разрушение вулканизированной резины происходит крайне медленно. Поэтому организация сбора и переработки таких отходов имеет как природоохранное, так и ресурсосберегающее значение.

В Российской Федерации обращение с изношенными шинами регулируется Федеральным законом «Об отходах производства и потребления» [1]. Требования к безопасности колёсных транспортных средств и экологически безопасному обращению с отработавшими шинами отражены в техническом регламенте и национальном стандарте [2, 3]. **Цель исследования** – сопоставить распространённые методы утилизации и определить наиболее перспективную технологическую схему для российских условий. При сравнении учитывались степень сохранения материальной ценности сырья, энергозатраты, экологические риски, сложность оборудования и возможности сбыта получаемой продукции.

Состав шин и особенности переработки

Автомобильная шина является многокомпонентным изделием, содержащим натуральный и синтетический каучуки, технический углерод, серу, масла, смолы, металлический и текстильный корд. Вулканизация придаёт резине прочность, эластичность и долговечность, однако возникающая сетка поперечных связей препятствует повторному плавлению материала. По этой причине переработка шин сложнее переработки многих термопластов и обычно включает несколько последовательных операций.

С позиции экономики замкнутого цикла приоритетны методы, позволяющие сохранить компоненты шины и вернуть их в хозяйственный оборот. Вместе с тем универсальной технологии не существует: чистые однородные фракции целесообразно использовать как вторичное сырьё, тогда как загрязнённые остатки могут потребовать термической переработки.

Основные методы утилизации

Наиболее освоенным методом является механическая переработка. Шины очищают, удаляют бортовые кольца, разрезают и последовательно измельчают. Магнитная и воздушная сепарация обеспечивают выделение металлического и текстильного корда, а основным продуктом становится резиновая крошка заданной фракции. Металл передаётся на переплавку, крошка применяется в покрытиях, резиновой плитке, шумоизоляционных материалах, отдельных резинотехнических изделиях и дорожных смесях.

К преимуществам механического способа относятся отсутствие целенаправленного термического разложения резины, сравнительно понятная технологическая схема и возможность получения нескольких товарных продуктов. Основные недостатки – энергозатраты на измельчение, износ режущего оборудования и зависимость рентабельности от качества крошки и устойчивого спроса. Если рынок покрытий насыщен, готовая крошка может накапливаться на складах, поэтому измельчение следует связывать с последующей глубокой переработкой.

Перспективным продолжением механической переработки является девулканизация. В ходе процесса частично разрушаются серные связи вулканизационной сетки при максимально возможном сохранении полимерных цепей. Используются механические, термомеханические, химические, ультразвуковые, микроволновые и комбинированные методы. Полученный регенерат способен частично заменять первичный каучук в новых резиновых смесях [4]. Это обеспечивает более полное возвращение материала в производственный цикл, чем использование крошки.

Главная технологическая задача девулканизации – обеспечить селективное разрушение поперечных связей. При чрезмерном воздействии повреждаются основные цепи полимера и ухудшаются прочностные свойства материала. Поэтому требуются сортировка сырья, стабильный режим процесса и контроль характеристик регенерата. Доля вторичной резины в новом изделии должна определяться с учётом требований к прочности, эластичности, износостойкости и долговечности.

Пиролиз представляет собой термическое разложение органической части шин без доступа кислорода. Его продуктами являются газ, жидкая углеводородная фракция, углеродсодержащий остаток и металл. Часть газа может покрывать энергетические потребности установки, а жидкий продукт после очистки использоваться как топливное или химическое сырьё. Качество продуктов существенно зависит от состава шин, конструкции реактора и температурного режима [5, 6, 7].

К ограничениям пиролиза относятся капиталоёмкость оборудования, необходимость герметизации и очистки выбросов, а также нестабильность характеристик продуктов. Пиролизное масло содержит примеси, а твёрдый остаток без дополнительной очистки и активации обычно не соответствует свойствам первичного технического углерода. Следовательно, пиролиз нельзя считать безотходной технологией, если отсутствуют потребители всех образующихся продуктов.

Энергетическая утилизация использует шины как заменитель топлива в высокотемпературных процессах. Резина обладает высокой теплотой сгорания, но полимерная составляющая утрачивается безвозвратно. Метод требует эффективной газоочистки и оправдан для фракций, материальная переработка которых невозможна.

Перспективная схема для российских условий

Для массового применения в России наиболее целесообразна комбинированная схема, основу которой составляет механическое разделение шин. Данный вывод связан с технологической освоенностью процесса, возможностью создавать линии различной производительности и сохранением резины как материала. По сравнению с пиролизом основные воздействия механического производства – шум, пыль и энергопотребление – проще контролировать.

После сортировки и измельчения металлический корд направляется в металлургию, а резиновую фракцию классифицировать по размеру и степени загрязнения. Чистая крошка пригодна для девулканизации и изготовления новой продукции. Более крупные фракции могут использоваться в строительных и дорожных материалах. Загрязнённые и смешанные остатки, непригодные для материального применения, допустимо передавать на контролируемый пиролиз или энергетическую утилизацию.

Такая последовательность соответствует принципу сохранения максимальной ценности сырья: сначала извлекаются компоненты, способные непосредственно вер-

нуться в производство, затем применяются методы глубокой переработки и только в последнюю очередь – термические способы. Пиролиз при этом выполняет вспомогательную функцию. Его экологическая результативность должна подтверждаться материальным и энергетическим балансом, контролем выбросов и фактическим использованием жидкой и твёрдой продукции.

Для России существенен территориальный фактор. Перевозка целых шин на большие расстояния повышает затраты из-за их значительного объёма. Поэтому пункты приёма и предварительной подготовки целесообразно размещать при шиномонтажных мастерских, автосервисах и транспортных предприятиях, а линии глубокой переработки – в промышленных центрах, где имеются инфраструктура, квалифицированный персонал и потребители вторичного сырья.

Экономическая устойчивость переработки зависит не только от количества собранных шин, но и от рынка сбыта. Необходимы единые требования к качеству полученной продукции для заключения долгосрочных договоров между переработчиками и потребителями.

Заключение

Изношенные автомобильные шины одновременно представляют экологическую опасность и обладают значительным ресурсным потенциалом. Сравнение методов показывает, что механическое измельчение является наиболее доступной базовой стадией переработки, но выпуск одной резиновой крошки не обеспечивает полного замыкания материального цикла. Девулканизация повышает ценность вторичного материала, поскольку позволяет частично возвращать резину в производство. Пиролиз пригоден для трудноутилизируемых фракций, однако требует качественной газоочистки и гарантированного использования получаемых продуктов.

Наиболее перспективным для России является сочетание механического разделения шин с девулканизацией чистой резиновой фракции. Металл должен направляться на переплавку, а пиролиз и энергетическое использование – применяться как вспомогательные способы для остатков, не пригодных к материальной переработке. Реализация такого подхода требует развития раздельного сбора, региональной инфраструктуры, стандартизации вторичного сырья и устойчивого спроса на продукцию переработки. При этих условиях изношенные шины могут стать источником полезных материалов, а не отходом, предназначенным исключительно для обезвреживания.

Список литературы:

1. Об отходах производства и потребления : Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

2. О безопасности колесных транспортных средств : Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 : принят Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 877 // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

3. ГОСТ Р 54095–2023. Требования к сбору, накоплению, транспортированию, обработке и утилизации отходов шин, покрышек, камер // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

4. Соколов М.В. Перспективы применения ультразвука при производстве девулканизата / М.В. Соколов, М.М. Николюкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17. – № 1. – С. 104–109.

5. Чич С.К. Пиролиз как оптимальный метод утилизации отработанных автомобильных шин // Новые технологии. – 2009. – № 3. – С. 62–65.

6. Камалетдинов И.И. Эффективная и экологичная система переработки отработанных шин методом пиролиза // Вестник науки и образования. – 2024. – № 3-1(146). – С. 13–15.

7. Морозова А.С. Пиролиз изношенных шин: успешные практики переработки в России и за рубежом / А.С. Морозова, А.И. Каламова // Обращение с отходами: современное состояние и перспективы : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 19 декабря 2024 года. – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2024. – С. 89–92.

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

УДК 81’1

ПРАГМАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ФРАЗЕОЛОГИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ В ПОЛИТИЧЕСКОМ ДИСКУРСЕ

Вьюнова Екатерина Кирилловна
Санкт-Петербургский государственный университет
канд. филол. наук, доцент, кафедра английской филологии и перевода,
e.vyunova@spbu.ru

Павленко Елена Александровна
Санкт-Петербургский государственный университет
канд. филол. наук, старший преподаватель, кафедра английской филологии и перевода
e.a.pavlenko@spbu.ru

Аннотация. Фразеологические единицы обладают значительным прагматическим потенциалом, включающим экспрессивные, эмотивные, оценочные и стилистические компоненты. Их значение выходит за пределы денотативного содержания и включает эмоционально-оценочные характеристики, отражающие отношение говорящего и обеспечивающие воздействующий эффект высказывания. В политическом дискурсе фразеологизмы выполняют важные прагматические функции, прежде всего персуазивную и идентифицирующую. Они способствуют формированию оценок, воздействию на адресата, а также конструированию коллективной идентичности и противопоставлению «своих» и «чужих», опираясь на культурный опыт и стереотипные представления.

Ключевые слова: фразеологические единицы, политический дискурс, прагматический потенциал, свободное словосочетание, оценочная функция, прагматическая адаптация, персуазивная функция, разговорный стиль, эмоционально-оценочные характеристики.

Фразеологические единицы представляют собой устойчивые языковые образования, характеризующиеся семантической целостностью, воспроизводимостью, структурной раздельнооформленностью и наличием переосмысленного значения.

Они функционируют как особый тип языковых единиц, отражающих не только лексико-семантические, но и культурные особенности языка.

Прагматический аспект фразеологизмов связан с их способностью оказывать воздействие на адресата, выражать оценку, передавать эмоциональное отношение говорящего и создавать определённый коммуникативный эффект. Прагматическое значение фразеологических единиц не ограничивается денотативным компонентом, но включает такие коннотации, как экспрессивные эмоциональные, оценочные, стилистические характеристики, формирующие прагматический потенциал единицы [1]. В.Н. Телия определяет культурную коннотацию как интерпретацию денотативного или образно-мотивированного аспекта значения в категориях культуры. Прагматический компонент фразеологического значения актуализируется в дискурсе и зависит от конкретной ситуации, интенций говорящего и социокультурного контекста [2].

Экспрессивная функция фразеологических единиц реализуется через усиление выразительности высказывания, создание образности и привлечение внимания адресата. Фразеологизмы обладают большей экспрессивностью по сравнению с нейтральными лексемами из-за своей внутренней формы, метафоричности и культурной маркированности. Замена фразеологизма синонимичным словом или свободным словосочетанием приводит к снижению экспрессивного компонента (держать язык за зубами – молчать, водить за

нос – обманывать). Эмотивная функция связана с выражением эмоциональных состояний и отношений говорящего. Многие фразеологизмы имеют негативную эмоциональную окраску (лезть на рожон, попасть впросак), реже встречаются единицы с положительной коннотацией (души не чаять, как за каменной стеной) [3].

Оценочная функция фразеологических единиц проявляется в выражении аксиологических суждений, то есть одобрения или порицания, похвалы или осуждения. Оценочный компонент может быть эксплицирован в семантической структуре фразеологизма (мастер на все руки – положительная оценка, мастер кислых щей – отрицательная оценка) или имплицирован и выводиться из контекста употребления [4]. Аксиологическая шкала фразеологизмов отражает систему ценностей лингвокультурного сообщества: в русской фразеологии высоко оцениваются трудолюбие, честность, ум и осуждаются лень, глупость, хитрость. Стилистическая функция связана с принадлежностью фразеологизма к определенному функциональному стилю или речевому регистру. Большинство фразеологических единиц относятся к разговорному стилю (тянуть кота за хвост, только пятки засверкали), но существуют книжные (камень преткновения, перейти Рубикон), просторечные (от корки до корки), жаргонные фразеологизмы [5].

В политическом дискурсе фразеологизмы выполняют специфические прагматические функции, связанные с персуазивностью и манипулятивностью политической коммуникации. Персуазивная функция реализуется через воздействие на убеждения, установки, эмоции адресата с целью формирования нужного мнения, побуждения к желаемым действиям. Фразеологизмы усиливают аргументацию, обращаясь к общему культурному фонду, традиционным ценностям и стереотипным представлениям [6]. Идентифицирующая функция связана с демонстрацией принадлежности к определенной социальной группе, использованием языковых средств, маркирующих «своих» и «чужих». Фразеологические единицы служат инструментом создания коллективной идентичности, консолидации сторонников, противопоставления оппонентам.

Понятие прагматической адаптации при переводе, разработанное В.Н. Комиссаровым, предполагает внесение изменений в текст перевода для достижения аналогичного коммуникативного эффекта с учетом различий в фоновых знаниях, культурных презумпциях, коммуникативных нормах исходной и принимающей лингвокультур. Прагматические трансформации фразеологизмов могут включать в себя замену реалий, смену образа при сохранении функции, модуляцию коннотаций, компенсацию стилистических особенностей [7]. Также актуальным представляется прагматическая адаптация при переводе фразеологизмов, содержащих национально-специфические образы, аллюзии, культурные коды. Переводчик политических текстов должен учитывать коммуникативную ситуацию, целевую аудиторию, прагматические интенции исходного текста, стремясь к функциональной эквивалентности достижению аналогичного воздействия на реципиента [8].

Также следует обратиться к характеристике политического дискурса, представленной в работе Е.И. Шейгал, которая политический дискурс как особый вид институционального дискурса, основной целью которого является борьба за власть, её удержание и легитимация. Данный тип дискурса отличается высокой степенью прагматической направленности, так как каждое высказывание ориентировано на воздействие на адресата и формирование определённых установок [8]. В этой связи язык в политическом дискурсе функционирует не только как средство передачи информации, но и как инструмент убеждения и манипуляции.

Политический дискурс представляет собой совокупность дискурсивных практик, формирующих как тематику политической коммуникации, так и способы её языкового выражения. При этом язык в политическом дискурсе функционирует как инструмент воздействия, поскольку выбор языковых средств влияет на интерпретацию сообщения адресатом и формирование его позиции [].

Таким образом, прагматический потенциал фразеологических единиц определяется совокупностью коннотативных компонентов значения, культурной семантикой, функциональной нагруженностью. В политическом дискурсе фразеологизмы реализуют персуазивную, идентифицирующую, оценочную, эмотивную функции, усиливая воздействующий эффект коммуникации. Перевод фразеологических единиц требует ком-

плексного подхода, учитывающего семантические, образные, стилистические, культурные, прагматические аспекты и предполагающего гибкий выбор переводческих стратегий в зависимости от коммуникативной задачи, характеристик целевой аудитории, а прагматическая адаптация фразеологизмов при переводе в политическом дискурсе направлена на сохранение коммуникативного эффекта оригинала и обеспечение адекватного восприятия реципиентом принимающей культуры.

Список литературы:

1. Гарбовский .К. Теория перевода. – М. : Издательство Московского университета, 2007. – 544 с.
2. Телия В.Н. Русская фразеология (в аспекте лингвокультурологии). – М. : Языки русской культуры, 1996 – 288 с.
3. Молотков А.И. Основы фразеологии русского языка. – М. : Наука, 1977. – 280 с.
4. Карасик В.И. Языковой круг: личность, концепты, дискурс. – Волгоград : Перемена, 2002. – 331 с.
5. Мокиенко В.М. Славянская фразеология. – М. : Высшая школа, 1989. – 287 с.
6. Чудинов А.П. Политическая лингвистика: учеб. пособие. – 4-е изд. – М. : Флинта: Наука, 2006. – 256 с.
7. Комиссаров В.Н. Теория перевода (лингвистические аспекты). – М. : Высшая школа, 1990. – 253 с.
8. Фёдоров А.В. Основы общей теории перевода. – М. : Филология Три, 2020. – 348 с.
9. Шейгал Е.И. Семиотика политического дискурса. – Волгоград : Перемена, 2000. – 368 с.
10. Политический дискурс: методы анализа тематической структуры и метафорики / А.Н. Баранов, О.В. Михайлова, Г.А. Сатаров [и др.]. – М. : Фонд ИНДЕМ, 2004. – 94 с.

УДК 378.147:622.3

К ВОПРОСУ ОБ ИЗУЧЕНИИ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ТЕМАТИКИ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ОБУЧЕНИЯ

Миклина Ольга Алексеевна

Ухтинский государственный технический университет
старший преподаватель кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений и подземной гидромеханики»
omiklina@ugtu.net

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос изучения определений профессиональных понятий обучающимися нефтегазового вуза на начальном этапе обучения профессиональным дисциплинам. Актуальность исследования обусловлена тем, что знание профессиональной терминологии и владение определениями профессиональных понятий способствует успешному обучению в вузе и развитию важных профессиональных качеств. Целью исследования является выбор педагогического метода, который будет способствовать формированию системы учебных действий для изучения определений нефтегазовой тематики. Проведенный литературный обзор и анализ педагогических исследований позволил выбрать метод дидактического синквейна в проведении логико-технологического анализа определений. На основе проведенной работы обосновано его применение для формирования системы учебных действий в выполнении логико-технологического анализа определений профессиональных понятий нефтегазовой тематики и формирует методологические знания в его изучении.

Ключевые слова: определения профессиональных понятий, термин, теоретический материал, логико-технологический анализ, учебные действия, технологический объект, дидактический синквейн.

Введение. К ключевой проблеме современного профессионального нефтегазового высшего образования можно отнести разрыв между реальным качеством подготовки выпускников вуза и ожидаемым уровнем их профессионализма для нефтегазового производства. Например, в изучении производственных документов (регламенты, нормы, правила, проекты и пр.) у выпускников возникают трудности, обусловленные наличием профессиональных терминов, которые сформировались у выпускников не в полном объёме. Впервые обучающиеся с ней сталкиваются на начальном этапе обучения, присутствие которой в теоретическом материале нефтегазовой тематики необходимо для изучения различных технологий нефтегазового производства и применяемого высокотехнологичного оборудования (далее по тексту – технологический объект). Любой объект характеризуется своим уникальным термином (словом, словосочетанием, аббревиатурой). Общепринято, что для его понимания и знания дается определение профессионального понятия в описании объекта, где термин является его частью. Данный материал для обучающихся является незнакомым. В связи с чем необходимо выявить определенные учебные действия для работы с определениями профессиональных понятий и научить обучающихся работать с ними. ***Цель нашего исследования*** *определим следующим образом – выявить педагогический метод и рассмотреть его применение для формирования системы учебных действий в изучении определений профессиональных понятий нефтегазовой тематики на начальном этапе обучения.*

Актуальность. Обучающиеся начального этапа обучения нефтегазового вуза сталкиваются с новыми для них дисциплинами, к которым относятся «Основы бурения скважин», «Основы нефтегазопромыслового дела». К основным сложностям в их изучении можно отнести школьную подготовку и непонимание своей будущей профессио-

нальной деятельности[1,2], что непосредственно отражается на уровне освоения нового теоретического материала. Это относится и к изучению определений профессиональных понятий и не сформировавшимися учебными действиями в работе с ними, которые будут способствовать успешному освоению изучаемого теоретического материала, в котором рассматривается технологический объект, представляющий собой последовательное соединение определенных элементов (агрегаты, приборы, клапаны, установки, запорные устройства, технологические ёмкости, соединительные узлы, насосы и пр.), функционирование которых подчиняется действиям определенных законов. И так, владение определениями профессиональных понятий и знание профессиональной терминологии можно отнести к одной из основных задач современного профессионального нефтегазового образования.

Литературный обзор педагогических исследований. Педагогами в настоящее время активно используются различные *методы*, позволяющие помочь обучающимся в работе с учебным материалом и его компонентами. В изучении школьных и вузовских математических дисциплин используется логико-математический анализ, помогающий изучить математический учебный текст[3,4]. Педагогами выявлены основные преимущества его применения:

– является инструментом учителя для подготовки к уроку математики («конструировать его изучение») (Е.Н. Ходжаев);

– помогает обучающимся овладеть определенными знаниями и навыками, которые позволяют анализировать и понимать математическое содержание учебной темы («формализация и систематизация знаний с помощью языков формальной логики и математических моделей») (А.Ю. Цыганкова);

– помогает выявлять знания цели обучения к содержанию темы и цели основных результатов обучения («знание формулировок определений») (В.В. Орлов);

– позволяет работать с компонентами учебного математического текста, который способствует формированию математических знаний и «методологических знаний по изучаемому материалу»[4].

В силу всего выше сказанного можно сказать, что логико-математический анализ в изучении учебного математического текста является инструментом, который позволяет изучить материал, конструировать учебные действия в его изучении, анализировать собственную учебную деятельность. Это свидетельствует о том, что логико-математический анализ учебного текста помогает сформировать учебные действия по выполнению самостоятельного процесса учения.

В изучении профессиональных дисциплин нефтегазовой тематики можно применить логико-технологический анализ (далее по тексту – ЛТА)[5,6], который будет помогать обучающимся работать с теоретическим материалом в изучении технологического объекта. Определим круг действий обучающихся в изучении определений профессиональных понятий с помощью ЛТА, используя приём дидактического синквейна.

---

1 Дейнега С.А., Сотникова О.А. Особенности формирования математико-графической компетенции при изучении начертательной геометрии // Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2022. Вып. 4(45). С. 46−51. URL : https://doi.org/10.34130/1992-2752_2022_4_46 (дата обращения: 12.09.2026 г.).

2 Миклина О.А. К вопросу об изучении теоретического учебного материала технического характера профессиональных дисциплин начального этапа обучения характера // Региональный опорный вуз в рамках программы развития образования: миссия, функции и перспективы: МНК (1–3 декабря 2017 года) : сборник статей / отв. ред. В.В. Сушков. Сыктывкар : Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина, 2017. С. 192–198.

3 Боровских А.В., Веревкина В.Е. Предметные и метапредметные проблемы школьного курса математики. Тема «Неравенства» [Электронный ресурс] // Наука и школа. 2015. № 5. С. 77–87. URL : http://elibrary.ru/download/elibrary_24852670_58842141.pdf (дата обращения: 01.09.2026 г.).

4 Сотникова О.А. Обучение логико-математическому анализу на материале высшей алгебры будущих учителей математики // Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2019. Вып. 1 (30). С. 92–112. URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_41375202_15652139.pdf (дата обращения: 12.09.2026 г.).

5 Сотникова О.А., Миклина О.А. Оптимизация учебной деятельности студентов при изучении профессиональных дисциплин нефтегазового вуза // Человек и образование. 2015. № 4 (45). С. 86–91.

6 Сотникова О.А. Приоритет в выборе педагогических технологий нефтегазового образования при изучении теоретического материала // Современное образование. URL : https://nbpublish.com/library_read_article.php?id = 17046 (дата обращения 03.02.2026).

Методические исследования. Базовой дисциплиной наших исследований выбрана дисциплина «Основы нефтегазопромыслового дела» (далее по тексту – ОНГД). По завершении изучения дисциплины у обучающихся формируются компетенции, к которым относятся универсальная (УК-1) и общепрофессиональная (ОПК-5). Обозначенные сформировавшиеся компетенции у обучающихся будут способствовать самостоятельному планированию своей деятельности и её реализации, определять и находить способы своего совершенствования в профессиональной деятельности, например, выполнять анализ технологического объекта и его функционирование.

Преподавателями очерчены задачи, которые направлены на формирование базовых профессиональных знаний. В нашей работе уделим внимание формированию методологических знаний в изучении определений профессиональных понятий теоретического материала (учебного), применяя логико-технологический анализ.

Общепринято, что на начальном этапе обучения профессиональных дисциплин в изучении любого технологического объекта обязательно рассматриваются: название технологического объекта; его назначение; названия его составляющих элементов, их последовательное соединение и взаимное расположение; его принцип работы, протекающий на основе действия соответствующих законов. В связи с чем обучающимся необходимо знать название технологического объекта, осознать его назначение и функциональность.

В изучении технических школьных предметов нашел применение дидактический синквейн, правила заполнения которого отличаются от классического синквейна. Отличия заключаются в особенностях теоретического изучения каких-либо естественно-научных законов, протекающих строго на основе доказанных и подтвержденных фактов и теорий. Здесь очень внимательно нужно подходить в выборе слов, описывающих то или иное явление (объект), что отличается от набора слов для заполнения классического синквейна при анализе литературных произведений. В изучении технического учебного текста необходимо описать изучаемый объект словами, которые используются в изучаемом тексте для его знания и осознания, где трудно подобрать слова синонимы. Поэтому при заполнении дидактического синквейна изменяется количество слов в одной (нескольких) строчке (строчках), заменяются заданные части речи на другие, текстовая часть основывается на содержательной заданности каждой строчки. Педагоги отмечают, что применение метода дидактического синквейна помогает выполнить анализ учебного материала: определить изучаемый объект; выделить структуру в его описании; выделить основной материал, который характеризует объект; выделить отдельные признаки, которые его характеризуют; обозначить достаточные и избыточные признаки; обобщить материал; переконструировать определения (Л.Л. Куулар, О.Ч. Ооржак, М.Л. Варлакова, Е.В. Чухачева, В.А. Черемных, У.М. Ашим, Т. Шпичка и др.).

На наш взгляд, метод дидактического синквейна поможет обучающимся выполнить эти действия в изучении определения профессионального понятия нефтегазовой тематики. Это связано с тем, что описание данного определения не обязательно состоит только из одного предложения с выделенным профессиональным термином (отсутствуют ключевые слова, символы), к чему обычно приучен школьник. Поэтому обучающихся необходимо научить выполнять учебные действия по обобщению изучаемого определения профессиональных понятий, применив ЛТА.

В свои работах И.Я. Лернер утверждал, что в качестве главной характеристики знаний выступает качество их осознанности[1] и им выделены такие характеристики. Для наших исследований выделим следующие [6]: понимание характера связей между знаниями; различие существенных и несущественных связей; понимание способов получения знаний.

ЛТА определений профессиональных понятий представляет собой систему действий, направленных на установление термина (объекта понятия), определения признаков (видовых особенностей понятия), с помощью которых можно распознать понятие (технологический объект). Ниже перечислим учебные действия, позволяющие обучающимся осознать изучаемое определение профессионального понятия техноло-

[1] Лернер И.Я. Качества знаний учащихся. Какими они должны быть? М. : Знание, 1978. 48 с.

гического объекта, в выполнении ЛТА с применением метода дидактического синквейна:

– *выделение* профессионального термина (тема синквейна) – первая строчка (название объекта – существительное): слово, словосочетание, аббревиатура. Для этого необходимо выявить ключевое слово (называется, называют, определяют и пр.) или специальный символ (тире, дефис), определить расположение профессионального термина относительно них; в случае их отсутствия выделить термин из контекста описания определения (*характеристика*: понимание характера связей между знаниями);

– *выделение* основных признаков (описание темы) – вторая строчка. Исходя из контекста учебного материала выявляются слова для описания объекта (прилагательные), например, типы, виды, геометрическая форма, описание внешнего вида, материал изготовления и пр. При заполнении строчки проявляется понимание признаков (существенных, несущественных) и их различие, например, металлический, но не деревянный. Обучающиеся выявляют описательные признаки и их количество (*характеристика*: различие существенных и несущественных связей);

– *выделение* важных признаков (функциональность, назначение) – третья строчка. Необходимо написать слова для описания действия (глаголы или деепричастия). Здесь нужно применять точные слова для описания функциональности или назначения объекта. При заполнении третьей строчки также проявляется понимание признаков (существенных, несущественных) и их различие, например, направляет, но не контролирует или регистрирует. Обучающиеся показывают, что ими осознается становление связей между свойствами объекта, которые вытекают из законов (физики, химии), и понимаются способы получения знаний. Например, направляет поток по причине того, что есть боковой отвод. В данном случае, выявляются функциональные признаки и их количество (*характеристика*: различие существенных и несущественных связей);

– *обобщение* материала – четвертая строчка. Это может быть ключевая фраза с указанием всех необходимых признаков, например, место расположения в технологической схеме, состав объекта, взаимное расположение, действие закона. Здесь можно перефразировать рассматриваемое определение. В данном случае обучающиеся показывают, что они осознают основания усвоенных знаний, понимают области и способы применения знаний;

– *обобщение* материала – пятая строчка, это может быть слово (иногда синоним) или словосочетание; отличительный признак (признаки): условное изображение, принятое в ГОСТ, функциональность, место расположения, т. е. то, что характеризует и отличает определение профессионального понятия.

Выводы. Применение метода дидактического синквейна позволяет оценить, как обучающиеся осознали определение профессионального понятия изучаемого технологического объекта, какие слова использовали в описании признаков (существенных, необходимых) и показали правильность: выявления профессионального термина, определения его функциональности, определения места расположения в технологической схеме, его описание. Анализ работы обучающихся по составлению дидактического синквейна в изучении материала дисциплины ОНГД позволил сделать следующие выводы:

– изучается структура определения профессионального понятия, её наполнение и формулирование в теоретическом материале (различие существенных и несущественных связей, понимание характера связей);

– выполняются действия по выделению термина в изучаемом определении профессионального понятия, необходимых признаков для его идентификации (выявление различий существенных и несущественных связей);

– выполняются действия по переконструированию определения, что позволяет проверить уровень его осознания (понимание способов получения знаний, понимание характера связей);

– выполняются действия по подбору синонимов, отражающие технологическую или функциональную составляющие технологического объекта с осознанием его назначения (понимание способов получения знаний).

Можно сказать, что комплект действий по заполнению дидактического синквейна является способом осознания (инструментом), который можно использовать при выполнении логико-технологического анализа в изучении определений профессиональных понятий нефтегазовой тематики и усвоить методологию их изучения.

Список литературы:

1. Дейнега С.А., Сотникова О.А. Особенности формирования математико-графической компетенции при изучении начертательной геометрии // Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. – 2022. – Вып. 4 (45). – С. 46−51. – URL : https://doi.org/10.34130/1992-2752_2022_4_46 (дата обращения: 12.09.2026 г.).

2. Миклина О.А. К вопросу об изучении теоретического учебного материала технического характера профессиональных дисциплин начального этапа обучения характера // Региональный опорный вуз в рамках программы развития образования: миссия, функции и перспективы: МНК (1–3 декабря 2017 года) : сборник статей / отв. ред. В.В. Сушков. – Сыктывкар : Изд-во СГУ им. Питирима Сорокина, 2017. – С. 192–198.

3. Боровских А.В., Веревкина В.Е. Предметные и метапредметные проблемы школьного курса математики. Тема «Неравенства» [Электронный ресурс] // Наука и школа. – 2015. – № 5. – С. 77–87. – URL : http://elibrary.ru/download/elibrary_24852670_58842141.pdf (дата обращения: 01.09.2026 г.).

4. Сотникова О.А. Обучение логико-математическому анализу на материале высшей алгебры будущих учителей математики // Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Вып. 1 (30). – С. 92–112. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_41375202_15652139.pdf (дата обращения: 12.09.2026 г.).

5. Сотникова О.А., Миклина О.А. Оптимизация учебной деятельности студентов при изучении профессиональных дисциплин нефтегазового вуза // Человек и образование. – 2015. – № 4 (45). – С. 86–91.

6. Сотникова О.А., Приоритет в выборе педагогических технологий нефтегазового образования при изучении теоретического материала // Современное образование. – URL : https://nbpublish.com/library_read_article.php?id = 17046 (дата обращения 03.02.2026).

7. Лернер И.Я. Качества знаний учащихся. Какими они должны быть? – М. : Знание, 1978. – 48 с.

УДК 616.728

ДИАГНОСТИКА, ЛЕЧЕБНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА ГИПЕРТРОФИИ ТЕЛ ГОФФА КОЛЕННЫХ СУСТАВОВ

Питкин Виктор Александрович
Кубанский государственный технологический университет
старший преподаватель кафедры физического воспитания и спорта
irvik25@mail.ru

Белоусова Александра Сергеевна
Кубанский государственный технологический университет
студент группы 24-ИТК9-ОПЗ
Факультет транспортных процессов и технологических комплексов
rezanova.08@bk.ru

Аннотация. Гипертрофия тел Гоффа обоих коленных суставов сопровождается длительной болью при маловыраженной клинической симптоматике, из-за чего нередко распознается поздно и ошибочно трактуется как иная патология коленного сустава. В основе процесса лежат повторная травматизация инфрапателлярной жировой ткани, ее воспалительные изменения, последующий фиброз и механический импинджмент в передних отделах сустава. Анализ клинических и инструментальных данных показал, что при двустороннем поражении ключевое значение имеют методы визуализации, прежде всего магнитно-резонансная томография и ультразвуковое исследование, позволяющие уточнить характер структурной перестройки тела Гоффа и провести дифференциальную диагностику. Терапия включает разгрузку сустава, фармакологическую коррекцию, лечебную физкультуру, физиотерапию и, при стойком болевом синдроме, артроскопическое вмешательство. Раннее выявление гипертрофии тел Гоффа позволяет уменьшить выраженность боли, сохранить двигательную функцию коленных суставов и снизить риск хронического течения заболевания.

Ключевые слова: тело Гоффа, коленный сустав, гипертрофия, диагностика, магнитно-резонансная томография, лечение, реабилитация.

Гипертрофия тел Гоффа обоих коленных суставов рассматривается как вариант поражения инфрапателлярной жировой ткани, при котором хроническая травматизация и ущемление в переднем отделе колена приводят к боли, отеку и ограничению движений [1]. Магнитно-резонансная томография позволяет выявить увеличение объема жирового тела, зоны отека, участки фиброзной перестройки и тем самым уточнить характер структурных изменений при данной патологии. Ультразвуковое исследование используется как дополнительный метод визуализации, позволяющий оценить эхоструктуру тела Гоффа и состояние прилежащих мягких тканей коленного сустава. Инфрапателлярная жировая ткань участвует не только в механическом обеспечении сустава, но и в воспалительных реакциях, влияющих на поддержание хронического болевого синдрома и тканевого ремоделирования [5].

При хроническом течении уменьшается переносимость обычной бытовой нагрузки. Пациенту становится трудно длительно стоять, ходить быстрым шагом и выполнять движения с опорой на согнутые колени. На этом фоне постепенно формируется функциональное ограничение, не всегда соответствующее внешне умеренной клинической симптоматике.

Клинические проявления

Для двусторонней гипертрофии тел Гоффа характерна не только локальная боль под надколенником, но и чувство распирания в переднем отделе обоих коленных суставов, которое усиливается к концу дня. Пациенты нередко описывают дискомфорт при полном разгибании голени, а также при попытке быстро перейти из положения сидя в положение стоя. Болевой синдром обычно носит механический характер. В покое

его интенсивность снижается, однако после ходьбы, приседаний, подъема и спуска по лестнице жалобы вновь нарастают. При длительном течение процесса появляется жжение конечностей, из-за чего меняется привычный стереотип ходьбы и увеличивается нагрузка на параартикулярные структуры.

Диагностика

Клинический осмотр сам по себе недостаточен, поскольку жалобы могут имитировать синовит, пателлофеморальный болевой синдром и иные варианты внутрисуставного поражения. Стулов А.С. и Тарасов А.Н. указывают, что магнитно-резонансная томография позволяет выявить увеличение объема тела Гоффа, отек и фиброзную перестройку ткани.

Ультразвуковое исследование имеет дополнительное прикладное значение. Васильев В.А. с соавторами отмечают, что сонография дает возможность оценить эхоструктуру инфрапателлярной жировой ткани и выраженность локальной тканевой реакции [3].

Точность формулировки диагноза принципиальна. Золотов А.С., Циньков Е.А. и Атоян В.А. подчеркивают необходимость разграничения понятий, связанных с телом Гоффа и вариантами его поражения, поскольку это влияет на клиническую интерпретацию выявленных изменений [5].

Консервативное лечение

Консервативная терапия включает нестероидные противовоспалительные препараты, местные противовоспалительные средства, кратковременную иммобилизацию при выраженном обострении и коррекцию двигательного режима. Дополнительно применяются холодовые аппликации в остром периоде и щадящий режим физической активности до уменьшения болевого синдрома.

Стулов А.С. и Тарасов А.Н. показывают, что данные магнитно-резонансной томографии позволяют оценить степень отека и фиброзной перестройки тела Гоффа, что имеет значение при выборе объема консервативного или оперативного лечения [2].

Профилактика и прием витаминов

Витамины влияют на усвоение питательных веществ, способствуют нормальному росту клеток и развитию всего организма. Являясь составной частью ферментов, витамины определяют их нормальную функцию и активность. Недостаток, а тем более отсутствие в организме какого-либо витамина ведет к нарушению обмена веществ [7]. Сбалансированный рацион и режим питания повышает работоспособность и выносливость организма, способствует нормальному физическому и нервно-психическому развитию [8,9]. Необходимо помнить, что балансировка питания, водного баланса и умеренное физическое упражнение также играют важную роль в обеспечении здоровья и продуктивности [10]. При этом индивидуальные особенности организма при сбалансированном и рациональном питании не дадут сбой в организме, не вызовут побочные эффекты, избыток или дефицит тех или иных элементов [11, 12].

Занятия лечебной физкультурой

Комплекс ЛФК подбирается щадяще. Обычно используют упражнения на изометрическое напряжение четырехглавой мышцы бедра, осторожное разгибание голени в безопасной амплитуде, упражнения для задней группы мышц бедра и голени, а также движения, направленные на улучшение стабильности коленного сустава без усиления боли.

При двустороннем процессе ЛФК особенно важна. Она позволяет уменьшить асимметрию нагрузки, предупредить формирование патологического двигательного стереотипа и постепенно вернуть переносимость обычной ходьбы и бытовой активности.

Регулярные физические упражнения – это не просто способ поддерживать тело в форме, но и мощный инструмент для улучшения психического здоровья и эмоционального состояния[6].

В острый период исключают глубокие приседания, резкие разгибательные движения, прыжковые элементы и упражнения с выраженной осевой нагрузкой. По мере уменьшения боли двигательный режим расширяют, однако контроль за симптомами сохраняют на всех этапах восстановления.

Список литературы:

1. Башуров З.К. Болезнь Гоффа коленного сустава // Травматология и ортопедия России. – 1995. – № 4. – С. 89–91.
2. Стулов А.С., Тарасов А.Н. Диагностика болезни Гоффа методом магнитно-резонансной томографии // Травматология и ортопедия России. – 2019. – Т. 25. – № 2. – С. 134–140.
3. Возможности ультразвукового исследования коленного сустава в диагностике болезни Гоффа / В.А. Васильев, А.В. Иванисенко, И.И. Коновалова [и др.] // Гений ортопедии. – 2020. – Т. 26. – № 1. – С. 44–49.
4. Корнева Ю.С., Борисенко М.Б. Значение инфрапателлярной жировой ткани в патогенезе остеоартрита коленного сустава: обзор зарубежной литературы // Травматология и ортопедия России. – 2023. – Т. 29. – № 4. – С. 147–155.
5. Золотов А.С., Циньков Е.А., Атоян В.А. Тело Гоффа, болезнь Гоффа, перелом Гоффа: история эпонимов // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2023. – Т. 30. – № 3. – С. 367–374.
6. Питкин В.А., Холодная Л.А., Полянский Р.И. Влияние регулярных физических упражнений на психическое здоровье и эмоциональное состояние человека // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2024. – № 1. – С. 262–264.
7. Питкин В.А., Линник Н.А. Влияние витаминов на здоровье и продуктивность студентов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2024. – № 1. – С. 255–257.
8. Влияние питания на функциональное состояние человека, занимающегося физической культурой / А.И. Кайшева, Н.В. Лысенко, В.Н. Ерёменко [и др.] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 2. – С. 243–247.
9. Питкин В.А., Родионова А.А. Особенности рационального питания спортсменов: анализ сборных команд вуза // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2023. – Т. 85. – № 2 (96). – С. 110–115.
10. Питкин В.А. Основные требования к питанию студентов, занимающихся физической культурой и спортом // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2023. – № 1(215). – С. 381–384.
11. Еременко В.Н., Левченко А.А. Влияние физических упражнений на умственную производительность студентов. – М. : РИНЦ, 2020.
12. Биологически активные добавки и их влияние на организм студента / В.Н. Еременко, В.А. Питкин, О.В. Синько [и др.] // Вестник ВГУИТ. – 2021. – Т. 83. – № 3. – С. 68–72.

УДК 378

СИДЯЧИЙ ОБРАЗ ЖИЗНИ: ЭВОЛЮЦИОННЫЙ КОНФЛИКТ И СОВРЕМЕННАЯ ЭПИДЕМИЯ

Питкин Виктор Александрович
Кубанский государственный технологический университет
старший преподаватель кафедры физического воспитания и спорта
irvik25@mail.ru

Бобровник Виталий Олегович
Кубанский государственный технологический университет
студент группы 24-М-СЖ2,
Факультет Инженерии Машиностроения и Транспорта
vitalij.bobrovnik56@gmail.com

Аннотация. Данная работа рассматривает сидячий образ жизни не просто как медицинский вызов, а как исторические хроники. В работе прослеживается путь человека от биомеханически целесообразной подвижности к длительной статической позе. Освещаются ключевые вехи этого перехода: аграрная революция, античный мир, Средневековье, индустриализация, информационная эпоха. Приводятся современные данные о связи недостаточной физической активности с диабетом, сердечно-сосудистыми патологиями и смертностью. В заключении говорится о необходимости трансформации культурных норм и формирования динамичной среды обитания.

Ключевые слова: сидячий паттерн поведения, гипокинезия, эволюция человека, история меблировки, эргономика, кардиоваскулярный риск, профилактика, двигательный режим.

Посмотрите, в какой позе вы сейчас находитесь. Скорее всего, вы сидите: на стуле, диване или в транспорте. Это кажется нам совершенно естественным. Однако большую часть своей истории человечество не знало долгого сидения. Наши предки почти всё время двигались – у них просто не было привычки подолгу оставаться неподвижными. Чтобы понять, почему сидение так неестественно для нас, стоит сначала заглянуть в устройство нашего тела.

Наш организм создан для движения. Исследователи Брамбл и Либерман показали, что человек эволюционно приспособлен к длительному бегу [1]. Когда мы долго сидим, особенно с согнутыми под прямым углом коленями, позвоночник и мышцы спины начинают страдать. Держать прямую спину часами напролёт – это биомеханически неоптимально для человека, но именно такая поза со временем стала главной в современном мире.

Как же человечество дошло до такой жизни? Первый крупный переворот случился примерно десять тысяч лет назад, когда люди начали заниматься земледелием. Исследования показывают, что у ранних европейских земледельцев скелет стал менее мощным и крепким, чем у охотников-собирателей [2]. Это прямое следствие изменения физической активности и питания. В древности большинство людей либо стояли, либо сидели на корточках, либо лежали. Сидячее положение было удобно для обработки зерна и ремесленных работ, и со временем экономия сил перевесила естественный дискомфорт от неподвижности.

В Древней Греции и Риме, несмотря на культ физического совершенства, длительное сидение не было массовой практикой. Знатные люди часто возлежали на специальных ложах – это позволяло снизить нагрузку на позвоночник, но с приходом христианства привычки начали меняться. В ранней Церкви основной позой молитвы было стояние. 20-е правило Никейского собора (325 год) предписывало молиться стоя по воскресеньям и в определённые дни, запрещая коленопреклонения [3а], [3б]. И лишь только в позднем Средневековье в храмах начали массово появляться скамьи, а неподвижность постепенно перестала восприниматься как нечто дискомфортное, став знаком смирения и дисциплины.

Перелом наступил в XVI веке вместе с Реформацией, когда люди стали всё чаще сидели за работой. Протестантская этика объявила безделье грехом, а рациональный организованный труд – добродетелью [4]. Затем промышленная революция конца XVIII–XIX веков окончательно закрепила сидячий характер труда. Сидячая работа в конторах стала привычной нормой.

Медицина забила тревогу лишь в середине XX века. Появился термин «гипокинезия» – недостаток движения. Всемирная организация здравоохранения начала собирать данные о вреде малоподвижного образа жизни. Сегодня мы точно знаем: сидение по многу часов в день ведёт к ожирению, болезням сердца и диабету [6, 7]. Особенно резкий скачок произошёл в 1980-е годы, когда компьютеры вошли в каждый офис и почти в каждый дом. Если раньше человек сидел три-четыре часа в день, то теперь сидячее положение стало базовым для большинства из нас. Исследования с помощью акселерометров показывают: например, в Канаде взрослые проводят в положении сидя в среднем около 9,8 часа в сутки; аналогичные данные получены и в других развитых странах – обычно 8–10 часов [8]. Добавьте сюда восемь часов сна – и получится, что лишь 4–6 часов мы стоим или двигаемся.

Особенно тревожит врачей ситуация с детьми. Шестилетние дети проводят за партой по нескольку часов в день, а их позвоночник ещё только формируется. Российские санитарные нормы прямо указывают: длительная статическая нагрузка в этом возрасте повышает риск нарушений осанки [9].

Что же говорят цифры о масштабах проблемы? По данным Всемирной организации здравоохранения, обнародованным в 2024 году, почти треть взрослого населения мира – около 1,8 миллиарда человек – в 2022 году не достигали рекомендуемого уровня физической активности [10]. Это повышает риск инфарктов, диабета и некоторых видов рака. И даже небольшое увеличение ежедневной подвижности снижает общую смертность. За этими цифрами стоят знакомые многим ощущения: хроническая усталость, «деревянная» шея, головные боли напряжения, слабость в ногах, которые мы склонны списывать эти симптомы на возраст. Но вот о чём стоит задуматься: двести лет назад пятидесятилетний кузнец был гораздо подвижнее, чем сегодняшний двадцатипятилетний программист.

Вся история массового сидения – это победа удобства и экономической эффективности над биологическими потребностями нашего вида. Конечно, возвращаться к образу жизни охотников-собирателей никто не призывает, но назрела необходимость в более динамичной среде и, главное, в смене привычек. Человек не сам выбрал малоподвижность – его к ней привели комфорт и погоня за эффективностью. Чтобы поправить здоровье, не нужно бегать марафоны, достаточно сделать первый шаг: просто встать. Прямо сейчас. Пройтись хотя бы до окна. Выход из тупика – буквально в нескольких шагах от вашего стула.

Список литературы:

1. Bramble D.M., Lieberman D.E. Endurance running and the evolution of Homo // Nature. – 2004. – Vol. 432. – № 7015. – С. 345–352.

2. Larsen C.S. Bioarchaeology: Interpreting Behavior from the Human Skeleton. – 2nd ed. – Cambridge University Press, 2015. – 608 с.

3а. Правила Первого Вселенского Собора, Никейского. Правило 20 // Книга правил святых апостол, святых соборов вселенских и поместных и святых отец. – М. : Сибирская Благозвонница, 2015.

3б. Никодим (Милаш), еп. Далматинско-Истрийский. Правила православной Церкви с толкованиями. – Т. 1. – М. : Отчий дом, 2001. – Ст. 20. – URL : https://azbyka.ru (дата обращения: 10.05.2026).

4. Вебер М. Протестантская этика и дух капитализма / пер. с нем. Ю. Давыдова. – М. : Республика, 1990. – 287 с.

5. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора. – М. : Стандартинформ, 2010. – 22 с.

6. Всемирная организация здравоохранения. Физическая активность: информационный бюллетень. – 2024. – URL : https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity (дата обращения: 10.05.2026).

7. Всемирная организация здравоохранения. Рекомендации по физической активности и сидячему поведению для взрослых / пер. на рус. яз. – М. : ВОЗ, 2021. – 48 с. – URL : https://www.who.int/publications/i/item/9789240015128 (дата обращения: 10.05.2026).

8. Time spent sitting and standing during daily activities in Canadian adults: a cross-sectional study using accelerometry / R.C. Colley [et al.] // Health Reports (Statistics Canada). – 2022. – Vol. 33. – № 7. – P. 3–13. – URL : https://www150.statcan.gc.ca (дата обращения: 10.05.2026).

9. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2); Гигиена детей и подростков / В.Р. Кучма [и др.]. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2020. – 384 с.

10. ТАСС. ВОЗ: почти треть взрослого населения мира живёт с низкой физической активностью. – 26.06.2024. – URL : https://tass.ru/obschestvo/21240713 (дата обращения: 10.05.2026).

УДК 796.01

ФОРМИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЕ СРЕДСТВАМИ ЦИФРОВОЙ АНАЛИТИКИ

Питкин Виктор Александрович
Кубанский государственный технологический университет
старший преподаватель кафедры физического воспитания и спорта
irvik25@mail.ru

Назаренко Станислав Игоревич
Кубанский государственный технологический университет
студент группы 25-КБ-ПИ2, ФИИТК
doge2007918@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема усреднённого («поточного») подхода в школьном физическом воспитании, при котором единый норматив предъявляется всем обучающимся без учёта их индивидуальных особенностей, уровня подготовленности и состояния здоровья. Авторы обосновывают потенциал цифровой аналитики как средства индивидуализации физкультурного образования. Раскрывается понятие индивидуальной образовательной траектории и описывается механизм её построения на основе объективных данных, получаемых с помощью носимых устройств и цифровых платформ. Представлены четыре этапа формирования траектории: сбор данных, аналитическая обработка, проектирование и корректировка. Делается вывод о переходе от усреднённого к персонализированному физическому воспитанию при сохранении ведущей роли учителя.

Ключевые слова: физическое воспитание, индивидуальная образовательная траектория, цифровая аналитика, персонализация, носимые устройства, мониторинг функционального состояния, ФГОС.

Введение

Современная система образования переживает этап цифровой трансформации, охватывающей все предметные области, включая физическую культуру. В соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом приоритетом становится не унифицированный показатель, а индивидуальная траектория развития обучающегося, учитывающая его возможности, состояние здоровья и образовательные потребности [4].

Вместе с тем массовая практика физического воспитания по-прежнему опирается на усреднённый, «поточный» подход: единый норматив предъявляется всему классу без учёта различий в уровне подготовленности и функциональном состоянии. Это демотивирует как ослабленных, так и наиболее подготовленных учеников и в ряде случаев повышает риск перегрузок.

Качественно новые возможности для преодоления этого противоречия открывает цифровая аналитика. Распространение носимых устройств, цифровых журналов и образовательных платформ позволяет накапливать объективные данные о физическом состоянии ученика и проектировать на их основе индивидуальную образовательную траекторию (ИОТ). **Цель статьи** – раскрыть механизм формирования ИОТ по физической культуре средствами цифровой аналитики.

Теоретические основы: индивидуальная образовательная траектория и цифровая аналитика

Под индивидуальной образовательной траекторией понимается персональный путь освоения содержания образования, выстраиваемый с учётом целей, способностей и темпа развития обучающегося [1]. Концепция ИОТ опирается на личностно-ориентированный подход, в центре которого – не усреднённый «средний ученик», а конкретная личность с её особенностями и образовательными запросами.

Инструментом, обеспечивающим переход от деклараций к управляемому проектированию траектории, выступает цифровая (учебная) аналитика – learning analytics.

Под ней понимают сбор, анализ и интерпретацию данных об обучающихся с целью оптимизации образовательного процесса [3]. Близким понятием является интеллектуальный анализ образовательных данных (educational data mining).

В физическом воспитании цифровая аналитика оперирует данными особого рода: показателями частоты сердечных сокращений, объёма и интенсивности двигательной активности, результатами функционального тестирования, динамикой нагрузки и восстановления [2]. В отличие от субъективной оценки «на глаз», такие данные дают педагогу объективную картину и делают траекторию каждого ученика наблюдаемой и управляемой.

Этапы построения индивидуальной образовательной траектории средствами цифровой аналитики.

Формирование ИОТ целесообразно представить как замкнутый цикл, включающий четыре взаимосвязанных этапа.

1. Сбор данных. Накапливается объективная информация о физическом состоянии обучающегося: показания носимых устройств (пульсометров, шагомеров, фитнес-браслетов), результаты функциональных проб и контрольных тестов, сведения о нагрузке и восстановлении, фиксируемые в цифровом журнале или на образовательной платформе [5].

2. Аналитическая обработка. Данные агрегируются и визуализируются в виде наглядных дашбордов. Алгоритмы выявляют «зоны роста» и «зоны риска», сопоставляют показатели с возрастными нормами и собственной динамикой ученика, прогнозируют реакцию организма на нагрузку.

3. Проектирование траектории. На основе анализа педагог совместно с учеником определяет персональные цели, подбирает адаптивные нагрузки, виды двигательной активности и темп их освоения. Дифференциация заданий становится не интуитивной, а доказательной.

4. Обратная связь и корректировка. Результаты выполнения траектории вновь поступают в систему мониторинга, что замыкает аналитическую петлю: траектория не остаётся статичной, а непрерывно уточняется по мере поступления новых данных.

Дифференцированный подход и работа со специальными медицинскими группами

Особую ценность цифровая аналитика приобретает при реализации дифференцированного подхода. Школьный урок физической культуры обязан охватывать всех обучающихся, включая отнесённых к подготовительной и специальной медицинским группам [4]. Объективные данные о функциональном состоянии позволяют безопасно дозировать нагрузку, своевременно фиксировать превышение допустимого пульса и предупреждать переутомление.

Тем самым цифровые технологии не вытесняют учителя, а усиливают его профессиональные возможности. Роль педагога смещается от контролёра, измеряющего всех единым нормативом, к наставнику-аналитику, который интерпретирует данные и принимает педагогически обоснованные решения. Необходимо подчеркнуть, что физические нагрузки остаются важным фактором здоровья человека [6], а воспитательный потенциал занятий физической культурой сохраняет ключевое значение [7, 8].

Заключение

Цифровая аналитика выступает действенным инструментом перехода от усреднённого к персонализированному физическому воспитанию. Объективные данные носимых устройств и цифровых платформ позволяют выстраивать индивидуальную образовательную траекторию как управляемый и непрерывно корректируемый процесс, отвечающий требованиям ФГОС к индивидуализации обучения.

При этом решающая роль сохраняется за учителем, который придаёт «сухим» данным педагогический смысл и обеспечивает гуманистическую направленность процесса, приведенные рекомендации помогут в развитии продуктивности мозга и как следствие качеству обучения студента [9].

Перспективы дальнейшей работы связаны с развитием адаптивных образовательных платформ и подготовкой педагогов к работе в цифровой аналитической среде.

Список литературы:

1. Хуторской А.В. Индивидуальная образовательная траектория и технология её проектирования. – М. : Эйдос. 2022. – 196 с.
2. Манжелей И.В. Цифровые технологии и персонализация в физическом воспитании // Теория и практика физической культуры. – 2023. – № 5. – С. 12–15.
3. Носкова Т.Н. Учебная аналитика и большие данные в цифровой образовательной среде // Высшее образование в России. – 2022. – № 4. – С. 38–47.
4. Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования. – М. : Просвещение, 2021. – 126 с.
5. Загревская А.И. Мониторинг функционального состояния обучающихся средствами носимых устройств // Физическая культура: воспитание, образование, тренировка. – 2023. – № 2. – С. 18–22.
6. Еременко В.Н., Медведева А.С., Левченко А.А. Роль физической культуры в жизни человека. – 2019. – Т. 8. – № 3 (28). – С. 353–355.
7. Питкин В.А., Барышева А.М., Юшко Ю.А. Физическая культура и спорт как средство воспитания духовно-нравственной личности // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – 2023. – № 6 (220). – С. 295–299.
8. Питкин В.А., Еременко В.Н., Тюпенькова Г.Е. Повышение мотивации к занятиям физической культурой среди студентов // Современное педагогическое исследование. – 2018. – № 3. – С. 59–62.
9. Питкин В.А., Герасимов И.В. Повышение продуктивности студентов через здоровый образ жизни // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2024. – № 1. – С. 244-246.

УДК 111

НЕКОТОРЫЕ ДОБАВЛЕНИЯ К ВОПРОСУ О ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Погорельская Елена Юрьевна
Автономная некоммерческая организация высшего образования «Гуманитарный университет»
канд. фил. наук, доцент кафедры социально-гуманитарных дисциплин
ORCID: 0000-0002-9723-465X,
schreibigus@mail.ru

Чернов Леонид Сергеевич
Уральский государственный горный университет
канд. фил. наук, доцент, доцент кафедры философии и культурологии;
Духовная образовательная организация высшего образования Екатеринбургская духовная семинария Екатеринбургской Епархии Русской Православной Церкви
доцент кафедры богословия и библеистики
ORCID: 0000-0003-2277-2899,
leon-chernov@yandex.ru

Аннотация. В исследовании представлено несколько положений, принципиальных для понимания сущности технической реальности. Техническая реальность проявляется как воление, то есть деятельность человека, направленная на формирование новых порядков и структур, вписанных в естественные процессы. Техническая онтология имеет плоский искривленный характер, что обусловлено конвергенцией различных природ в ходе решения задачи преодоления природных ограничений. Целостность и историческая связность технического бытия задается символическими структурами, а основной ценностью технически-ориентированного мира является счастье.

Ключевые слова: техническое бытие, технологии, воление, технонаучное знание, плоская онтология, порядок, символические структуры, счастье.

Техносфера – современная социо-био-техническая оболочка Земли, место обитания современного человечества, объективация технической реальности.

Обращение к онтологическим вопросам технического бытия во многом определяется влиянием технологий на социум. Как мудро замечает В.Г. Горохов: «Вне социума никаких технологий вообще быть не может. Они создаются в определенной социальной среде и служат для ее развития»[1, с. 6]. Любая технология ориентирована на решение определённой задачи – в этом ее прагматический и одновременно социогуманитарный аспект. Технологии создают определенные социальные структуры, которые транслируются посредством обучения.

В исследовании мы обращаем внимание на смыслопорождающие факторы, которые задают целостность технической реальности.

Техническое бытие проявляет себя прежде всего, как воление [2], как установление новых порядков в обход хаосу и рассеиванию сил. Техническое бытие имеет тенденцию к росту и утверждению себя мире. Первичное представление о цели создания техники связано с концепцией рассмотрения техники как «средства» для решения различных антропологических вопросов, многие из которых возникают как следствие частичной/неполноценной укорененности человека в природе. Техника манифестирует себя как работа, то есть воление, выраженное в установлении новых порядков, в том числе природоподобных. Техника – ресурс-ориентированная деятельность, то есть особая (обладающая) логика, встроенная в онтологию, направленная на потоки вещества, энергии и информации, которые могут быть выражены любыми носителями – сырьем, деньгами, временем, знанием и т.д. Включаясь в регулирование природных процессов технические мощности подключаются к практически неограниченным источникам силы. Современное технонаучное знание обращено не только к экономическим, но

также к этическим и политическим вопросам технической онтологии: «Поскольку разрыв между исследованием и внедрением сократился, повысилась опасность распространения хотя и продвинутых в техническом и естественнонаучном плане, но не апробированных технологий. Поэтому важную роль начинают играть специальные междисциплинарные исследования именно этих последствий» [3, с. 41]. Техническое бытие как проявление воли к жизни, имеет тенденцию к росту и развитию, а также «схвачено» проблемами смертности живого. Проблемы временного существования человечества являются для технического бытия основным вызовом [4]. С вопросами безопасности цивилизации связаны самые передовые научные разработки в области компьютерного и космического экспериментов. Н.В. Бряник указывает, что новые типы экспериментов формируют новые типы реальностей [5]. В целом, «конвергентное развитие НБИКС[1] знаменует новый этап интеграции научного знания, преодолевающий границы между его классическими разделами; формируются принципиально новые объекты познания и деятельности, которые включают в себя физические, химические, биологические, психологические, технические, социальные составляющие» [6, с. 5].

Техническая онтология является плоской и искривленной. Плоский характер технической онтологии проявлен в стремлении создать единый рациональный мир, однако искривленность проявляется в участии в строительстве технического мира экзистенциальных ценностей иррационального порядка. Бессмертие и свобода не укладываются в рациональные схемы целесообразности и контроля, однако являются ведущим скрытым мотивом технического бытия.

Понятие «плоская онтология» предполагает то, что технический мир рационально ориентирован во всех своих исторических формах, но наибольшую «плоскость» техническое бытие обнаруживает в современной информационной ипостаси. Именно на уровне информационных разрешений проявляется возможность связи различных природ, конвертация любой природы в цифровой код с возможностью его «воскрешения» на любой неродной ему почве в различных материальных вариациях. Плоская онтология обесценивает прежде всего вопросы происхождения и родства, но, одновременно с этим, запускаются процессы субстанциализации технических сущностей, прежде всего живых и полуживых. Вопросы смертности и свободы, их неотчуждаемый характер, задают искривления технического бытия, хотя напрямую в трансцендентные сферы не выводят и онтология остается плоской. Существование Бога в технической реальности не учитывается, поскольку божественная благодать не ловится в технологии учета и контроля.

Регион технического бытия един. Техническая реальность пронизана разными онтологическими структурами, точками переходов между которыми являются структуры символические, наиболее реликтовые по своему происхождению. Символические структуры погружены/растворены в конкретике материальных процессов и исторических факторов. Символические структуры подчинены логике обратной перспективы, то есть выступают точками расширения технической реальности. Например, техническими символами является символ «колеса» как прототип искусственного движения или символ «весы» как первообраз измеримости и меры. Символы позволяют переносить смыслы сквозь века, сохраняя в себе сам принцип в качестве инварианта, который творческое инженерное мышление в новых культурных условиях реализует по-новому.

Бытие технической реальности имеет социальное происхождение, поэтому с неизбежностью встает вопрос о ценностях, вложенных в технические предметы и связи. Современное секуляризованное мировоззрение во многом ориентировано на идеал счастья, которые в современном дискурсе назван «благополучие». Как и во времена Аристотеля полагается, что человеческое стремление к счастью должно быть управляемым, связанным с правильными и верными решениями [7, с. 176–177]: отсюда появление в XX в. особого направления в структуре научного знания – «социальных технологий».

[1] НБИКС – конвергентные технологии, включающие в себя нанотехнологии, биотехнологии, информационные, когнитивные и социогуманитарные технологии.

Список литературы:

1. Горохов В.Г. Технология и наука // Эпистемология & философия науки. – 2012. – Т. XXXIV. – № 4. – С. 5–17.
2. Погорельская Е.Ю. Онтология техники в современной философии // Онтология эпохи пост: технологии, социальность и образ будущего : Монография. – Петрозаводск : Международный центр научного партнерства "Новая Наука" (ИП Ивановская И.И.), 2025. – С. 114–152. – EDN IDLJYX.
3. Горохов В.Г. Технонаука – новый этап в развитии современной науки и техники // Высшее образование в России. – 2014. – № 11. – С. 37–47.
4. Погорельская Е.Ю., Чернов Л.С. На пути технизации живого и собственно человеческого: от прагматики к мечте // Социум и власть. – 2023. – № 2 (96). – С. 7–15 – DOI: 10.22394/1996-0522-2023-2-07-15. – DN EJFRXX.
5. Бряник Н.В. Научная реальность в контексте эпистемологических особенностей неклассической науки // Реальность как философская проблема : монография / Д.В. Анкин [и др.]; науч. ред. В.А. Серкова. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – С. 33–53.
6. Конвергенция биологических, информационных, нано- и когнитивных технологий: вызов философии (материалы «круглого стола») // Вопросы философии. – 2013. – № 1. – С. 3–23.
7. Аристотель. Никомахова этика. – Сочинения: В 4-х т. – Т. 4. – М. : Мысль, 1984. – С. 53–293.

УДК 004.4:796.0

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПЕРСОНАЛЬНОГО ТРЕКИНГА И АНАЛИЗА ПРОГРЕССА В СИЛОВЫХ ВИДАХ СПОРТА

Руденко Артемий Евгеньевич
Кубанский государственный технологический университет
студент группы 25-КБ-ПИ2,
Факультет информационных технологий и кибербезопасности
rudenko-artemiy@yandex.ru

Питкин Виктор Александрович
Кубанский государственный технологический университет
старший преподаватель кафедры физического воспитания и спорта
irvik25@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проектирование информационной системы (ИС) для персонального учёта тренировок и анализа прогресса спортсменов силовых дисциплин – тяжёлой атлетики, пауэрлифтинга и силового фитнеса. Анализ предметной области и мобильных решений (Strong, Hevy, JEFIT, FitNotes и др.) выявил их основные ограничения: поверхностную описательную аналитику, отсутствие встроенной периодизации, фрагментацию функциональности по платным подпискам и игнорирование отечественных методик силовой подготовки. Роли пользователей сведены к двум: атлет и тренер. Сформулированы функциональные требования, построены модели вариантов использования и классов на языке UML. Предложена трёхзвенная клиент-серверная архитектура: мобильный клиент с офлайн-режимом, серверный слой бизнес-логики с REST API и реляционная СУБД PostgreSQL. Разработана модель данных «сущность-связь» и описаны алгоритмы расчёта производных метрик – тоннажа, интенсивности по зонам % от 1ПМ, косвенной оценки одноповторного максимума по формулам Эпли и Бжицки. Отдельно реализованы эвристики выявления застоя и риска детренированности. Показано, что вынос вычислений в серверный слой обеспечивает синхронизацию устройств и поддержку методик периодизации Матвеева и Верхошанского.

Ключевые слова: информационная система; силовые виды спорта; анализ прогресса; одноповторный максимум; тоннаж; периодизация; UML; реляционная база данных; REST API

Введение

Регулярный учёт тренировочной нагрузки давно перестал быть привилегией спортсменов высокой квалификации. Любитель, систематически работающий со штангой, рано или поздно сталкивается с теми же вопросами, что и профессионал: растут ли рабочие веса, не накапливается ли утомление, верно ли распределён объём по неделям мезоцикла. Без формализованного учёта ответы остаются интуитивными, а полагаться на интуицию в вопросах застоя и перетренированности рискованно – она систематически переоценивает свежесть и недооценивает накопленную усталость.

Силовые дисциплины удобны для автоматизации именно потому, что их нагрузка хорошо поддаётся количественному описанию. Вес снаряда, число повторений, число подходов – три простых числа, из которых выводится целое семейство производных показателей: тоннаж, количество подъёмов штанги (КПШ), интенсивность, оценка одноповторного максимума. Эти величины давно введены в отечественную теорию спортивной тренировки [1, 3] и вычисляются по элементарным формулам – задача, которая естественно ложится на программу и избавляет тренера от рутинного пересчёта вручную.

Цель настоящей работы – спроектировать информационную систему персонального трекинга и анализа прогресса в силовых дисциплинах. В задачи входит анализ предметной области и конкурирующих решений, формирование функциональных

требований с учётом двух ролей (атлет и тренер), выбор архитектуры и построение моделей системы средствами UML и ER-нотации, а также описание модели данных и алгоритмов вычисления тренировочных метрик.

Анализ предметной области и существующих решений

Приложений для журналирования тренировок насчитываются десятки, но большинство из них останавливается на фиксации данных, а интерпретацию оставляет пользователю. Приложение Strong аккуратно ведёт подходы, повторения, вес, оценку усилия по шкале RPE и таймеры отдыха; согласно его документации, оно отслеживает три типа личных рекордов – расчётный 1ПМ по оценочной формуле (типа Эпли), максимальный вес на любое число повторений и максимальный объём за сессию. Hevy предлагает схожий набор и выделяется разбивкой объёма по мышечным группам и социальной лентой. JEFIT располагает обширной базой упражнений и трендами силы, но критикуется за перегруженный устаревший интерфейс, а полностью бесплатный FitNotes ограничивается базовой аналитикой.

При всём разнообразии у этих систем есть несколько общих пробелов. Самый заметный – аналитика носит описательный характер: график расчётного 1ПМ и кривая объёма во времени фиксируют уже случившееся, но не подсказывают следующего шага. Нет ни прогноза, ни оценки готовности, ни распознавания плато, ни индивидуальных рекомендаций по прогрессии. К этому добавляется то, что ни одно из массовых приложений не ведёт периодизацию на уровне мезо- и макроциклов: планирование прогрессирующей перегрузки между блоками остаётся ручным. Редкие исключения вроде RP Hypertrophy реализуют четырёх-шестинедельные мезоциклы с делоудом, но ограничены гипертрофией и не адаптируются в реальном времени.

Ещё одна проблема – связка «тренер – атлет» обычно вынесена в платный продукт: в экосистеме Hevy назначение программ и редактирование тренировочных переменных реализованы в обособленном сервисе Hevy Coach с собственной тарификацией. Сюда же примыкает фрагментация по подпискам, когда серьёзная аналитика, авторские программы и расширенные графики разнесены по разным платным уровням, и атлету для покрытия связки «журнал + периодизация + тренерское сопровождение» приходится оплачивать несколько продуктов. О ранних признаках детренированности и накопленного утомления трекеры тоже не предупреждают: автоделоуд встречается лишь в жёстких линейных программах и срабатывает реактивно.

Отдельно стоит отметить методический аспект. Западные приложения нередко локализуют интерфейс, в том числе на русский язык, но не переносят методологию: процентные схемы в духе Шейко и таблиц Прилепина, нормативную классификацию разрядов, отечественную традицию управления объёмом и интенсивностью по зонам [1, 3, 5]. Эти четыре пробела – поверхностная аналитика, отсутствие периодизации, разорванная связка с тренером и игнорирование отечественных методик – и определяют задачу проектируемой системы.

Функциональные требования и роли пользователей

Система ориентирована на двух акторов в терминологии UML [10]. Атлет регистрирует тренировки, вносит упражнения и подходы, просматривает аналитику и динамику результатов. Тренер формирует тренировочные планы, назначает их подопечным и анализирует их прогресс. Поскольку актор есть роль, а не конкретный человек, один пользователь может выступать одновременно атлетом и тренером – например, выполняя собственную программу и параллельно ведя нескольких учеников.

Диаграмма вариантов использования фиксирует внешне наблюдаемое поведение системы: что она делает для пользователя, не раскрывая, как именно [10]. Для атлета выделены прецеденты «зарегистрировать тренировку», «добавить упражнение и подход», «рассчитать 1ПМ», «просмотреть прогресс и аналитику»; для тренера – «составить и назначить тренировочный план», «просмотреть прогресс подопечного». Прецедент «рассчитать 1ПМ» связан отношением включения (include) с регистрацией подхода, поскольку оценка максимума выполняется автоматически при сохранении рабочего веса и повторений; предупреждение о застое или риске детренированности оформлено как расширение (extend) просмотра аналитики, срабатывающее при выполнении соответствующего условия.

Сущность «Тренировка» несёт дату, привязку к атлету и плану, отметку о завершённости и набор подходов; для каждого подхода хранятся вес снаряда, число повторений и оценка усилия RPE – этого достаточно, чтобы восстановить любую производную метрику постфактум. Помимо функциональных, к системе предъявляются нефункциональные требования – атрибуты качества по классификации ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010 [12]: удобство использования (быстрый ввод подхода между упражнениями), производительность отклика клиента, надёжность хранения истории тренировок, безопасность персональных данных и работоспособность в офлайн-режиме. Отдельно оговаривается требование к синхронизации: после восстановления сети локальные изменения должны без потерь сливаться с серверной историей. Офлайн-режим тут обязателен: в зале сеть часто пропадает, а журнал, в который нельзя занести подход прямо у стойки, теряет смысл.

Проектирование архитектуры и моделей системы

В качестве базовой принята трёхзвенная клиент-серверная архитектура, разделяющая систему на уровень представления, уровень бизнес-логики и уровень данных [10, 13]. Благодаря этому слои можно масштабировать и сопровождать по отдельности, а бизнес-логику – переиспользовать между клиентами [11, 14]. Уровень представления реализуется мобильным клиентом, уровень бизнес-логики – сервером приложений, уровень данных – реляционной СУБД. Клиент целесообразно строить кроссплатформенно (например, на Flutter или React Native), чтобы единый код покрывал Android и iOS и не дублировал логику ввода подходов. Подобная компоновка типична для приложений трекинга: мобильный клиент взаимодействует с backend по REST API, а тот обращается к базе данных.

Взаимодействие клиента и сервера организовано в стиле REST, сформулированном Р. Филдингом [15]: ресурсы (тренировки, подходы, планы) идентифицируются через URI, операции выражаются методами HTTP, сервер остаётся без сохранения состояния; обмен ведётся в формате JSON как выбранном представлении ресурсов, а не предписанном самим REST. Многопользовательский доступ требует аутентификации и авторизации – применяется аутентификация на основе токенов JWT поверх HTTPS; протокол OAuth 2.0 подключается опционально, для делегированного доступа и стороннего входа, если такая интеграция понадобится. В качестве хранилища выбрана PostgreSQL – свободная объектно-реляционная СУБД с поддержкой транзакций со свойствами ACID, внешних ключей и типа JSONB, что обеспечивает целостность данных при параллельном доступе [16].

Особое внимание уделено офлайн-режиму. Клиент хранит данные локально и позволяет записывать тренировку без сети; при восстановлении соединения выполняется синхронизация с сервером. Возникающая при этом проблема разрешения конфликтов при одновременном изменении решается версионированием записей по временным меткам по стратегии «последняя запись побеждает», достаточной для персонального сценария с редким параллельным редактированием.

Вынос вычислений на сервер оправдан не только синхронизацией. Он позволяет, например, при обновлении одноповторного максимума централизованно пересчитать зоны интенсивности и нормативы по таблице Прилепина – так все устройства атлета сразу видят согласованную картину нагрузки. Статическая структура системы описана диаграммой классов UML [10]: ключевые классы (Пользователь, Упражнение, Тренировка, Подход, ТренировочныйПлан) связаны ассоциациями и композицией с указанием кратности. Тренировка композиционно агрегирует подходы: каждый подход принадлежит ровно одной тренировке и разделяет её жизненный цикл, а кратность на стороне подходов задана как 0..* – только что созданная тренировка может ещё не содержать ни одного подхода. Пользователь владеет множеством тренировок (1..*). Логическое проектирование базы выполнено на основе модели «сущность-связь», предложенной П. Ченом [17], которая служит мостом к реляционной модели Э. Кодда [18]. Жизненный цикл системы выстроен в соответствии со стадиями создания автоматизированных систем по ГОСТ 34.601 [19].

Модель данных и алгоритмы анализа прогресса

Логическая схема включает сущности: Пользователь (он же Атлет), Тренер, Упражнение, Тренировка, Подход, ТренировочныйПлан и Замер тела. Атлет связан с

тренировками отношением 1:N, тренировка с подходами – 1:N, упражнение с подходами – 1:N, а тренер с атлетами – отношением M:N, реализуемым через ассоциативную таблицу. Подход несёт ключевые атрибуты: вес снаряда, число повторений и оценку усилия RPE. Схема приведена к третьей нормальной форме для устранения избыточности и аномалий вставки, обновления и удаления [20].

На этой модели надстраиваются алгоритмы вычисления производных метрик, реализованные в слое бизнес-логики. Тоннаж (объём нагрузки) рассчитывается как сумма произведений веса штанги на число повторений по всем подходам и выражается в килограммах; концептуально он совпадает с показателем volume-load. КПШ – суммарное число подъёмов – отражает количественную сторону нагрузки независимо от веса. Интенсивность в традиции тяжёлой атлетики определяется как средний вес штанги, то есть отношение тоннажа к КПШ [3], и дополнительно выражается в процентах от 1ПМ; распределение объёма анализируется по зонам интенсивности (до 60 %, 60–70 %, 70–80 %, 80–90 %, свыше 90 %).

Опорной величиной для нормирования служит одноповторный максимум. Прямое тестирование 1ПМ нагрузочно и рискованно, поэтому система оценивает его косвенно по рабочим подходам. Реализованы формула Эпли (1985) [6]: 1ПМ = вес × (1 + повторения / 30) – и формула Бжицки (1993) [7]: 1ПМ = вес × 36 / (37 − повторения). При десяти повторениях обе формулы совпадают (множитель 4/3), но расходятся по обе стороны от этой точки: ниже десяти оценка Эпли выше, выше десяти – оценка Бжицки. Точность прогноза тем выше, чем меньше повторений в тестовом подходе (рекомендуется не более 8–10). Есть и крайний случай: при единственном повторении формула Эпли даёт 1,033 от поднятого веса, завышая истинный максимум примерно на 3,3 %, тогда как Бжицки возвращает ровно 100 %, поэтому для одиночного подхода система использует сам поднятый вес либо оценку по Бжицки. Дополнительно может применяться степенная модель Ломбарди [8]. Полученные оценки кэшируются для построения трендов силы.

Аналитический модуль не ограничивается визуализацией динамики. Сопоставляя расчётный 1ПМ и тоннаж по упражнению на скользящем окне, система выявляет застой – длительное отсутствие прироста при сохранении нагрузки – и формирует рекомендацию о вариации стимула либо разгрузочной неделе, опираясь на принцип прогрессирующей перегрузки как фундамент адаптации [9]. Аналогично отслеживается риск детренированности: устойчивое снижение объёма или длительные пропуски трактуются как угроза утраты адаптаций и сопровождаются предупреждением. Поддержка периодизации опирается на обе отечественные традиции – волнообразную динамику годичного макроцикла по Л.П. Матвееву [2] и концентрированные блоки однонаправленной нагрузки с отставленным эффектом по Ю.В. Верхошанскому [4], встроенные в целостную систему управления тренированностью В.Н. Платонова [5]. За счёт этого журнал работает не только как архив, но и как источник тренировочных решений: на тех же данных строится управление нагрузкой – от сигнала о застое до выбора разгрузочной недели.

Заключение

В работе спроектирована информационная система персонального трекинга и анализа прогресса в силовых видах спорта. Главное отличие от массовых трекеров касается не набора полей для ввода: расчёт метрик, периодизация по Матвееву и Верхошанскому и тренерский контур здесь собраны в одном офлайн-способном клиенте и работают на общих данных. Привычное приложение на показе графика останавливается; проектируемая система делает следующий шаг – выдаёт рекомендацию.

Предложена трёхзвенная архитектура с мобильным клиентом, серверной бизнес-логикой и REST API поверх СУБД PostgreSQL, поддерживающая офлайн-режим и синхронизацию устройств. Построены модели вариантов использования и классов на UML, разработана нормализованная ER-модель данных и описаны алгоритмы расчёта тоннажа, интенсивности по зонам % от 1ПМ и косвенной оценки одноповторного максимума, дополненные эвристиками выявления застоя и риска детренированности.

Практическая ценность системы состоит в переносе аналитической нагрузки с тренера на программную логику расчётов и планирования и в опоре на отечественную

методическую традицию. Следующий шаг – достроить поверх нынешней описательной аналитики прогнозную: модели оценки готовности, предсказания плато и индивидуализации прогрессии, а также углубить тренерский контур обратной связи. Повышение уровня здоровья молодых людей зависит от многих факторов, однако решающим среди них является позиция самого человека, его отношение к собственному здоровью[7].

Список литературы:

1. Матвеев Л.П. Основы спортивной тренировки: учеб. пособие для ин-тов физ. культуры. – М. : Физкультура и спорт, 1977. – 271 с.
2. Матвеев Л.П. Теория и методика физической культуры: учебник для ин-тов физ. культуры. – М. : Физкультура и спорт, 1991. – 543 с.
3. Зациорский В.М. Физические качества спортсмена: основы теории и методики воспитания. 5-е изд., стер. – М. : Спорт, 2020. – 200 с.
4. Верхошанский Ю.В. Основы специальной физической подготовки спортсменов. – М. : Физкультура и спорт, 1988. – 331 с.
5. Платонов В.Н. Система подготовки спортсменов в олимпийском спорте. Общая теория и её практические приложения. – Киев : Олимпийская литература, 2004. – 808 с.
6. Epley B. Poundage Chart. Boyd Epley Workout. Lincoln. – NE: Body Enterprises, 1985. – P. 86.
7. Питкин В.А., Капустин П.С. Роль групповых занятий физической активностью в формировании социальных навыков и психологической устойчивости у подростков // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2024. – № 1. – С. 247–249.
8. Lombardi V.P. Beginning Weight Training: The Safe and Effective Way. – Dubuque. IA: Wm. C. Brown, 1989.
9. American College of Sports Medicine. Position Stand: Progression Models in Resistance Training for Healthy Adults // Medicine & Science in Sports & Exercise. – 2009. – Vol. 41. – № 3. – P. 687–708.
10. Буч Г., Рамбо Дж., Якобсон И. Язык UML. Руководство пользователя. 2-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 496 с.
11. Грекул В.И., Денищенко Г.Н., Коровкина Н.Л. Проектирование информационных систем: курс лекций. – М. : Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 304 с.
12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. – М. : Стандартинформ, 2015.
13. Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 544 с.
14. Маклаков С.В. BPwin и ERwin. CASE-средства разработки информационных систем. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 256 с.
15. Fielding R.T. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures : PhD dissertation. – Irvine : University of California, 2000.
16. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 8-е изд. – М. : Вильямс, 2005. – 1328 с.
17. Chen P.P. The Entity-Relationship Model Toward a Unified View of Data. // ACM Transactions on Database Systems. – 1976. – Vol. 1. – № 1. P. 9–36.
18. Codd E.F. A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks // Communications of the ACM. – 1970. – Vol. 13. – № 6. – P. 377–387.
19. ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
20. Коннолли Т., Бегг К. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика. 3-е изд. – М. : Вильямс, 2003. – 1440 с.

УДК 796

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В АДАПТИВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЕ ДЛЯ ДЕТЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ

Хронин Егор Денисович
Кубанский государственный технологический университет
студент группы 25-КБ-ИБ1,
Факультет информационных технологий и кибербезопасности
eghronin5@gmail.com

Питкин Виктор Александрович
Кубанский государственный технологический университет
старший преподаватель кафедры физического воспитания и спорта
irvik25@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению возможностей технологий виртуальной реальности (VR) применительно к задачам адаптивной физической культуры для детей с ограниченными возможностями здоровья. Автор анализирует опыт применения иммерсивных сред в коррекционно-развивающей работе, рассматривает влияние VR-тренингов на двигательную активность, эмоциональное состояние и социализацию детей с разными нозологиями. Выделены ключевые преимущества подхода: создание безопасного пространства для отработки движений, игровой характер занятий и возможность точно регулировать нагрузку. Обозначены существенные ограничения и нерешённые этические вопросы, связанные с внедрением VR в практику АФК.

Ключевые слова: виртуальная реальность, адаптивная физическая культура, дети с ОВЗ, двигательная реабилитация, иммерсивные технологии, инклюзивное образование.

Введение

Одной из ключевых тенденций современного образования является последовательный переход к инклюзивным моделям обучения, при которых дети с различными возможностями здоровья получают равный доступ к образовательным ресурсам. В этом контексте адаптивная физическая культура (АФК) занимает особое место: её задачи не сводятся к банальной физической нагрузке – речь идёт о коррекции нарушений, формировании социальных компетенций и максимально возможной интеграции ребёнка с ОВЗ в окружающую среду. Однако на практике специалисты АФК сталкиваются с целым рядом ограничений. Во-первых, дети нередко демонстрируют низкую мотивацию к занятиям – особенно когда вынуждены выполнять упражнения рядом со сверстниками без нарушений. Во-вторых, подобрать безопасную и одновременно достаточную нагрузку при тяжёлых двигательных расстройствах бывает крайне трудно. В-третьих, многие учреждения попросту не располагают нужным инвентарём. Исследователи в области физической культуры наблюдают негативную тенденцию по увеличению числа обучающихся с отклонениями в дыхательной, сердечно-сосудистой, а также нервной системах [2].

Виртуальная реальность предложила нестандартный выход из этого тупика. За последнее десятилетие VR-технологии шагнули далеко вперёд: устройства стали компактнее, доступнее и куда точнее в отслеживании движений. Иммерсивная среда позволяет буквально «поместить» ребёнка в контролируемое пространство, где каждый жест фиксируется сенсорами и немедленно становится частью игрового взаимодействия. Это принципиально меняет саму природу занятия: двигательная активность перестаёт восприниматься как лечебная процедура и превращается в увлекательную игру.

Вместе с тем накопленный исследовательский опыт остаётся разрозненным. Публикации фиксируют обнадёживающие результаты, однако их сложно сопоставить из-за различий в используемом оборудовании, длительности курсов и критериях оценки. Данная работа ставит целью систематизировать имеющиеся данные и выявить педагогические механизмы, объясняющие эффективность VR в работе с детьми с ОВЗ.

Технологические основы VR в контексте адаптивной физической культуры

Прежде чем рассуждать о педагогическом потенциале виртуальной реальности, стоит разобраться с тем, как она устроена. В самом общем виде VR – это компьютерная среда, которую пользователь воспринимает как реальное трёхмерное пространство. Технически это обеспечивается связкой нескольких компонентов: нашлемного дисплея (HMD), контроллеров движения, датчиков положения тела в пространстве и программного обеспечения, генерирующего интерактивный сценарий. В сфере АФК сложились три основных класса приложений, и каждый решает свою задачу [3].

Реабилитационные симуляторы – это, пожалуй, самый очевидный вариант использования VR. Они воспроизводят повседневные или спортивные ситуации: нужно поймать предмет, удержать равновесие, пройти по узкой дорожке. Датчики в реальном времени замеряют все параметры движения – скорость, амплитуду, траекторию, – а система адаптивного управления меняет сложность задания в зависимости от успехов пользователя. Педагог при этом может видеть все показатели на отдельном экране и вносить коррективы, не прерывая занятие, что исключает риск травматизации [5]. Адаптивные спортивные игры идут дальше – они воссоздают элементы настольного тенниса, баскетбола или плавания в формате, доступном даже при значительных двигательных ограничениях. Встроенная геймификация (очки, уровни, достижения) оказывается мощным мотиватором: дети просят продолжить занятие, а не торопятся его закончить. Наконец, системы биологической обратной связи соединяют физиологические датчики (ЭМГ, акселерометр, пульсоксиметр) с виртуальной средой: данные о работе мышц или частоте пульса преобразуются в визуальные или звуковые сигналы прямо внутри сцены. Ребёнок в буквальном смысле «видит», как сокращается нужная мышечная группа, что принципиально повышает осознанность движения.

Применение VR при различных нозологиях

Пожалуй, наиболее детально изучено применение VR у детей с расстройствами аутистического спектра. Это и понятно: одна из главных сложностей при РАС – непредсказуемость окружающей среды, которая вызывает острую тревогу. Виртуальное пространство этой непредсказуемости лишено: оно управляемо, повторяемо и лишено случайных социальных раздражителей. В такой среде дети значительно лучше осваивают двигательные программы [6], а систематические тренинги постепенно снижают общий уровень тревожности и открывают возможность для первых контактов с партнёром в безопасных игровых условиях.

При детском церебральном параличе виртуальная реальность используется прежде всего для улучшения постурального контроля и работы руки. Задания, требующие удержания баланса на нестабильной виртуальной поверхности, запускают компенсаторные механизмы нервной системы – фактически ЦНС вынуждена искать новые двигательные стратегии, а не воспроизводить привычный патологический паттерн. Данные сравнительных исследований показывают: при сопоставимых затратах времени дети, занимавшиеся в VR, посещали больше сессий, чем те, кто проходил традиционную реабилитацию, – именно потому, что не хотели пропускать [1]. У детей с нарушениями опорно-двигательного аппарата виртуальные тренажёры позволяют точно воспроизвести биомеханику ходьбы или плавания и дать ребёнку наглядный образец правильного движения, которому тот может немедленно попытаться подражать [7]. Отдельную нишу занимает аудиальная VR для детей с нарушениями зрения: здесь навигация в пространстве осуществляется по звуковым маякам. Регулярные такие занятия заметно улучшают слухомоторную координацию – навык, без которого безопасное участие в физкультурных мероприятиях крайне затруднено [3].

Психолого-педагогические эффекты VR-тренингов

Двигательные результаты – лишь часть картины. Не менее важно то, что происходит с ребёнком психологически. Пожалуй, главное, что даёт VR детям с ОВЗ, – это возможность переживать успех на своих условиях. В обычном спортивном зале такой ребёнок неизбежно сравнивается со сверстниками без нарушений – и это сравнение почти всегда не в его пользу. В виртуальной среде система оценивает его только относительно собственных предыдущих результатов. Уровень сложности растёт вместе с возможностями конкретного ребёнка – не раньше и не позже. Именно это создаёт тот

устойчивый мотивационный фон, который специалисты АФК пытаются выстроить годами [6]. Эффект переноса – ещё одна важная находка: навыки равновесия, быстроты реакции и пространственной ориентации, сформированные в виртуальной среде, устойчиво проявляются при выполнении аналогичных задач в реальных условиях. Это означает, что VR – не просто развлечение в кабинете реабилитолога, а полноценный тренировочный инструмент.

Социализирующий эффект мультипользовательских режимов тоже заслуживает внимания. Совместное выполнение заданий в виртуальном пространстве снижает социальную тревожность и формирует первый опыт командного взаимодействия – для ребёнка с РАС или тяжёлыми нарушениями речи это нередко вообще первый подобный опыт [6]. Параллельно меняется и характер педагогического контроля. Раньше оценка занятия во многом зависела от наблюдательности конкретного специалиста. Теперь система автоматически фиксирует всё: пройденную дистанцию, время реакции, количество двигательных ошибок и их характер. Педагог получает объективный «портрет» каждого занятия и может планировать следующее на строго доказательной основе, а не полагаться на интуицию [7].

Ограничения и риски применения VR в АФК

Было бы нечестно говорить только о плюсах. Практика показывает: VR – инструмент мощный, но далеко не универсальный. Начнём с биомедицинских рисков. «Киберболезнь» – головокружение и тошнота от рассогласования зрительных и вестибулярных ощущений – знакома многим пользователям. У детей с неврологическими нарушениями чувствительность к этому феномену выше, поэтому продолжительность сессий приходится ограничивать: по имеющимся рекомендациям, не более 15–20 минут, обязательно с предварительным адаптационным периодом. Организационно-экономическое препятствие очевидно: качественный VR-комплект с лицензионным реабилитационным ПО стоит немало, а бюджеты государственных учреждений, как правило, не предполагают таких расходов. Одним из выходов может стать создание межшкольных центров адаптивной физической культуры, где оборудование используется несколькими организациями совместно.

Методическая проблема не менее серьёзна. На сегодняшний день нет ни одного утверждённого федерального документа, который регламентировал бы применение VR именно в АФК. Педагоги вынуждены действовать вслепую, опираясь на разрозненные публикации и собственный здравый смысл. Это порождает огромный разброс в протоколах занятий и делает невозможным корректное сравнение результатов разных учреждений. Наконец, нельзя обойти стороной этику. Современные VR-системы с биологической обратной связью накапливают очень чувствительные биометрические данные – характеристики движений, пульс, мышечную активность. Для несовершеннолетних с ОВЗ это особенно деликатная тема. Необходимы чёткие регламенты хранения и обезличивания таких данных, а само их сбор должен осуществляться только при наличии информированного согласия законных представителей.

Перспективы развития и модели интеграции VR в систему АФК

Какими могут быть следующие шаги? Прежде всего – создание отечественных программных продуктов, разработанных с учётом российских нозологических реестров и требований ФГОС. Большинство качественных VR-приложений для реабилитации сегодня создаётся за рубежом, что означает и ценовые риски, и проблемы с персональными данными. Второй трек – интеграция VR с технологиями искусственного интеллекта. Алгоритмы машинного обучения способны анализировать многолетние данные о двигательном развитии ребёнка и автоматически формировать программу следующей тренировки – с учётом не только физических возможностей, но и текущего эмоционального состояния. Это выводит персонализацию занятий на качественно иной уровень.

Перспективна и дополненная реальность (AR): в отличие от полного погружения, она накладывает цифровые объекты на реальное пространство, что снижает риск дезориентации и позволяет проводить занятия буквально на улице. Телереабилитация – использование VR-комплексов в домашних условиях под дистанционным контролем специалиста – способна в разы расширить охват детей с ОВЗ из небольших городов и сельской местности. Пандемия 2020 года наглядно показала, что дистанционные форматы вполне

работают в коррекционной педагогике. При всём этом оптимальной представляется гибридная модель: VR как системное дополнение к традиционной работе, а не её замена. Специалист АФК остаётся центральной фигурой – он выстраивает маршрут, отбирает сценарии, интерпретирует данные и поддерживает ребёнка эмоционально. Технология берёт на себя рутину мониторинга и функцию безопасного тренажёра.

Заключение

Проведённый анализ позволяет констатировать: виртуальная реальность сегодня – это уже не экзотика, а реально работающий инструмент адаптивной физической культуры. Его педагогический потенциал связан с несколькими факторами одновременно: безопасность среды, игровой характер занятий, точная обратная связь и невозможность «провалиться» в сравнении со сверстниками. Доказательная база, собранная применительно к детям с РАС, ДЦП, НОДА и нарушениями зрения, в целом подтверждает положительное влияние VR-тренингов как на двигательную сферу, так и на психоэмоциональное состояние и социальную активность. Только при условии формирования благоприятной среды возможно устойчивое закрепление ЗОЖ как жизненной ценности[4].

Путь к массовому внедрению VR в АФК пролегает через решение нескольких системных задач: нормативное регулирование, создание доступных отечественных продуктов, подготовка педагогических кадров и выработка этических стандартов обращения с биометрическими данными детей. Решить их в одиночку не получится – нужна скоординированная работа разработчиков, педагогов, медиков и законодателей. Но результат того стоит: каждый ребёнок с ОВЗ заслуживает среды, в которой его возможности раскрываются, а не ограничиваются. Именно такую среду и способны создать современные иммерсивные технологии.

Список литературы:

1. Гросс Н.А., Шарова Т.Л. Технологии виртуальной реальности в физической реабилитации детей с детским церебральным параличом // Адаптивная физическая культура. – 2023. – № 2(94). – С. 34–38.

2. Питкин В.А., Лисицкая М.Д., Баскова М.И. Влияние физической активности на умственную деятельность // Учёные записки университета имени П.Ф. Лесгафта. – 2023. – № 3 (217). – С. 366–369.

3. Лисицкая Т.С., Сидоров Л.К. Инновационные технологии в адаптивном спорте. – М. : Советский спорт, 2021. – 248 с.

4. Питкин В.А., Васько И.А. Формирование привычки к здоровому образу жизни у молодежи // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2025. – № 2. – С. 441–443.

5. Овчинников Д.А., Куликова Н.В. Применение систем биологической обратной связи в виртуальной реальности при реабилитации детей с нарушениями опорно-двигательного аппарата // Лечебная физическая культура и спортивная медицина. – 2024. – № 1. – С. 22–29.

6. Синько О.В., Хрусталёва М.Р. Игровые VR-технологии как средство повышения мотивации детей с расстройствами аутистического спектра на занятиях адаптивной физической культурой // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2024. – № 3.

7. Ткачёв А.Н. Инклюзивное физическое воспитание в условиях общеобразовательной школы: теоретические основы и практика. – Краснодар : КубГТУ, 2023. – 196 с.

УДК 796

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ФУТБОЛЕ: СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОМАНДНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Чепелюк Андрей Максимович
Кубанский государственный технологический университет
студент группы 24-М-СЖ2
chepelukandrey@gmail.com

Питкин Виктор Александрович
Кубанский государственный технологический университет
старший преподаватель кафедры физического воспитания и спорта
irvik25@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена анализу интеграции систем компьютерного зрения на базе искусственного интеллекта в профессиональный футбол для оценки командных взаимодействий. Авторами рассматриваются прикладные аспекты применения нейросетевых алгоритмов детекции и трекинга игроков для анализа пространственно-временных паттернов коллективных действий. В статье исследуются возможности графовых нейронных сетей и методов глубокого обучения для выявления тактических схем и оценки эффективности командных взаимодействий. Особое внимание уделяется трансформации роли тренерского штаба в условиях цифровизации аналитического сопровождения матчей.

Ключевые слова: компьютерное зрение в спорте, футбольная аналитика, графовые нейронные сети, трекинг игроков, тактический анализ, командные взаимодействия, глубокое обучение, YOLO.

Введение

Профессиональный футбол на рубеже 2020-х годов вступил в эру тотальной цифровизации, где успех команды всё меньше зависит от интуиции тренера и всё больше – от качества аналитической работы с данными [8]. Традиционные методы тактического анализа, основанные на ручной разметке видео и субъективной экспертной оценке, исчерпали свой потенциал в условиях возросших скоростей и сложности современных тактических схем. Экстенсивный путь наращивания физических кондиций уступает место интеллектуальной настройке командных взаимодействий с использованием алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения [1, 8].

Современные системы искусственного интеллекта, обрабатывая видеопотоки с матчей, формируют цифровые модели каждого игрока и команды в целом, открывая принципиально новые возможности для оценки коллективных действий. Однако стремительное внедрение разрозненных ИИ-решений в футбольную аналитику опережает их системное научное осмысление. Цель настоящей статьи – аналитический обзор и классификация систем компьютерного зрения для оценки командных взаимодействий в профессиональном футболе, что позволит структурировать существующие подходы и определить направления их дальнейшего развития.

1. Технологические основы компьютерного зрения в футбольной аналитике

Фундаментом любой системы анализа командных взаимодействий является точное детектирование и трекинг игроков и мяча на поле. Традиционные оптико-электронные системы с нательными датчиками и стационарными камерами высокой чёткости обеспечивали высокую точность, но были дорогостоящими и ограничивали анализ лабораторными условиями.

Современные архитектуры глубоких нейросетей, прежде всего семейство YOLO (You Only Look Once), произвели революцию в области видеоаналитики спортивных событий. Алгоритмы YOLOv7 и их производные обеспечивают детекцию игроков, судей и мяча в каждом кадре видеопотока в режиме, близком к реальному времени [1]. Ком-

бинируя детекцию с методами трекинга (ByteTrack, DeepSORT) и кластеризации по цвету игровой формы, системы автоматически идентифицируют принадлежность игроков к командам и формируют непрерывные траектории их перемещений [1].

Ключевым технологическим прорывом стало проецирование двумерных координат с видеокадров на реальную плоскость футбольного поля с компенсацией движения камеры. Это преобразование позволяет вычислять не только индивидуальные метрики (скорость, пройденная дистанция, тепловые карты позиционирования), но и сложные коллективные показатели, недоступные при стандартном видеоанализе [1]. В работе Гольдштейна и соавторов представлена комплексная модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн, которая включает детекцию мяча, определение 3D-координат, трекинг игроков и их классификацию [1]. Авторы отмечают, что использование современных методов компьютерного зрения и машинного обучения дало возможность создать интерактивную визуализацию данных и осуществлять комплексный подход к онлайн-управлению соревновательной деятельностью [1].

В России также активно развиваются собственные решения в этой области. Так, компания «МОРОЗОВАРС» разработала комплекс Ars Tracker, объединяющий стельки-трекеры с датчиками и аналитическую платформу для сбора данных о тренировках и матчах в реальном времени [6]. Система способна исследовать количество касаний мяча, ударов, передач, использование сильной и слабой ноги, а также биомеханические особенности игроков [6]. Пилотные тестирования успешно прошли в футбольных клубах «Родина», «Спартак Москва» и «Газпром Академия» (Академия ФК «Зенит») [6]. Тренеры и специалисты по физической подготовке получили доступ к новым показателям работы с мячом, нагрузки на ноги и индивидуальным двигательным характеристикам игроков [6].

2. Графовые нейронные сети для анализа командных взаимодействий

Если детекция и трекинг решают задачу «кто где находится», то оценка командных взаимодействий требует ответа на вопрос «как игроки взаимодействуют друг с другом и с мячом». Именно здесь на сцену выходят графовые нейронные сети (GNN) – класс алгоритмов, специально предназначенных для анализа структурированных взаимосвязей [2]. В футбольном контексте графовая модель представляет игроков как узлы, а взаимодействия между ними (передачи, синхронные перемещения) – как рёбра. Графовые свёрточные сети (GCN) обрабатывают пространственно-временные данные, выявляя скрытые паттерны коллективного поведения, которые не фиксируются традиционными статистическими методами [4].

Исследователи Google DeepMind представили TacticAI – систему глубокого обучения, которая кодирует траектории игроков, потоки событий и составы команд в динамические графы, что позволяет графовым нейронным сетям выделять образцы и взаимосвязи внутри графовых структур для прогнозирования [3].

Практическая ценность графового подхода:

Выявление тактических схем в динамике. Пространственно-временные графовые свёрточные сети позволяют анализировать технические действия футболистов и выявлять тактические паттерны, неразличимые при традиционном анализе [4]. В работе Dai (2026) подчёркивается, что GCN эффективно обучаются и интерпретируют сложные паттерны движений, что открывает новые горизонты для тактического анализа [4].

Оценка связности команды. Анализ плотности и структуры графа взаимодействий даёт объективную метрику командной сплочённости: насколько синхронно перемещаются игроки, как быстро восстанавливается пространственная структура после потери мяча.

Прогнозирование развития атак. Обучаясь на исторических данных, графовые модели способны предсказывать вероятные траектории развития атакующих действий, что позволяет тренерскому штабу готовить контрмеры [3, 4].

3. Тактический анализ и оценка эффективности коллективных действий

Системы компьютерного зрения превращают сырой видеопоток в структурированные данные, на основе которых строятся тактические отчёты и рекомендации. В российском футболе активно внедряются собственные аналитические платформы,

позволяющие тренерским штабам получать объективную количественную оценку командных действий.

Как отмечают представители клубов, машинное обучение позволяет оценивать действия игроков в контексте всего матча, а генеративный ИИ становится незаменимым помощником для обработки огромных массивов данных и генерации ценных инсайтов [5]. Ключ к успеху – не просто сбор информации, а выстроенные алгоритмы и процессы, позволяющие принимать решения на основе всего массива данных, а не отдельных показателей, и персонализировать тренировочные нагрузки для каждого атлета [5].

Ключевые направления тактического анализа с использованием компьютерного зрения:

– Анализ владения мячом и зон давления. Автоматическая оценка владения мячом непосредственно по видеозаписи устраняет субъективность ручной разметки. Современные системы на основе нейросетей вычисляют не только процент владения, но и его качественные характеристики – эффективность продвижения в разные зоны поля [1].

– Оценка эффективности прессинга. Трекинг всех игроков позволяет количественно измерять плотность покрытия поля, скорость сближения с мячом и успешность давления на владеющего игрока [1].

– Идентификация ключевых эпизодов. Нейросети способны автоматически создавать видео-подборки ошибок и успешных действий игроков, предлагать альтернативные сценарии развития атак и оценивать физическое состояние команды по данным GPS-трекинга [5, 6].

Комплекс Ars Tracker, успешно протестированный в ведущих российских клубах, демонстрирует, как сбор биомеханических и пространственных данных в реальном времени может быть интегрирован в тактический анализ для повышения эффективности командных действий [6].

4. Трансформация роли тренерского штаба в цифровой среде

Внедрение систем компьютерного зрения и ИИ-аналитики не устраняет тренера, но кардинально трансформирует его функциональные обязанности. Ручная разметка видео, подсчёт статистических показателей и хронометраж – рутинные операции, которые наиболее естественно алгоритмизируются. Высвобождая когнитивные ресурсы от этой работы, ИИ переводит фокус специалиста на стратегическую интерпретацию данных [5, 7].

Тренерский штаб получает аналитические панели, требующие не механического считывания, а экспертного осмысления, обогащённого опытом и знанием психологических особенностей игроков. Как справедливо отмечается в обзоре Вдовина (2026), традиционный подход, при котором тренеры полагались исключительно на собственный опыт и интуицию, стремительно уступает место гибридной модели: машины обрабатывают миллионы параметров за секунды, выявляют скрытые закономерности, а человек при этом остаётся главным – принимает финальное решение с учётом контекста, эмоционального фона и долгосрочной стратегии [7].

Так специалист по футболу эволюционирует в «архитектора командных взаимодействий». Технологии дают объективную количественную базу – пространственные карты, графы связей, вероятностные прогнозы, на которой выстраивается психолого-педагогическая надстройка: мотивация, коммуникация, доверие. Синергия точности алгоритмов и человеческой интуиции максимально реализует потенциал команды, делая процесс подготовки наукоёмким и одновременно глубоко гуманистичным [5, 7].

Заключение

Системы компьютерного зрения на базе искусственного интеллекта преобразуют профессиональный футбол, обеспечивая прецизионный трекинг игроков, выявление скрытых паттернов командных взаимодействий с помощью графовых нейронных сетей и тактическую аналитику, ранее недоступную для большинства команд. Ключевым условием успешной цифровой трансформации остаётся подготовка специалистов на стыке спортивной науки, анализа данных и педагогики [8]. Интеграция ИИ в трени-

ровочный и соревновательный процесс становится необходимым условием сохранения конкурентоспособности на высшем уровне. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку унифицированных метрик оценки командных взаимодействий и создание открытых датасетов для обучения моделей, что ускорит развитие этого перспективного направления спортивной науки.

Список литературы:

1. Модель управления соревновательной деятельностью команд топ-уровня на основе компьютерного зрения в онлайн / С.Л. Гольдштейн, А.А. Полозов, Н.В. Папуловская [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – Т. 25. – № 4. – С. 441–459.
2. Графовые нейронные сети и интерпретируемость методов ИИ // education.at.ispras.ru. 2025.
3. TacticAI: новая система глубокого обучения, которая переосмысливает стратегию в футболе // itinai.ru. 2024. 23 марта.
4. Dai H. Digital image analysis technology in football technical training // Discover Computing. 2026. 18 июня.
5. Вдовин Ю. Футбол будущего: как данные и искусственный интеллект меняют российский спорт // Комсомольская правда. 2025. 10 сентября.
6. Татарстанская компания испытала систему для анализа нагрузки спортсменов // Национальные проекты РФ. 2026. 20 июня.
7. Вдовин Ю. ИИ в спортивной аналитике и разборе техники: полный гид // 1seller.ru. 2026. 26 марта.
8. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – М. : Вильямс, 2019. – 1104 с.

Научное издание

ТЕХНОСФЕРА

Материалы
III Всероссийской научной конференции
с международным участием

(**29–30 сентября 2026 г.**)

Статьи публикуются в авторской редакции

Технический редактор – О.Я. Фоменко
Компьютерная верстка – М.Н. Гусева
Дизайн обложки – М.Б. Жаоенко

Подписано в печать 01.10.2026
Бумага офсетная
Печ. л. 20,75
Усл. печ. л. 19,3
Уч.-изд. л. 17,37

Формат 60×84 $^{1}/_{8}$
Печать трафаретная
Изд. № 1467
Тираж 100 экз.
Заказ № 2700

ООО «Издательский Дом – Юг»
350010, г. Краснодар, ул. Зиповская 9, литер «Г», оф. 41/3
тел. +7(918) 41-50-571

e-mail: id-yug@id-yug.com Сайт: https://id-yug.com