

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС,

доктор технических наук, профессор

М.Р. Филонов

«13» 05 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Беркова Дениса Валентиновича

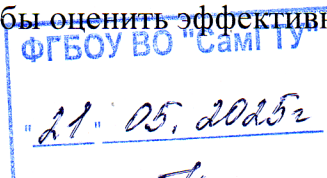
по теме «Влияние состава, структуры и свойств внутренних функциональных покрытий насосно-компрессорных нефтепромысловых труб на защиту от неорганических солеотложений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

1. Актуальность выполненной работы

Функциональные покрытия различного вида находят все большее применение в нефтедобывающей отрасли для защиты внутренней поверхности стальных насосно-компрессорных труб (НКТ) в скважинах от действия различных осложняющих факторов: коррозии, органических асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) и неорганических солевых отложений. Наименее изученным является применение внутренних покрытий для защиты от солевых отложений, в то время как этот осложняющий фактор приобретает все большее значение из-за увеличения доли поздних стадий разработки нефтяных месторождений, для которых характерна высокая степень обводненности продукции и увеличение трудноизвлекаемых запасов нефти. Попутно добываемая минерализованная вода является основным источником солеотложений при нефтедобыче. Формирование солевых отложений приводит к снижению проходимости НКТ, усиливает гидравлическое сопротивление, что в конечном итоге обуславливает снижение дебита скважины и рост затрат на проведение очистительных и ремонтных мероприятий. В настоящее время наиболее распространено в нефтедобыче применение антикоррозионных покрытий НКТ, а поскольку одной из основных причин коррозионных процессов является также высокая обводненность и минерализация скважинной продукции, то весьма перспективно будет рассмотреть возможность применения внутренних антикоррозионных покрытий НКТ также и для предотвращения образования неорганических солеотложений. В случае, если антикоррозионное покрытие окажется способно защищать внутреннюю поверхность НКТ и от солеотложения, то такое покрытие будет являться multifunctional.

Существует как положительный, так и отрицательный опыт применения защитных внутренних покрытий НКТ на нефтяных месторождениях, склонных к осложнениям, вызванным неорганическими солеотложениями. Для того, чтобы оценить эффективность

С отзывом ознакомлен 21.05.2025
Берков



применения защитных покрытий в качестве меры предотвращения солеотложений, необходимо проведение опытно-промысловых испытаний (ОПИ) на месторождениях, но при этом важно понимать, что ОПИ являются дорогостоящими и требуют временных затрат. Поэтому разработка лабораторного метода оценки эксплуатационных свойств покрытий в динамических условиях образования неорганических солей из движущейся водной среды является актуальной задачей для нефтегазовой отрасли.

На основании изложенного, тема диссертационной работы Беркова Д.В., которая посвящена исследованию взаимосвязи состава, структуры и свойств внутренних покрытий насосно-компрессорных труб с образованием неорганических солеотложений на поверхности покрытий, а также разработке лабораторного динамического метода оценки стойкости поверхности покрытий к солеотложениям, является актуальной и имеет научное и практическое значение для нефтегазовой сферы.

2. Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа включает оглавление, введение, 8 глав, заключение, список литературы из 137 наименований, 4 приложения. Объем диссертации составляет 260 страниц, 101 рисунок и 17 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, основные положения, выносимые на защиту, охарактеризована достоверность научных результатов работы и обосновано соответствие паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение, приведена информация об апробации работы и публикации ее результатов.

В первой главе представлен литературный обзор научно-технической информации. Рассмотрены наиболее распространенные типы неорганических солеотложений при нефтедобыче, причины их образования на поверхности нефтегазового оборудования, в том числе НКТ, основные методы профилактики и борьбы с образованием неорганических солеотложений. Показана перспективность применения внутренних защитных покрытий НКТ для предотвращения образования солеотложений. Проанализированы статьи, посвященные изучению зависимости солеотложения от таких свойств покрытий как смачиваемость, шероховатость, адгезионное взаимодействие между покрытиями и солеотложениями. Представлены виды защитных покрытий НКТ, применяемых на объектах нефтедобычи, их состав и свойства.

Во второй главе представлены выбранные для проведения диссертационных исследований покрытия, методики и оборудование для проведения экспериментов. Защитные покрытия наносились на внешние поверхности цилиндрических образцов диаметром 20 мм и высотой 20 мм из стали 40Г2, а также на металлические пластины с размерами 100 мм на 100 мм плоских образцов. В качестве объектов исследования было выбрано девять наиболее часто применяемых марок внутренних защитных покрытий НКТ различного состава: восемь полимерных на эпоксидно-фенольных и

полиуретановых основах и одно силикатно-эмалевое. Для проведения комплексных исследований влияния покрытий вместе с ингибиторами солеотложений использовалось также семь видов ингибиторов различного химического состава. Представлены также оборудование и методы исследования состава, структуры и свойств (шероховатости, адгезии, краевого угла смачивания) покрытий в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде, а также определения интенсивности солеобразования на покрытиях в динамических условиях стендовых испытаний при относительном движении покрытий и солеобразующей среды.

Третья глава посвящена разработке лабораторного стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям. Сначала выполнен анализ достоинств и недостатков существующих различных типов лабораторного оборудования, применяемого для исследований процесса солеотложения. С учетом выявленных достоинств и недостатков существующего оборудования разработан и изготовлен оригинальный «Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», на который был получен патент на изобретение RU 2 825 169 C1. Для моделирования движения жидкости относительно испытываемого защитного покрытия НКТ был выбран метод «вращающихся цилиндров» в неподвижной солеобразующей среде. Угловая скорость вращения цилиндрических образцов подбиралась таким образом, чтобы линейная скорость движения покрытия относительно неподвижной среды совпадала с линейной продольной скоростью движения среды внутри НКТ.

Четвертая глава посвящена методологии создания модельной солеобразующей среды для стендовых динамических испытаний. Сначала методами энергодисперсионного анализа и рентгенофазового анализа был определен качественный состав пробы солеотложения с месторождения ООО «Иркутская нефтяная компания», который показал преимущественно гипсовую основу $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с примесями галита NaCl . Для солеотложений такого типа наиболее характерно выпадение осадка по причине смешения несовместимых вод, поэтому для динамических испытаний был выбран механизм моделирования смешения вод – путем дозированной подачи несовместимых вод в реактор разработанного стенда. Анализ литературы, а также проведенные лабораторные эксперименты показали, что не любое смешение несовместимых вод приводит к образованию солей на исследуемой вертикальной поверхности покрытий, а только при создании слабого пересыщения раствора. В этом случае 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.

В пятой главе представлены результаты исследования состава, структуры, свойств защитных покрытий в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде, и сопоставления полученных данных с результатами стендовых испытаний этих покрытий на стойкость к

неорганическим солеотложениям в динамических условиях относительного движения покрытий и солеобразующей среды. При исследовании микроструктуры покрытий показана слоистость их строения, определены толщины слоев и покрытий в целом, наличие минеральных порошковых наполнителей и их размеры, а также возможное наличие пор. На внешних поверхностях покрытий практически отсутствуют крупные неровности с размером значительно более 1 мкм, поверхности покрытий макроскопически гладкие, местами волнистые, но они имеют микроскопические неровности с размером менее 1 мкм, количественной мерой которых служит шероховатость покрытий. Результаты определения шероховатости покрытий сопоставлены с солеотложением на них при испытании на разработанном стенде. Наибольшей шероховатостью обладает стальная поверхность без покрытия, и 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 у трех покрытий шероховатость больше, чем у остальных, но солеотложение на них меньше. Сравнение полученных результатов измерения краевого угла смачивания покрытий дистиллированной водой с результатами стендовых испытаний солеотложения однозначных закономерностей также не выявило. Сравнение экспериментально полученных величин адгезионной прочности соединения «солеотложение-покрытие» с результатами стендовых испытаний тоже не позволяет сделать однозначных выводов относительно влияния данного показателя на способность покрытия предотвращать образование солеотложений на своей поверхности. Наконец, сопоставление фазового состава покрытий с результатами стендовых испытаний также не дает однозначного соответствия, так как при одних скоростях моделируемого потока солеобразующей среды минимальное солеотложение может наблюдаться на одном покрытии, а при других скоростях – на другом покрытии с другим фазовым составом.

В шестой главе приведены результаты проведенных лабораторных испытаний на разработанном «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям». Результаты показали, что наблюдается снижение массы солеотложений на всех цилиндрических образцах с испытанным защитными покрытиями по сравнению со стальным цилиндрическим образцом без защитного покрытия, но ни одно из испытанных защитных покрытий не способно полностью предотвращать образование солеотложений на своей поверхности. Введено понятие эффективности защитного покрытия, показывающее, насколько его применение уменьшает массу неорганического солеотложения на цилиндрическом образце с покрытием по сравнению с массой солеотложения на стальном цилиндрическом образце без защитного покрытия. При скорости моделируемой скорости потока 0,5 м/с наиболее эффективно оказалось силикатно-эмалевое покрытие (41,6 %), а при моделируемых скоростях потока от 1 м/с до 3 м/с наиболее эффективным (53,7 %) себя показало покрытие на основе эпоксидно-

фенольного полимера с наполнителем класса акрилат-полиуретановых блок-сополимеров.

В седьмой главе представлены результаты стендовых испытаний с совместным комплексным применением защитных покрытий и ингибиторов солеотложения при различной дозировке от 50 г/м³ до 200 г/м³. Показано, что комплексное применение покрытий и ингибиторов повышает эффективность уменьшения солеотложения (максимально до значения 93,65 %) по сравнению со стальным образцом без использования ингибитора по двум причинам: как за счет образования меньшего количества центров кристаллизации неорганических солеотложений, так и за счет срыва образующихся солеотложений с поверхности защитных покрытий. При этом разработанный метод стендовых испытаний позволяет в лабораторных условиях находить наиболее эффективное сочетание «покрытие-ингибитор».

В восьмой главе описаны результаты стендовых испытаний по комплексному применению защитных покрытий и дозирования пресной воды для моделирования процесса добавления пресной воды в скважину с целью разбавления солевого состава пластовых вод. Из полученных результатов испытаний следует, что на объектах нефтедобычи, склонных к образованию гипсовых отложений, разбавление может дать как прямой эффект (снижение массы солеотложений), так и привести к обратному эффекту — увеличению массы осадков солей.

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертации.

В приложениях представлены: Методика оценки эффективности применения защитных покрытий против солеотложений на «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», Акты об использовании результатов диссертационной работы Беркова Д.В. в ООО «Научно-производственный центр «Самара» и в ООО «Иркутская нефтяная компания», Свидетельство о регистрации ноу-хау «Способ приготовления солеобразующей среды для проведения стендовых динамических испытаний покрытий на стойкость к неорганическим солеотложениям гипсового типа» в реестре секретов производства ООО «Научно-производственный центр «Самара», г. Самара.

3. Значимость для науки результатов диссертационного исследования

Впервые исследован комплекс характеристик (фазовый состав, микроструктура, шероховатость, адгезионная прочность соединения «солеотложение-покрытие», краевой угол смачивания) наиболее распространенных внутренних функциональных покрытий нефтепромысловых насосно-компрессорных трубах в статических условиях отсутствия солеобразующей среды или неподвижных покрытий в неподвижной солеобразующей среде, и этот исследованный комплекс характеристик покрытий сопоставлен с эффективностью применения покрытий для защиты от образования неорганических солеотложений в динамических условиях, моделирующих движение потока солеобразующей среды относительно покрытия.

Для моделирования динамических условий формирования неорганических солеотложений на поверхности внутреннего покрытия НКТ как в низкодебитных, так и высокодебитных скважинах разработан и изготовлен лабораторный «Стенд оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение RU 2 825 169 C1. Предложены методы динамических испытаний покрытий на стенде, которые позволяют оценить способность покрытия предотвращать образование солевых отложений на своей поверхности, определять эффективность комплексного применения защитного покрытия и ингибиторов солеотложения, а также добавления пресной воды в солеобразующую среду.

Показано неоднозначное соответствие определенных в статических условиях состава, структуры и свойств функциональных внутренних покрытий НКТ способности этих покрытий сопротивляться образованию неорганических солеотложений в динамических условиях, моделирующих движение потока солеобразующей среды в насосно-компрессорной трубе.

Согласно полученным результатам стендовых испытаний внутренних функциональных покрытий НКТ, все испытанные покрытия уменьшают солеотложение по сравнению со стальным образцом без покрытия, но эффективность уменьшения солеотложения зависит от моделируемого скоростного режима потока солеобразующей среды и не превышает 53,7 %. Комплексное применение покрытий с ингибиторами солеотложений может увеличить эффективность покрытия в уменьшении солеотложения до 93,65 %, однако надо учесть, что добавление ингибиторов заметно увеличивает стоимость нефтедобычи. Добавление пресной воды в солеобразующую среду может дать как прямой положительный эффект - снижение массы солеотложений, так и привести к обратному эффекту — увеличению массы осадков солей.

Полученные результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке новых, более эффективных функциональных покрытий для защиты нефтепромыслового оборудования от неорганических солеотложений.

4. Значимость для производства результатов диссертационных исследований автора

Разработка «Стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям» позволила создать метод оценки эффективности защитных покрытий в предотвращении образования солеотложений на внутренней поверхности НКТ. Данный стенд применяется в ООО «Научно-производственный центр «Самара» для проведения испытаний поверхности покрытий на стойкость к солеобразованию в динамических условиях (в условиях, моделирующих движение потока относительно поверхности покрытия).

Результаты диссертационных исследований Беркова Д.В. использовались в ООО «Иркутская нефтяная компания», для которой в 2023 году была выполнена работа по теме «Проведение испытаний защитных покрытий труб НКТ на стойкость к солеотложениям».

Анализ причин выпадения солеотложений на объектах ООО «ИНК». Анализ возможности применения защитных покрытий, как меры предотвращения выпадения солеотложений на оборудовании ООО «ИНК». Методологически все проведенные стендовые испытания базировались на выводах, сделанных в диссертации Беркова Д. В., а испытания проводились непосредственно на разработанном лабораторном «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям» (Патент на изобретение RU 2 825 169 С1). Полученные результаты применяются в компании 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 солеотложений.

5. Рекомендации об использовании результатов и выводов, приведенных в диссертации

Разработанная Берковым Д.В методика оценки эффективности применения защитных покрытий против солеотложения на «Стенде оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям», а также результаты применения выводов диссертации Беркова Д.В. в ООО «Иркутская нефтяная компания» для оценки возможности применения защитных покрытий в качестве меры профилактики солеотложений рекомендуются использовать также в таких компаниях как ПАО «НК «Роснефть», ПАО «Газпромнефть», ОАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «Сургутнефтегаз» и других нефтяных компаниях.

6. Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Основные результаты диссертационной работы Беркова Д.В. представлены в девяти опубликованных работах, в том числе в двух статьях рецензируемого научного журнала «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», в одной статье журнала, рецензируемого в международной базе Scopus, а также в одном патенте РФ на изобретение.

Публикации полностью отражают основное содержание диссертации и автореферата.

7. Соответствие диссертации паспорту заявленной специальности

Тема диссертационной работы и ее содержание полностью соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (отрасль науки – технические, химические) по пунктам 6 и 12:

6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий.

12. Установление закономерностей влияния состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и других факторов на свойства функциональных покрытий.

8. Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертационным работам

Выполнены все требования, предъявляемые к диссертационным работам. Проведен подробный литературный анализ, правильно определены цели и задачи исследования. Экспериментальные результаты представлены четко, как в виде графиков и фотографий структур, так и текста, их описывающего. Работа написана ясным языком, хорошо иллюстрирована. Диссертация и автореферат содержат необходимые разделы и соответствуют друг другу.

9. Замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний стоит отметить:

1) Название диссертационной работы «Влияние состава, структуры и свойств внутренних функциональных покрытий насосно-компрессорных нефтепромысловых труб на защиту от неорганических солеотложений» подразумевает, что исследование должно быть проведено для разных типов солеотложений, а фактически в диссертационной работе проводились испытания на стойкость поверхности покрытий только к гипсовым солеотложениям.

2) В главе 3 при разработке лабораторного стенда для моделирования движения жидкости относительно испытуемого защитного покрытия НКТ был выбран метод «вращающихся цилиндров» в неподвижной солеобразующей среде. Но нет обоснованного ответа на возникающий вопрос, насколько корректно сравнивать вогнутую поверхность внутреннего покрытия НКТ с внешним покрытием на выпуклой поверхности вращающегося цилиндра?

3) В конце главы 3 при описании разработанного «Стенда оценки стойкости покрытий к неорганическим солеотложениям» отмечается, что «Скоростное подобие обеспечивалось за счет того, что скорость вращения цилиндрических образцов подбиралась таким образом, чтобы линейная скорость движения поверхности образцов с покрытиями в неподвижной солеобразующей среде стенда соответствовала линейным скоростям продольного потока жидкости внутри НКТ.» Однако при этом не уточняется, какой именно линейной скорости продольного потока жидкости внутри трубы, например, при ламинарном течении (средней или максимальной) должно быть это соответствие? Следовало бы обсудить вопрос о соответствии скоростей в стенде и в реальной насосно-компрессорной трубе, имея в виду возможность течения солеобразующей жидкости в трубе как в ламинарном, так и в турбулентном режимах.

4) В главе 5 на рисунке 58 показана зависимость массы образующихся на покрытиях солеотложений от шероховатости покрытий и делается вывод о неоднозначном соответствии массы солеотложения на покрытии его шероховатости.

Однако более корректно это было бы рассмотреть на одном покрытии, то есть покрытии одного и того же состава, но с различной шероховатостью, так как в диссертационном исследовании различная шероховатость была у покрытий разного состава, и на массе солеотложения сказывалась, вероятно, не только шероховатость, но и состав покрытия.

5) Почему в главе 5 исследовались и в Таблице 5 представлены результаты измерения краевого угла смачивания покрытий дистиллированной водой, а не моделируемым раствором солеобразующей среды?

6) При измерении краевого угла смачивания покрытий не учитывалось изменение угла во времени, что при таком учете привело бы к определению диапазона угла смачивания.

7) Не проведено исследование кинетики образования солеотложений на покрытиях в зависимости от времени, так как из начала главы 6 следует, что продолжительность одного цикла стендового динамического испытания составляла 6 часов для всех испытаний. Нет обоснования выбора именно этой продолжительности испытания.

8) Также из начала главы 6 следует, что все стендовые испытания проводились при одном значении температуры 30 °С. Не было проведено исследование влияние температуры среды на образование солеотложений на поверхности покрытий.

Однако отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки, высокого научного уровня и практической значимости диссертационной работы и могут рассматриваться как рекомендации для дальнейших исследований в развитие этого важного научно-технического направления.

Заключение

Диссертационная работа Беркова Дениса Валентиновича на тему «Влияние состава, структуры и свойств внутренних функциональных покрытий насосно-компрессорных нефтепромысловых труб на защиту от неорганических солеотложений» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения и разработки по исследованию влияния состава, структуры и свойств внутренних функциональных покрытий насосно-компрессорных нефтепромысловых труб на образование неорганических солевых отложений и определению эффективности этих покрытий в защите от неорганических солевых отложений на основе применения оригинального лабораторного испытательного стенда, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация соответствует всем критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и ее автор, Берков Денис Валентинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Отзыв составлен на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций Беркова Д.В. на заседании кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (протокол № 8 от «13» мая 2025 г.).

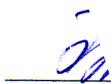
Авторы отзыва дают согласие на обработку своих персональных данных, связанных с защитой диссертационной работы Беркова Дениса Валентиновича.

Заведующий кафедрой порошковой металлургии
и функциональных покрытий,
доктор технических наук
(01.04.17 – Химическая физика, в том числе
физика горения и взрыва),
профессор



Евгений Александрович Левашов

Доцент, ученый секретарь кафедры порошковой
и функциональных покрытий,
кандидат технических наук
(05.16.06 – Порошковая металлургия
и композиционные материалы)



Марина Яковлевна Бычкова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, г. Москва, Ленинский проспект, 4, стр.1

Тел.: +7(499)237-22-22, +7(495) 638-44-34

e-mail: personal@misis.ru

Веб-сайт: <https://misis.ru>



Копия
Левашов Е.А.; Бычкова М.В.

начальника
отдела кадров

Кузнецова А.Е.

«13» 05 2025 г.