

На правах рукописи

Берков

БЕРКОВ Денис Валентинович

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВНУТРЕННИХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ
НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБ НА ЗАЩИТУ ОТ НЕОРГАНИЧЕСКИХ
СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Волошин Александр Иосифович, доктор химических наук, старший научный сотрудник, старший эксперт ООО «РН-БашНИПИнефть», г.Уфа.

Латыпов Олег Ренатович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и защита от коррозии» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**», г. Москва.

Защита состоится «26» июня 2025, в 12 час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02.

Автореферат разослан «___» _____ 202__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

 А. Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Формирование неорганических солевых отложений на внутренней поверхности нефтепромысловых насосно-компрессорных труб (НКТ) представляет собой серьезную проблему, которая приводит к снижению эффективности работы нефтяных скважин и росту затрат на их техническое обслуживание. Проблема является актуальной практически для всех объектов нефтедобычи, скважинная продукция которых достигает высокую степень обводненности и минерализации. Последствия солеобразования в нефтепромысловых НКТ связаны с рисками затрат на ремонтные работы, в связи с остановкой скважины, затрат связанных с наложением штрафных санкций за нарушение экологии окружающей среды в зоне разлива, риск роста затрат на выплаты из-за несоблюдения техники безопасности. Таким образом, проблема солеобразования в насосно-компрессорных трубах является актуальной и требует поиска оптимальных методов для её решения.

Проблему солеобразования в НКТ решают двумя способами: 1) удаление образовавшихся солеотложений; 2) профилактика образования солеотложений. К профилактическим методам солеобразования в трубах относятся физические (воздействие магнитными, акустическими или электромагнитными полями), химические (ингибиторы и растворители солеотложений), и технологические (применение покрытий оборудования и деталей из специальных материалов).

Из перечисленных методов, наименее изученным является применение внутренних защитных покрытий насосно-компрессорных труб, как меры профилактики солеобразования. Применение защитных покрытий для профилактики солеобразования перспективно, так как помимо потенциального снижения солеобразования, покрытия могут защищать нефтегазовое оборудование также от коррозионных процессов и асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), тем самым продляют срок службы оборудования. Но, важно понимать, что применение покрытий для предотвращения солеобразования, не является универсальным методом, для каждого объекта требуется индивидуальный подбор защитного покрытия. Кроме того, на данный момент полностью не доказана эффективность применения данного метода. Подбор эффективного внутреннего покрытия (для предотвращения образования солей на поверхности оборудования) с помощью опытно-промысловых испытаний является дорогостоящей и долгой процедурой, поэтому необходима разработка лабораторного метода, позволяющего решить данную задачу.

Основная цель работы: Для предотвращения образования в нефтяных скважинах неорганических солеотложений на внутренней поверхности нефтепромысловых насосно-компрессорных труб, установить взаимосвязь структуры, состава и свойств внутренних защитных покрытий труб с образованием неорганических солеотложений на поверхности покрытий из движущейся солеобразующей среды на основе разработки и применения соответствующего испытательного лабораторного стенда.

Для достижения данной цели в диссертационной работе решались следующие **основные задачи:**

- 1) Анализ существующих методов испытаний покрытий и материалов на стойкость к образованию неорганических солеотложений на своей поверхности;
- 2) Теоретическое моделирование солеобразующей среды для формирования солеотложений на вертикальной поверхности внутренних защитных покрытий нефтепромысловых НКТ.
- 3) На основании достоинств и недостатков существующего испытательного оборудования, используемого для моделирования процессов солеобразования в динамических условиях, а также с учетом предъявленных требований к условиям испытаний, разработать лабораторный стенд для оценки стойкости защитных покрытий насосно-компрессорных труб на стойкость к образованию неорганических солеотложений.
- 4) Исследовать свойства внутренних защитных покрытий нефтепромысловых НКТ в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде: шероховатость, микроструктуру и состав защитных покрытий, краевой угол смачивания, адгезионную прочность «солеотложение-покрытие». Сопоставить данные о составе, структуре и свойствах защитных покрытий нефтепромысловых НКТ, определенных в статических условиях, с результатами стендовых динамических испытаний при относительном движении покрытий и солеобразующей среды.
- 5) Провести стендовые динамические испытания покрытий на стойкость к солеотложению на своей поверхности, используя разработанный «Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям». Установить зависимости процессов солеотложения от марки применяемого покрытия и от моделируемой скорости солеобразующего потока.
- 6) Провести стендовые динамические испытания для оценки эффективности комплексного применения защитных покрытий НКТ и ингибиторов солеотложения.

7) Провести динамические испытания для оценки возможности комплексного применения защитных покрытий НКТ и дозирования пресной воды в скважину.

Научная новизна:

1) Впервые для наиболее распространенных внутренних многофункциональных покрытий разных классов на НКТ проведены сравнительные исследования связи их состава, структуры и свойств, определенных в статических условиях, с эффективностью защиты от образования неорганических солеотложений на образцах внутренних защитных покрытий НКТ в динамических условиях, моделирующих движение потока солеобразующей среды относительно защитного покрытия.

2) Показано, что такие, определенные в статических условиях, свойства поверхностей покрытий как шероховатость, адгезионная прочность «солеотложение-покрытие», угол смачивания сухой поверхности дистиллированной водой в отдельности не отражают однозначно и в полной мере способность покрытий препятствовать образованию неорганических солеотложений на своей поверхности в динамических условиях, моделирующих поток жидкости в трубе.

3) Проведены динамические испытания девяти образцов внутренних защитных покрытий НКТ и двух полимерных материалов. Получены зависимости массы образующихся солеотложений от моделируемой скорости потока. Выявлено, что при всех скоростях потока ни одно из испытанных защитных покрытий не способно полностью предотвращать процесс образования гипсовых солеотложений с примесями галита, на своей поверхности.

4) Проведена лабораторная оценка возможности комплексного применения внутренних защитных покрытий НКТ и ингибиторов солеотложений. Найдено наиболее эффективное сочетание «Покрытие-Ингибитор».

5) Проведены испытания по моделированию процесса дозирования пресной воды в скважину. Показано, что при дозировании пресной воды в скважину, склонную к образованию гипса, может быть достигнут как прямой эффект (снижение массы солеотложений), так и обратный эффект (увеличение массы гипсовых солеотложений).

Практическая значимость:

1) Разработан и собран оригинальный «Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям». Получен Патент РФ на изобретение RU 2 825 169 C1.

2) Предложен и нашёл своё применение в ООО «НПЦ «Самара» оригинальный метод динамических испытаний внутренних защитных покрытий НКТ на стойкость к

солеотложению.

3) Предложен и нашёл своё применение в ООО «НПЦ «Самара» оригинальный метод лабораторной оценки возможности комплексного применения внутренних защитных покрытий НКТ и ингибиторов солеотложения для подбора наиболее эффективного сочетания «защитное покрытие-ингибитор».

4) Получен Акт от ООО «Иркутская нефтяная компания» (ООО «ИНК») об использовании результатов диссертационной работы Д.В. Беркова в ООО «ИНК» для оценки возможности применения внутренних защитных покрытий НКТ в качестве меры по предотвращению солеотложений, а также для оценки возможности комплексного применения защитных покрытий и ингибиторов солеотложения.

5) В реестре секретов производства (ноу-хау) ООО «НПЦ «Самара» зарегистрировано ноу-хау №1/2023 от 18 сентября 2023 года «Способ приготовления солеобразующей среды для проведения стендовых динамических испытаний покрытий на стойкость к неорганическим солеотложениям гипсового типа».

Объект исследования: образцы наиболее распространённых внутренних защитных покрытий НКТ (применяемых в РФ), стальная поверхность, состав, структура и свойства покрытий, неорганические солеотложения.

Предмет исследования: способность внутренней поверхности насосно-компрессорных труб противостоять образованию неорганических солеотложений.

Положения, выносимые на защиту:

1) Результаты изучения состава, структуры и свойств (фазовый состав, микроструктура, шероховатость, адгезионная прочность соединения «солеотложение-покрытие», краевой угол смачивания) внутренних многофункциональных покрытий нефтепромысловых насосно-компрессорных труб в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде.

2) Неполное и неоднозначное соответствие определенных в статических условиях состава, структуры и свойств покрытий способности покрытий сопротивляться образованию неорганических солеотложений в динамических условиях, моделирующих движение потока солеобразующей среды в насосно-компрессорной трубе (при движении солеобразующей среды относительно исследуемого покрытия).

3) Конструкция, технические характеристики и методика применения «Стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», который позволяет

моделировать процесс образования неорганических солеотложений на испытуемых поверхностях покрытий в динамических условиях, моделирующих движение потока солеобразующей среды.

4) Результаты проведения стендовых испытаний защитных покрытий насосно-компрессорных труб на «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям» при различных моделируемых скоростных режимах потока солеобразующей среды, комплексного применения покрытий с ингибиторами солеотложений, добавлением пресной воды в солеобразующую среду.

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов. Часть экспериментов проводились в аттестованной, аккредитованной лаборатории компании ООО «НПЦ «Самара», где оборудование регулярно проходит поверки и аттестации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: 1) Конференция «Эксплуатация осложненного фонда (ОФ) скважин 2023». Эффективные технологии для работы с ОФ нефтегазовых Компаний. Лучшие практики и технические решения, 21-23 ноября 2023 года, DoubleTree by Hilton, г. Тюмень.; 2) II международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов» (КОРРОЗИЯ-2024), 15 марта 2024 г., г.Уфа.; 3) XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ», 10-12 апреля 2024 г., СамГТУ, г.Самара.; 4) 2-я Международная научно-техническая конференция «СОВРЕМЕННОЕ ПЕРСПЕКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ НАУКИ, ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ» (ТМ-07), 11 октября 2024 г., г.Воронеж.; 5) IV Международная конференция «Современные достижения в материаловедении, науках о Земле и технологиях (CamsTech-IV 2024)», 29-31 октября 2024г., г.Бухара.

Личный вклад автора в диссертационную работу. Автор участвовал в разработке конструкции «Стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям» и отработке методики работы на разработанном стенде. Экспериментальные результаты, которые приведены в диссертационной работе, получены лично автором или при его

непосредственном участии. Автор участвовал в постановке цели и задач, разработке методологии исследования, интерпретации результатов и формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы, подготовке публикаций. Часть экспериментов автор выполнил в творческих коллективах, что отражено в составе авторов опубликованных работ и патента.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 9 работах, в том числе 2 статьях в рецензируемом журнале «Нефтегазовое дело», входящем в базу данных RSCI и в 1-ю категорию K1 Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ для защиты диссертаций по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), в 1 статье журнала, рецензируемого в международной базе Scopus, а также в 1 патенте РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, основных выводов, списка использованных источников из 137 наименований и четырех приложений. Материалы изложены на 260 страницах машинописного текста, содержат 101 иллюстраций 17 таблиц и 10 формул.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении содержится обоснование актуальности диссертационной работы, цель и задачи исследований, обоснование новизны и практической значимости работы.

В первой главе приведен аналитический обзор научно-технической литературы, связанный с информацией о типах солеотложений в нефтедобыче, причинах их возникновения, а также методов профилактики и борьбы с солеотложениями. Показана классификация профилактических методов защиты от солеобразования в нефтедобыче и показано, какое место в классификации занимает метод применения внутренних защитных покрытий НКТ. Описывается опыт применения защитных покрытий в качестве меры по предотвращению солеотложений на внутренней поверхности НКТ. Также обсуждаются антисолевые свойства защитных покрытий НКТ в сопоставлении со следующими свойствами защитных покрытий: смачиваемость, шероховатость, адгезия солеотложений на различных покрытиях. Приведены сведения о наиболее распространенных типах защитных покрытий. Раздел заканчивается формулировкой цели и задач для проведения диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена выбору и описанию покрытий, методик, приборов и оборудования, применяемых в данном исследовании. Приведены выбранные покрытия и данные о составе исследуемых образцов защитных покрытий. Для проведения стендовых

динамических испытаний покрытия наносились на внешнюю поверхность цилиндрических образцов диаметром 20 мм и высотой 20 мм из стали 40Г2 (рисунок 1), для сравнения использовался стальной образец без покрытия. Также использовались цилиндрические образцы из полимерных материалов полиэтилена и полиамида таких же размеров.

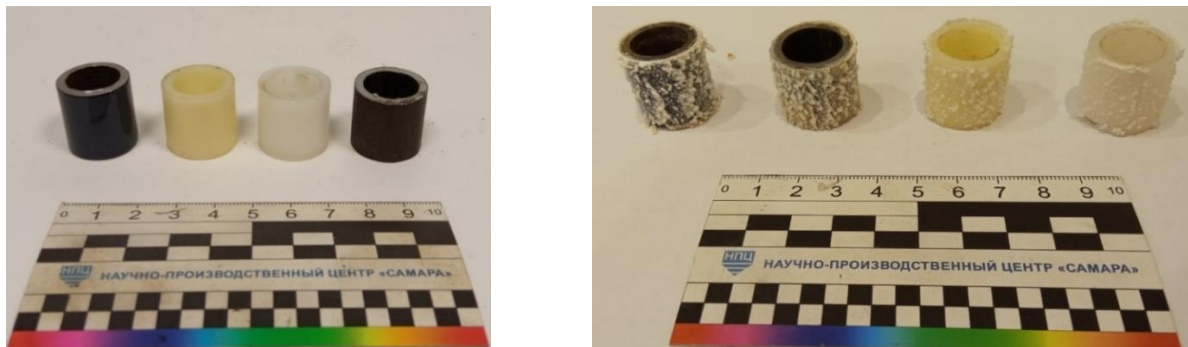


Рисунок 1 – Цилиндрические образцы до и после проведения динамического испытания в солеобразующей среде

В таблице 1 представлен перечень исследованных защитных покрытий НКТ.

Таблица 1. Перечень покрытий, являющихся объектами диссертационного исследования

Покрытие	Состав защитного покрытия
Покрытие 1	Защитная система на основе эпоксидно-фенольного полимера с наполнителем класса акрилатных блок-сополимеров.
Покрытие 2	Защитная система на основе эпоксидно-фенольного полимера с наполнителем класса акрилат-полиуретановых блок-сополимеров.
Покрытие 3	Двухслойное эпоксидно-фенольное покрытие, нанесенное методом воздушного распыления
Покрытие 4	Двухслойное эпоксидно-фенольное покрытие, нанесенное методом горячего распыления на отвержденный праймер
Покрытие 5	Покрытие, состоящее из слоя эпоксидно-фенольного или фенольного грунта и слоя на основе эпоксидных материалов
Покрытие 6	Покрытие, состоящее из слоя эпоксидно-фенольного грунта и слоя на основе эпоксидных материалов, модифицированное нетепловой СВЧ-обработкой
Покрытие 7	Силикатно-эмалевое покрытие
Покрытие 8	Дисперсные пигменты и наполнители в полиуретановом связующем; покрытие нанесено на металлическую поверхность, подвергнутую дробеструйной обработке
Покрытие 9	Дисперсные пигменты и наполнители в полиуретановом связующем

Помимо перечня образцов внутренних защитных покрытий НКТ, во второй главе представлен перечень ингибиторов солеотложения, которые были испытаны для оценки возможности комплексного применения защитных покрытий и ингибиторов солеотложения (таблица 2).

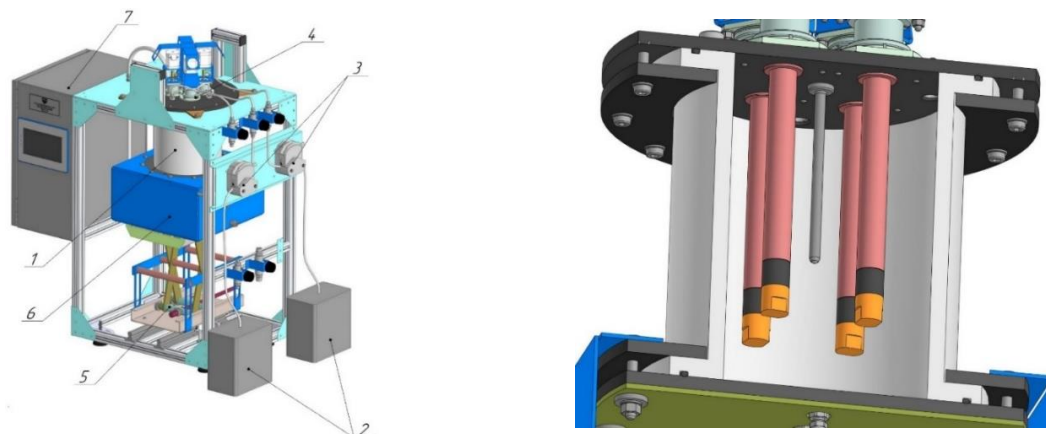
Таблица 2. Ингибиторы солеотложения

Ингибитор	Действующие вещества
Ингибитор 1	Метанол
	Сополимер этаноламидов малеиновой и акриловой кислот
	Сополимер акрилата натрия с ангидридом малеиновой кислоты
	Сополимер малеиновой и акриловой кислот
Ингибитор 2	Метанол
	2-аминоэтанол
	Гидроксиэтилидендифосфоновая кислота
	Нитрилтриметиленфосфоновая кислота
Ингибитор 3	Метанол
	1-Гидроксиэтилидендифосфоновая кислота
Ингибитор 4	Метанол
	Оксиэтилидендифосфоновая кислота
	Алкилимидазолин
Ингибитор 5	Динатриевая соль 2-гидроксиэтилиминоди(уксусной кислоты) (HEIDA)
Ингибитор 6	Метанол
	Фосфоновая кислота
	Катионоактивное ПАВ
Ингибитор 7	Метанол
	1-Гидроксиэтилидендифосфоновая кислота
	2-аминоэтанол

Также во второй главе описаны методы определения статических характеристик защитных покрытий (микроструктура, шероховатость, краевой угол смачивания, адгезионная прочность соединения «солеотложение-покрытие», состав покрытий), определяемых в условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде. Также представлен разработанный метод стендовых динамических испытаний, моделирующих движение потока солеобразующей среды в насосно-компрессорной трубе на разработанном «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям» (Патент RU 2 825 169 C1).

Третья глава посвящена разработке «Стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», позволяющего проводить динамические испытания защитных покрытий на стойкость к солеотложениям. Осуществлен анализ литературных источников, в которых описываются различные типы лабораторного оборудования, применяемого для исследований процесса солеотложения. В результате проведенного анализа, с учетом выявленных достоинств и недостатков существующего оборудования был разработан

и изготовлен «Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», представленный на рисунке 2.



1. Рабочая камера; 2. Емкости для подачи проб воды в реактор; 3. Перистальтические насосы; 4. Электропривод; 5. Подъемный механизм 6. Система нагрева; 7. Блок управления

Рисунок 2 - Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям

Для моделирования движения жидкости относительно испытуемого защитного покрытия труб НКТ был выбран метод «вращающихся цилиндров». Угловая скорость вращения цилиндрических образцов в солеобразующей среде подбиралась таким образом, чтобы линейная скорость движения покрытия относительно неподвижной среды совпадала с линейной продольной скоростью движения среды внутри НКТ.

В четвертой главе рассматривается методология создания солеобразующей среды, используемой для стендовых динамических испытаний. Для моделирования процесса солеотложения требуется знать состав отложений неорганических солей, в связи с чем было проведено исследование пробы солеотложений, отобранных на объекте «КП-23/729» (ООО «Иркутская нефтяная компания»). Был определен качественный состав данной пробы солеотложения методами энергодисперсионного анализа и рентгенофазового анализа (РФА) (рисунок 3).

Согласно полученным данным, проба солеотложений с объекта КП-23/729 имеет преимущественно гипсовую основу с примесями галита. Для солеотложений гипсового типа наиболее характерно выпадение по причине смешения несовместимых вод (то есть вод, смешение которых приводит к выпадению осадка), поэтому для динамических испытаний был выбран механизм моделирования смешения вод – путем дозированной подачи несовместимых вод в реактор разработанного стенда.

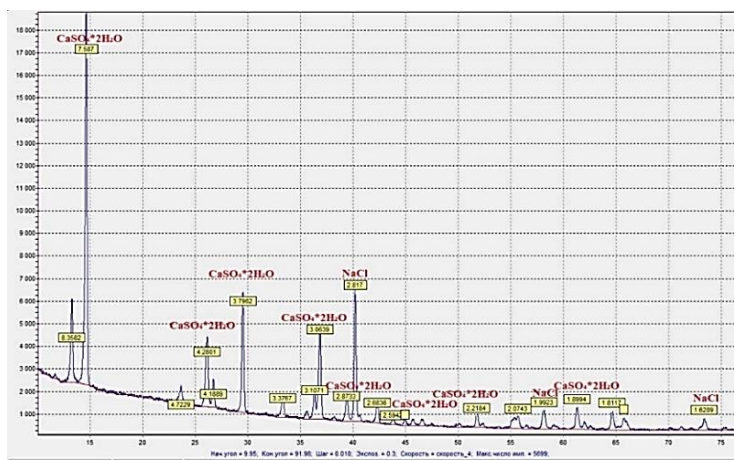


Рисунок 3 - Рентгенограмма солеотложений с объекта КП-23/729

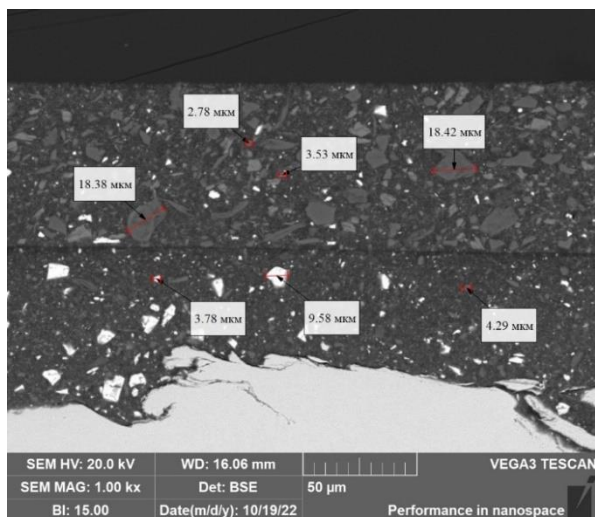
Условия для образования солеотложений создавались следующим образом: в реактор стенда, заполненный насыщенным раствором хлорида натрия, дозированно подавались растворы хлорида кальция и сульфата натрия. В результате реакции $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CaCl}_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \downarrow + 2\text{NaCl}$ образовывались сульфат кальция (гипс) и хлорид натрия (галит). Сульфат кальция выпадал в осадок, так как имеет низкую растворимость, а хлорид натрия в небольшом количестве выпадал в осадок, так как в насыщенном растворе хлорида натрия, образовывалось пересыщение данной солью.

Анализ литературы, а также проведенные лабораторные эксперименты показали, что не любое смешение несовместимых вод приводит к образованию солей на исследуемой поверхности, а только при создании пересыщения раствора. Но при сильном пересыщении раствора центры кристаллизации образуются непосредственно в растворе, далее происходит коагуляция частиц, и их последующее осаждение на дно реактора, а не на исследуемую вертикальную поверхность цилиндрических образцов с покрытиями («гомогенная нуклеация»). И только при слабом пересыщении раствора становится возможным механизм «гетерогенной нуклеации», когда зародыши кристаллов солей образуются на поверхностных дефектах исследуемой вертикальной поверхности, и далее происходит рост зародышей кристаллов на этой поверхности. Таким образом были разработаны методологические рекомендации для создания солеобразующей среды, используемой для стендовых динамических испытаний покрытий и материалов.

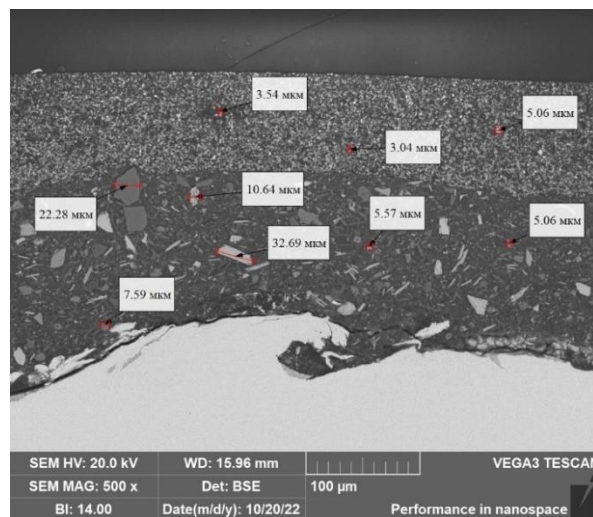
В пятой главе рассматриваются свойства покрытий, определенные в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде, которые могут влиять на образование солеотложений на исследуемой поверхности, представлены результаты исследования структуры, состава, свойств

исследуемых защитных покрытий. Полученные данные о свойствах, составе и структуре покрытий сопоставляются с результатами стендовых испытаний.

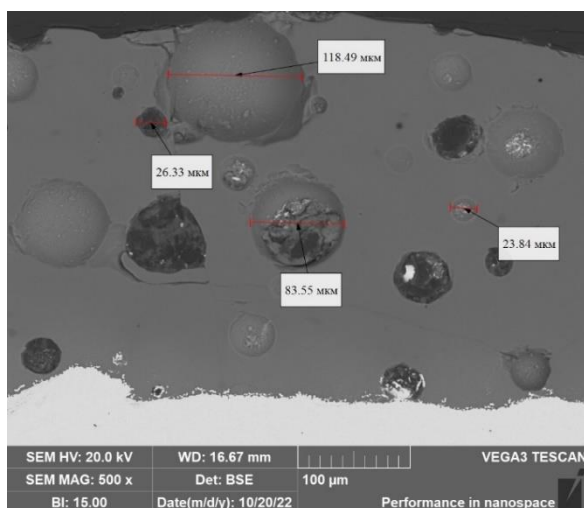
На рисунке 4 представлены некоторые результаты изучения микроструктуры защитных покрытий.



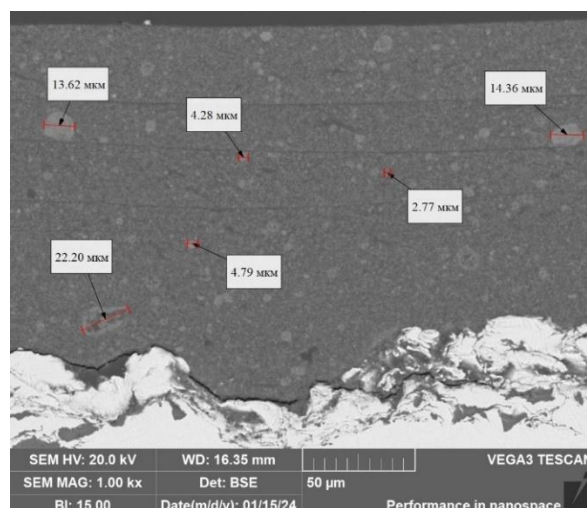
а) «Покрытие 1»



б) «Покрытие 3»



в) «Покрытие 7»



г) «Покрытие 8»

Рисунок 4 - Микроструктуры некоторых исследуемых образцов защитных покрытий

Из результатов изучения всех исследованных покрытий следует, что «Покрытие 1» и «Покрытие 2» представляют собой двухслойные защитные системы из многокомпонентных полимерных композитов разного состава. Толщины слоев каждого из этих покрытий примерно равны, а общая толщина покрытий составляет 150-190 мкм. «Покрытие 3» также является двухслойным с общей толщиной 190-290 мкм, но толщины слоёв отличаются: более толстым является нижний слой, нанесенный на металл. Микроструктура «Покрытия 4» с общей

толщиной от 120 до 175 мкм представляет собой тонкий слой праймера (грунтовочного слоя) на металле, а на праймер нанесен основной слой защитного покрытия с наполнителем из частиц различной геометрической формы. «Покрытие 5» и «Покрытие 6» состоят из тонкого слоя праймера и из основного слоя со средней толщиной 450 мкм с мелкодисперсным наполнителем размером до 4 мкм. В объеме силикатно-эмалевого «Покрытия 7» присутствуют поры. Толщина силикатно-эмалевого «Покрытия 7» составляет 220-280 мкм, а диаметр пор составляет до 118 мкм. Есть открытые поры, которые создают соответствующие крупные дефекты (углубления) внешней поверхности покрытия. Структуры «Покрытия 8» и «Покрытия 9» являются многослойными, причем структуры слоёв покрытий внешне не отличаются друг от друга. Эти покрытия представляют собой дисперсные пигменты и наполнители в полиуретановом связующем. Толщина данных покрытий составляет 130 - 185 мкм, а размеры пигментов наполнителя варьируются от 4 до 22 мкм.

Изучение микроструктур защитных покрытий показало, что на поверхностях покрытий практически отсутствуют крупные неровности с размером значительно более 1 мкм, поверхности покрытий гладкие, местами волнистые. На внешней поверхности «Покрытия 7» встречаются открытые поры диаметром до 118 мкм, но данные дефекты составляют также малую долю поверхности покрытия. Таким образом, внешние поверхности покрытий являются макроскопически гладкими, но они могут иметь микроскопические неровности с размером менее 1 мкм, количественной мерой которых служит шероховатость покрытий, рассматриваемая далее. Шероховатость внутренней поверхности труб может являться причиной интенсификации процесса солеотложения на внутренней поверхности НКТ. Считается, что в НКТ, имеющих высокую шероховатость внутренней поверхности, соли откладываются более интенсивно. Определение шероховатости Ra было проведено согласно ГОСТ 2789-73 на профилометре TR200 компании Time Group. Результаты определения шероховатости покрытий и сопоставления с солеотложением на них при испытании на разработанном стенде при моделируемой скорости потока 0,5 м/с представлены на рисунке 5. Из рисунка наглядно видно, что наибольшей шероховатостью обладает стальная поверхность без покрытия, и что ей соответствует наибольшая масса солеотложения. Покрытия обладают значительно меньшей шероховатостью и, соответственно, солеотложение на них значительно меньше. Но однозначно нельзя сказать, что чем меньше шероховатость покрытия, тем меньше солеотложение на нем, так как из рисунка 5 видно, что у трех покрытий с номерами 2, 7 и 9 шероховатость больше, чем у остальных, но солеотложение на них меньше.

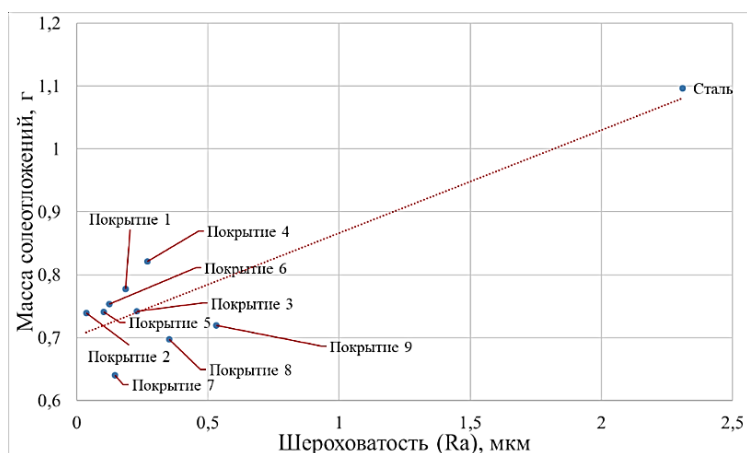


Рисунок 5 - Зависимости массы образующихся на образцах солеотложений от шероховатости покрытий

Смачиваемость также потенциально может являться тем свойством покрытия, которое характеризует способность покрытия препятствовать образованию солеотложений на своей поверхности. В ряде статей предлагается применять краевой угол смачивания как критерий стойкости покрытия к неорганическим солеотложениям: чем выше гидрофобность, тем хуже соли смачивают и закрепляются на поверхности изделия. Однако сравнение наших результатов измерения краевого угла смачивания покрытий дистиллированной водой с результатами стендовых испытаний солеотложения однозначных закономерностей не выявило. В частности, силикатно-эмалевое «Покрывтне 7», обладающее наименьшим краевым углом смачивания ($42,4^\circ$) по сравнению с другими покрытиями, то есть обладающее гидрофильными свойствами, показало наибольшую стойкость к солеотложению, по сравнению с другими более гидрофобными покрытиями при моделируемой скорости потока 0,5 м/с.

Адгезионная прочность слоя солеотложения с исследуемым покрытием может являться той количественной характеристикой защитного покрытия, на основании которой возможно оценить способность покрытия предотвращать образования солеотложений на стенках НКТ. Сравнение экспериментально полученных величин адгезионной прочности соединения «солеотложение-покрытие» с результатами стендовых испытаний не позволяет сделать однозначных выводов относительно влияния данного показателя на способность покрытия предотвращать образование солеотложений на своей поверхности. Было выявлено, что солеотложения способны формироваться даже на поверхностях полимерных образцов, адгезионная прочность взаимодействия с которыми минимальна. Полученные данные о свойствах защитных покрытий, определенных в статических условиях, представлены в таблице 3.

Таблица 3. Свойства исследованных внутренних покрытий НКТ

Покрытие	Шероховатость, R _a , мкм (ГОСТ 2789-73)	Краевой угол смачивания, °(Внутренняя методика ООО «НПЦ «Самара»)	Адгезионная прочность соединения «солеотложение-покрытие», Н (Внутренняя методика ООО «НПЦ «Самара»)		
			Галит	Гипс (сухой)	Гипс (влажный)
Покрытие 1	0,186	57,3	6,3	118,8	3,2
Покрытие 2	0,036	53,4	6,1	81,2	2,3
Покрытие 3	0,229	74,1	9,1	85,0	4,6
Покрытие 4	0,269	59,4	8,7	91,3	4,4
Покрытие 5	0,103	92,9	10,3	121,3	4,1
Покрытие 6	0,125	81,9	7,7	104,2	2,8
Покрытие 7	0,146	42,4	16,8	56,7	4,3
Покрытие 8	0,353	79,6	12,2	97,3	4,7
Покрытие 9	0,532	74,7	17,7	131,4	5,4
Сталь	2,310	92,0	27,4	188,3	6,7

Далее с использованием метода ИК-Фурье спектроскопии проведено уточнение фазовых составов покрытий, известных по информации производителей данных покрытий. Полученные данные о составе покрытий были сопоставлены с результатами стендовых динамических испытаний. В отсутствие применения ингибиторов наибольшее снижение прироста массы солеотложений отмечено на эпоксидно-фенольных системах с добавлением акрилат-полиуретановых блок-сополимеров (Покрытие 2), а также на силикатно-эмалевом покрытии (Покрытие 7). При динамических испытаниях комплексного применения покрытий и «Ингибитора 6» в дозировке 50г/м³ наблюдался срыв образующихся солеотложений с поверхности покрытий, кроме «Покрытия 8» и «Покрытия 9» (полиуретановые покрытия), а также «Покрытия 5» и «Покрытия 6» (покрытия, состоящее из слоя эпоксидно-фенольного грунта и слоя на основе эпоксидных материалов).

В целом по результатам главы 5 сделан общий вывод о том, что ни одна из характеристик состава, структуры и свойств внутренних покрытий НКТ, определенных в статических условиях, не позволяет однозначно судить о способности этих покрытий препятствовать образованию солеотложений в динамических условиях относительного движения покрытий и солеобразующей среды.

Шестая глава посвящена динамическим испытаниям покрытий на «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям». Оценка стойкости покрытий

(материалов) проводилась к солеотложениям гипсового типа с примесями галита по массе неорганических солей, образованных на внешних поверхностях вращающихся цилиндрических образцов с покрытиями. Стендовые испытания проводились при вращении цилиндрических образцов со скоростями, при которых линейная скорость движения покрытия относительно неподвижной солеобразующей среды составляла 0,1 м/с, 0,5 м/с, 1 м/с, 2 м/с, 3 м/с и соответствовала этим значениям линейной продольной скорости движения потока жидкой среды внутри НКТ с внутренним покрытием при температуре 30°C. Результаты испытаний представлены на рисунке 6.

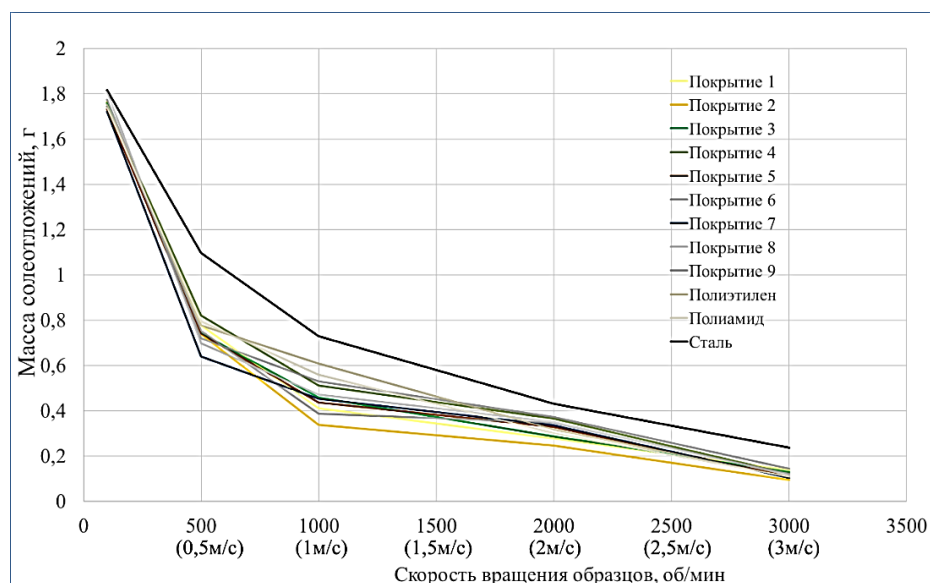


Рисунок 6 - Влияние скорости вращения образцов с покрытиями (потока жидкой среды) на массу солеотложения на различных марках защитных покрытий

Как видно из полученных результатов, ни одна из испытанных марок защитных покрытий не способна полностью предотвращать процесс образования гипсовых солеотложений с примесями галита на своей поверхности. Наблюдается снижение прироста массы слоя солеотложения на покрытиях по сравнению со стальным образцом без покрытия. Тезис о том, что кристаллы гипса не в состоянии расти на полиэтиленовой поверхности даже при наличии царапин, обозначенный в работе [В.Е.Кашавцев, И.Т.Мищенко «Солеобразование при добыче нефти». Москва: Орбита-М, 2004.], не подтвердился. Гипсовые отложения с примесями галита стабильно образовывались как на полиэтилене, так и на полиамиде

В седьмой главе описаны стендовые лабораторные испытания, проведенные для оценки возможности комплексного применения внутренних защитных покрытий НКТ и ингибиторов солеотложения. Для поиска наиболее эффективного сочетания «защитное покрытие - ингибитор» было испытано 9 марок защитных покрытий и 7 марок ингибиторов

солеотложения. Было выявлено, что различные марки ингибиторов солеотложения неодинаково воздействуют на процесс солеобразования на покрытиях—в динамических условиях. Покрытия марок «Ингибитор 1», «Ингибитор 2», «Ингибитор 3», «Ингибитор 5» и «Ингибитор 7» способствуют снижению прироста массы солеотложений на испытуемых образцах, причем снижение наблюдается как на стальном образце, так и на испытуемых образцах защитных покрытий, за счет образования меньшего числа центров кристаллизации (рисунок 7).

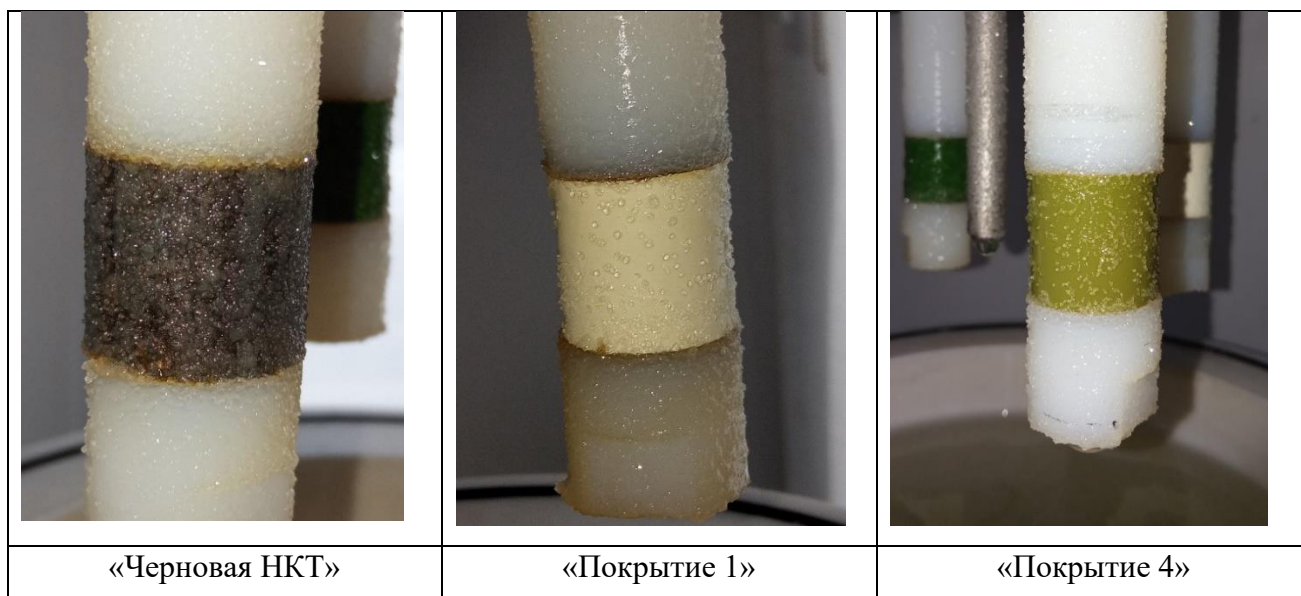


Рисунок 7 - Внешний вид образцов с покрытиями после испытания с применением «Ингибитора 1» в дозировке 200 г/м³

Эффект от комплексного применения защитных покрытий и ингибиторов солеотложения марок «Ингибитор 4» и «Ингибитор 6» заключался в том, что в процессе испытаний происходил срыв образующихся солеотложений с образцов защитных покрытий (рисунок 8).

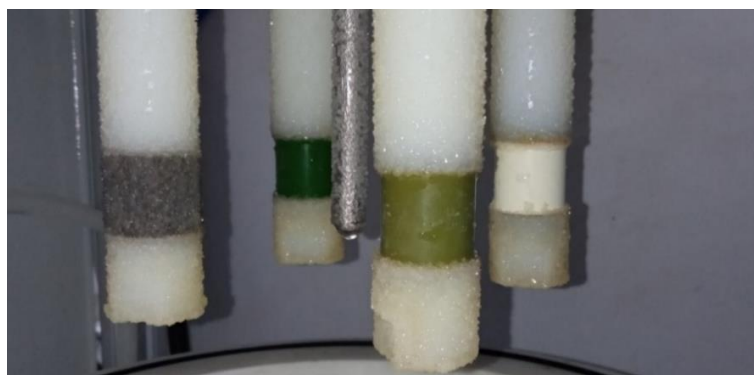


Рисунок 8 - Внешний вид образцов с покрытиями после испытания с применением «Ингибитора 6» в дозировке 200 г/м³

Таким образом, предложенный метод динамического испытания для оценки возможности комплексного применения внутренних защитных покрытий насосно-компрессорных труб и ингибиторов солеотложения позволяет в лабораторных условиях находить наиболее эффективное сочетание «покрытие-ингибитор».

Глава 8 диссертации посвящена исследованию влияния дозирования пресной воды в нефтяные скважины на процессы солеобразования, с акцентом на стойкость защитных покрытий трубного оборудования к солеотложениям. Основное внимание уделено совместному применению пресной воды и покрытий на насосно-компрессорных трубах (НКТ) для предотвращения образования солевых отложений. Выполнено моделирование разбавления солеобразующей среды пресной водой на 10 % и 20 % при различных скоростях потока, а также изучено поведение различных покрытий в этих условиях. Приведены результаты испытаний, демонстрирующие что в случае гипсовых отложений разбавление может дать как прямой эффект (снижение массы солеотложений), так и привести к обратному эффекту — увеличению массы осадков солей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках литературного обзора рассмотрены существующие методы испытаний защитных покрытий для оценки их стойкости к образованию неорганических солеотложений на поверхности. Рассмотрены как методы испытаний в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде, основанные на исследовании свойств покрытий, за счёт которых может быть достигнут антисолевой эффект – определение краевых углов смачивания, шероховатости и адгезии между покрытием и солеотложением. Также был проведен анализ существующего испытательного и лабораторного оборудования, применяемого для изучения процессов солеотложения и проведена оценка возможности применять существующие образцы оборудования для динамических испытаний внутренних покрытий НКТ на стойкость к неорганическим солеотложениям с движущейся солеобразующей средой.

2. Для проведения стендовых динамических испытаний разработан способ приготовления солеобразующей среды гипсового типа. Данный метод моделирования позволяет в лабораторных условиях создавать солеобразующую среду, при погружении в которую происходит образование солеотложений гипсового типа на исследуемой вертикальной поверхности НКТ с покрытиями и без покрытий.

3. Разработан и изготовлен оригинальный исследовательский стенд (патент РФ на изобретение № 2 825 169), позволяющий проводить стендовые динамические испытания защитных покрытий в условиях солеобразующей среды. Динамические условия создаются путем вращения цилиндрических образцов с покрытиями в неподвижной солеобразующей среде. При этом линейные скорости моделирующего вращательного движения на поверхности этих образцов с покрытиями равны линейным скоростям моделируемого продольного течения солеобразующей жидкости в НКТ.

4. Исследованы структура покрытий, определен качественный состав, а также изучены свойства покрытий (шероховатость, краевой угол смачивания, адгезионная связь «солеотложение-покрытие») в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде. Полученные данные о составе, структуре и свойствах покрытий сопоставлены с результатами стендовых динамических испытаний защитных покрытий при относительном движении покрытий и солеобразующей среды. Показано, что в отдельности такие свойства внутренних покрытий как шероховатость, краевой угол смачивания водой и адгезионное взаимодействие «солеотложение-покрытие» по отдельности не отражают в полной мере стойкость защитных покрытий к образованию на своей поверхности солеотложений гипсового типа с примесями галита.

5. Проведены стендовые динамические испытания 9 марок защитных покрытий на «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям». В результате стендовых испытаний было выявлено, что ни одно из испытанных марок защитных покрытий не способно полностью предотвращать процесс образования гипсовых солеотложений с примесями галита на своей поверхности. Наблюдается снижение прироста массы слоя солеотложения по сравнению со стальным образцом, который моделирует черновую НКТ. Наибольшее снижение прироста массы солеотложений наблюдалось на эпоксидно-фенольных системах с добавлением акрилат-полиуретановых блок-сополимеров, а также на силикатно-эмалевом покрытии.

6. Для поиска наиболее эффективного сочетания «покрытие-ингибитор» были проведены стендовые испытания 9 марок защитных покрытий и 7 марок ингибиторов солеотложения. Было выявлено, что эффект от комплексного применения внутренних покрытий НКТ и ингибиторов солеотложений может проявляться следующим образом: а) при комплексном применении покрытий и ингибиторов с маркировками «Ингибитор 1», «Ингибитор 2» и «Ингибитор 3», «Ингибитор 5» и «Ингибитор 7» на защитных покрытиях

образуется меньшее количество центров кристаллизации неорганических солеотложений по сравнению со стальной поверхностью; б) при комплексном применении защитных покрытий и ингибиторов солеотложения маркировки «Ингибитор 4» и «Ингибитор 6» (дозировка 200 г/м³) в процессе испытаний происходил срыв образующихся солеотложений с образцов защитных покрытий. Предложенный метод стендовых испытаний позволяет в лабораторных условиях находить наиболее эффективное сочетание «Покрытие-Ингибитор».

7. Были проведены испытания по моделированию процесса дозирования пресной воды в скважину. Было показано, что при дозировании пресной воды в скважину, склонную к образованию гипса, может быть достигнут как прямой эффект (снижение массы солеотложений), так и обратный эффект (увеличение массы гипсовых солеотложений).

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в ведущих рецензируемых журналах:

1) Берков, Д.В. Разработка стенда оценки стойкости внутренних защитных покрытий НКТ к неорганическим солеотложениям / Д.В. Берков, И.И. Костюк, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин // Нефтегазовое дело. –2024. –Т. 22, – № 1. – С. 160-172. **(ВАК, K1).**

2) Берков, Д.В. Применение защитных покрытий НКТ и ингибиторов солеотложения для предотвращения образования солеотложений / Д.В. Берков, И.И. Костюк, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22, № 5. С. 113-126. **(ВАК, K1).**

3) Berkov, D.V. Possibility assessment for using protective coatings and polymer materials on tubing to prevent inorganic scaling on the inner surface of pipes / D.V. Berkov, I.I. Kostyuk, P.E. Yudin, A.G. Verevkin // International Review of Applied Sciences and Engineering. – 2024. **(SCOPUS, Q3).**

Патенты:

4) Пат. RU 2 825 169 C1. Лабораторный исследовательский стенд для оценки стойкости внутренних покрытий нефтепромысловых труб к неорганическим солеотложениям / А.В.Максимук, П.Е.Юдин, А.Г.Веревкин, М.В.Желдак, И.И.Костюк, Д.В.Берков Заявлено 13.06.2023; Опубликовано: 21.08.2024 Бюл. № 24.

Публикации в других изданиях:

5) Берков, Д.В. Оценка возможности применения защитных полимерных покрытий насосно-компрессорных труб для предотвращения образования неорганических солеотложений в трубах / Д.В. Берков, И.И. Костюк, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин // Территория Нефтегаз, – №3-4 апрель 2023, – С. 66-80.

6) Берков, Д.В. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ВНУТРЕННИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НКТ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ /И.И. Костюк, Д.В. Берков, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин // Инженерная практика. – 2023. №9/2023. – С. 22-28.

7) Берков, Д.В. ПРИМЕНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НКТ И ИНГИБИТОРОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕОТЛОЖЕНИЙ / Д.В. Берков, А.Г. Веревкин // II Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов» (КОРРОЗИЯ-2024): Тез. Докл. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2024. – С. 99-103.

8) Берков, Д.В. ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ВНУТРЕННИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ К НЕОРГАНИЧЕСКИМ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯМ / Д.В. Берков, А.Г. Веревкин // Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: Тез. Докл. – Самара: «Самарский Государственный Технический Университет», 2024. – С. 197-201.

9) Берков, Д.В. Исследование влияния шероховатости внутренних защитных покрытий насосно-компрессорных труб на их способность предотвращать образование гипсовых солеотложений / Д.В. Берков, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 11 октября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 64-76.

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и ФГАОУ ВО

«Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева»

(протокол № 3 от «22» апреля 2025 г.)

Заказ № _____ Тираж 100 экз. Форм. лист. 60×84/16. Отпечатано на ризографе.