

На правах рукописи

Садыков Марат Ильдарович



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТАМПОНАЖНЫХ
СОСТАВОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СКВАЖИН**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Блинов Павел Александрович

Официальные оппоненты:

Чернышов Сергей Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра Нефтегазовых технологий, заведующий кафедрой;

Каменских Сергей Владиславович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет», кафедра бурения скважин, доцент.

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2024 г. в 15:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория №3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



САВЕНОК
Ольга Вадимовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из основных факторов, обеспечивающих эффективную и безопасную добычу углеводородов из продуктивного пласта, является совместная герметичность обсадной колонны и заколонного пространства. Учитывая современные тенденции в области строительства скважин, цементный камень, находящийся за стенкой обсадной колонны, подвержен динамическим нагрузкам.

При разбурировании цементного стакана после ожидания затвердевания цемента (ОЗЦ) компоновка низа буровой колонны (КНБК) оказывает воздействие на обсадную колонну (ОК) и цементный камень, т.к. КНБК находится в сложном напряженном состоянии, образуя плоскую волну или объемную спираль, которая обладает несколькими точками контакта с внутренней стенкой обсадной колонны. Колебания КНБК и, как следствие, периодическое биение (ударные нагрузки) негативно влияют на целостность цементного камня за обсадной колонной, вызывая условия для образования трещин, которые впоследствии могут привести к межколонным перетокам и негерметичности заколонного пространства.

Следствием негативного влияния динамического воздействия является образование межколонного давления (МКД) и заколонной циркуляции (ЗКЦ), что приводит к остановке добычи и проведению ремонтно-изоляционных работ (РИР). По статистическим данным, на 8000 скважинах в Мексиканском заливе выявлено межколонное давление, а в России МКД зафиксировано на 30-50 % нефтяных и газовых скважин действующего фонда (≈ 7800 скважин), до 30 % от общего объема РИР составляет борьба с ЗКЦ и МКД.

Разработка состава тампонажного раствора-камня, обеспечивающего эксплуатацию крепи в области упруго-циклической деформации без нарушения целостности ее поровой структуры, а также алгоритма оценки способности цементного камня воспринимать многократные динамические нагрузки позволит обеспечить надежную изоляцию заколонного пространства.

Степень разработанности темы исследования

Научными исследованиями в области разработки упругих тампонажных систем занимались многие, как зарубежные, так и российские ученые.

Наибольший вклад в исследование и разработку упругих цементных систем в разное время внесли А.И. Булатов, Ф.А. Агзамов, В.П. Овчинников, С.Е. Чернышов, С.В. Каменских, А.А. Гайворонский, В.С. Данюшевский, Л.Б. Измайлов, Е.К. Мачинский, Д.Ю. Мочернюк, Г.М. Саркисов, Г.Н. Хальгиндин, Н.И. Николаев, Greg Ash, David Bedford, Clay Dupree, John (J.J.) Jennings, Kathy Mead, Von Parkey, Sherry Snyder, и Ralph Voss и др., однако ученые детально не рассматривали вопрос о разработке методики, позволяющей оценить способность цементного камня сопротивляться многократным динамическим нагрузкам.

Объект исследования – цементный камень в заколонном пространстве скважины.

Предмет исследования – свойства цементного камня в условиях динамического воздействия.

Цель работы – повышение качества крепления нефтяных и газовых скважин.

Идея работы заключается в разработке состава тампонажного раствора с добавкой эластификатора, формирующего камень, способный сопротивляться многократным динамическим нагрузкам, и подобранного на основе предлагаемого алгоритма оценки его прочностных характеристик.

Основные задачи исследования:

1. На основе анализа литературных источников выявить составы тампонажных растворов, обеспечивающих получение цементного камня с улучшенными упруго-прочностными свойствами.

2. Выявить закономерности технических и технологических факторов, влияющих на качество крепи при строительстве нефтяных и газовых скважин.

3. Разработать алгоритм оценки упруго-прочностных свойств цементного камня для условий многократных динамических нагрузок.

4. Разработать состав тампонажного раствора, формирующего цементный камень, способный сопротивляться многократным динамическим нагрузкам за счет достижения требуемых упруго-прочностных свойств.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснован и экспериментально определен диапазон виброускорений КНБК, позволяющий оценить упругие характеристики и выносливость цементного камня при ударных нагрузках в скважине после ОЗЦ.

2. Экспериментально установлено, что за счет образования вторичного каркаса из эпоксидной смолы в поровом пространстве формирующегося цементного камня, увеличивается коэффициент Пуассона, снижается модуль Юнга, а также снижается проницаемость и пористость по сравнению с базовым тампонажным раствором.

3. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин по пунктам 6 и 8.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретическая значимость заключается в научном обосновании и разработке алгоритма исследования способности цементного камня воспринимать динамические нагрузки, базирующегося на проведении испытаний по выносливости с перегрузкой до 12 G при бурении.

2. Научно обосновано формирование вторичного каркаса из эпоксидной смолы в матрице формирующегося цементного камня на примере разработанного состава (В:Ц = 0,47, ПЦТ 1-G-CC-1 – 100%, лигносульфонатный замедлитель 0,2%, полимер проп-2-еновой кислоты с 2-метил-2-[(1-оксопроп-2-енил) амино]-1-пропансульфоновой кислотой – 0,25%, смесь диоксида кремния, минерального масла, n-Деканола и 1-Гептанола – 0,2%, диглицидиловый эфир бисфенола А – 4,11 %, полиэтиленполиамин– 0,41%, сополимер винилацетата и этилена 3 % - 1%).

3. Разработана программа для ЭВМ по тестированию технологических свойств цементных растворов и расходу материалов в зависимости от требуемой плотности раствора (патент №

2023660996).

4. Доказана эффективность использования упругих цементных систем для повышения качества цементирования эксплуатационных колонн и хвостовиков на примере Надым-Пурской области Западной Сибири, получен акт внедрения.

Методология и методы исследования

Работа выполнялась с применением информационно-аналитических и экспериментальных методов. При проведении исследований применялся комплексный подход к изучению упругих свойств цементного камня, который включает: анализ и обобщение научных работ в области цементирования скважин, а также статистические данные о качестве цементирования до и после воздействия на цементную крепь, методы исследований стандартизированных свойств тампонажных составов базируются на требованиях стандартов API 10B-2, API 10-B-6, ISO 10426-2, ГОСТ 28985-91, ГОСТ 21153.3-85. Лабораторные испытания проведены на базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный алгоритм исследования способности цементного камня сопротивляться динамическим нагрузкам, включающий в себя определение динамических упругих характеристик и выносливости при перегрузке до 12G, позволяет обосновать состав тампонажного раствора.

2. Введение в состав цементного раствора эпоксидной смолы содержанием от 4 до 13 % (от массы цемента) при В:Ц = 0,47 приводит к созданию вторичного скелета, состоящего из частиц эпоксидной смолы диаметром 0,1-0,5 мм соединенных между собой, что позволяет снизить модуль Юнга, увеличить коэффициент Пуассона и повысить выносливость цементного камня более чем в 11 раз.

Степень достоверности и апробации результатов подтверждается проведением экспериментальных исследований по соответствующим зарубежным и ответственным стандартам на современном оборудовании, достаточной сходимостью полученных результатов. Обработка экспериментальных исследований

осуществлена с помощью методики рационального математического планирования эксперимента. Полученные результаты исследований апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Апробация диссертационной работы проведена на 4 научно-технических мероприятиях с докладами: Международный молодежно-практический форум «Нефтяная столица» (г. Сургут, 2022 г.); XIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» (г. Донецк, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); II Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.).

Личный вклад автора. На основе литературных источников, аналитических и экспериментальных исследований обоснована необходимость совершенствования составов цементных растворов. Выполнены экспериментальные исследования по определению упруго-прочностных характеристик цементного камня и технологических свойств тампонажного раствора. Разработаны стенды для оценки динамического воздействия КНБК на цементный камень в заколонном пространстве. Предложена методика оценки способности цементного камня сопротивляться динамическим нагрузкам, позволяющая обосновать составы тампонажных растворов.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье – в издании, входящем в международную базу данных и в систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения,

списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 146 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 18 таблиц.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность коллективу кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, а именно доц., к.т.н. Блинову П.А. и доц., к.т.н. Никишину В.В., коллективам научных центров «Арктика» и «Геомеханики и проблем горного производства» за содействие в проведении экспериментов, а также инженеру-геофизику ООО «Геоскан» Садыковой З.И. за оказание консультаций в области геофизических исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, актуальность проведенных исследований, сформулирована цель и задачи работы, проведен анализ существующих источников литературы по теме применения упругих тампонажных смесей и методов оценки способности цементного камня воспринимать динамические нагрузки.

Обоснованы и сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе рассматриваются виды тампонажных материалов и области их применения, приводится анализ номенклатуры добавок для придания цементному камню упругих свойств и условиях их использования, оцениваются факторы и рекомендации по повышению качества цементирования, проанализированы динамические нагрузки на крепь скважины при бурении.

Во второй главе рассматривается методика выполнения тестирования стандартизированных свойств цементного раствора и камня. В ходе исследований определены упруго-прочностные характеристики цементного камня, позволяющие оценить надежность крепи скважины.

В третьей главе рассматриваются характеристики колебаний КНБК при бурении, приводится анализ разработок методов определения выносливости цементного камня, на основе которых

спроектировано два испытательных стенда: «Стенд-имитатор виброускорений» и «Стенд-имитатор условий разбуривания цементного стакана». Приведены методы комплексных исследований цементного камня в рамках разработки алгоритма испытаний.

В четвертой главе отражаются результаты тестирования и изучения внутреннего строения цементных смесей, производится проверка предложенного алгоритма испытаний, на основе которого был разработан состав тампонажного раствора.

Основные результаты выполненных исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Разработанный алгоритм исследования способности цементного камня сопротивляться динамическим нагрузкам, включающий в себя определение динамических упругих характеристик и выносливости при перегрузке до 12G, позволяет обосновать состав тампонажного раствора.

В настоящее время нормативные документы регламентируют прочностные свойства цементного камня только в статических условиях в рамках входного контроля портландцемента, как сырья для производства тампонажных смесей, поэтому операторы месторождений предъявляют к ним собственные требования.

Исходя из проведенного анализа существующих упругих тампонажных растворов были исследованы составы, представленные в таблице 1. В качестве базы сравнения применялся раствор нормальной плотности без специальных добавок (ЦР-1).

В процессе строительства скважины цементная крепь воспринимает динамические нагрузки, среди которых особенно разрушающими являются:

- 1) ударное воздействие КНБК при разбуривании цементного стакана и бурении под следующую секцию обсадной колонны;
- 2) опрессовка обсадной колонны и ПВО.

Основная идея алгоритма заключается в следующем:

- 1) исследование стандартизированных свойств тампонажного раствора-камня на основе стандартов API 10B-2, API 10B-6, ISO 10426-2;

2) проведение испытаний для определения динамических упругих характеристик цементного камня с использованием ультразвука;

3) исследование выносливости цементного камня под воздействием перегрузки 12 G на разработанных стендах;

4) вывод о применимости состава на основании проведенных испытаний.

Результаты исследований динамических упругих свойств, полученных с помощью ультразвуковых (неразрушающих) методов представлены в таблице 2.

Проанализировав практические данные и рекомендации производителей забойного оборудования, можно сделать вывод о том, что максимальный возможный уровень виброускорений (вибраций) находится в пределе 12 G (который будет использован в качестве максимального целевого уровня виброускорений).

Для проверки способности цементного камня воспринимать динамические нагрузки разработан испытательный стенд «Стенд-имитатор виброускорений» (рисунок 1). Станина сконструирована из стойки для вертикального сверления. В качестве возбудителя колебаний для создания ударной нагрузки используется перфоратор (выходная мощность 780 Вт, энергия удара 2,3 Дж, максимальная частота колебаний 4500 мин⁻¹). Для создания осевой нагрузки используются грузы, обеспечивающие силу прижатия бойка 120 Н. Испытания проводятся на стандартных образцах цементного камня в форме кубов по стандарту ISO 10426-2.

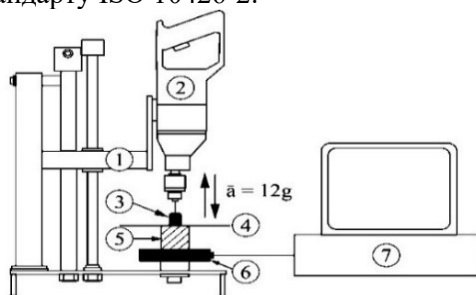


Рисунок 1 – Испытательный стенд: 1 – станина, 2 – перфоратор, 3 – боек, 4 – стальная пластина, 5 – образец цементного камня, 6 – акселерометр, 7 – персональный компьютер

После испытаний образца цементного камня, получен график нагрузки и количества ударов от времени (рисунок 2).

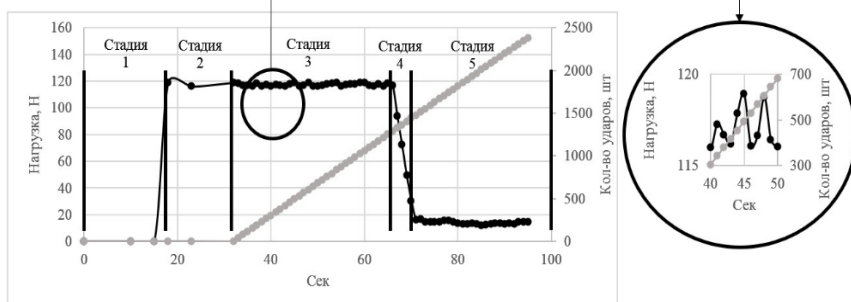


Рисунок 2 – График зависимости нагрузки и количества нагружений от времени испытаний

График разделяется на 5 стадий, а именно:

- 1) стадия 1: начало работы датчиков и проверка записи данных;
- 2) стадия 2: проверка корректности показаний датчиков и записи;
- 3) стадия 3: возбуждение колебаний и сопротивление цементного камня динамической нагрузке во время нанесения ударов (позволяет провести количественную оценку по длительности и количеству нагружений);
- 4) стадия 4: разрушение образца от ударов (фиксируется по снижению нагрузки);
- 5) стадия 5: полное разрушение образца (стабилизация нагрузки, возбудитель колебаний достигает нижней точки свободного хода станины).

Результаты оценки испытаний составов по отработке алгоритма представлены в таблице 3.

В результате анализа экспериментальных данных видно, что цементный камень без добавок ЦР-1 быстро теряет связность, что указывает на высокую хрупкость материала и низкую способность воспринимать динамические нагрузки. Однако образец ЦР-1.3 показал положительный результат испытаний и разрушился без образования крупных частей. Образец ЦР-6 также выдержал испытания на выносливость, сопротивляясь динамической нагрузке на протяжении 532 с.

При более подробном рассмотрении операции разбуривания цементного стакана, исходя из данных статистики, затрачивается в среднем 1-1,5 часа, при этом средняя механическая скорость бурения находится в диапазоне от 0,55 см/мин до 0,83 см/мин, в связи с чем требуется разработать состав, способный сопротивляться динамической нагрузке более 545 с.

Исходя из проанализированных источников и результатов экспериментальных исследований, разработан стенд «Стенд-имитатор условий разбуривания цементного камня» (рисунок 3), который позволяет оценить герметичность крепи.

Стенд представляет собой блок горной породы в котором пробурена скважина, спущена и зацементирована обсадная труба с сохранением цементного стакана. После проверки на герметичность проводится эксперимент. Переводник удаляется, и производится разбуривание цементного стакана с осевой нагрузкой 1,5 кН и частотой вращения 80-100 об/мин. Каждые 5 см проходки осуществляется проверка обсадной колонны на герметичность путем опрессовки на протяжении 5 минут. Падение давления во время опрессовки указывает на образование трещин в цементном камне, что является показателем начала разрушения крепи. Фиксация виброускорений и результаты оценки герметичности свидетельствуют о максимальном значении виброускорения, которое может воспринимать цементный камень без растрескивания.

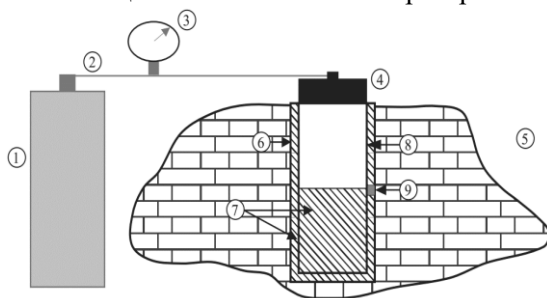


Рисунок 3 – Стенд с зацементированной обсадной трубой:
 1 – газовый баллон, 2 - рукав высокого давления, 3 – манометр,
 4 – герметичный переводник, 5 – горная порода, 6 – стенка скважины, 7 – цементный камень «за» и «в» обсадной трубе,
 8 – обсадная труба, 9 – акселерометр

В результате испытания установлено:

1) ЦР-1. Виброускорения до 5-6 G на протяжении 30 минут не сказываются на герметичности цементной крепи при опрессовке давлением 0,8 МПа, при превышении значения виброускорения более 11,5 - 12 G за счет увеличения частоты вращения и осевой нагрузки до 2 кН на протяжении 25-30 с происходит растрескивание цементного камня и потеря герметичности крепи;

2) ЦР-6. Виброускорения до 5-6 G на протяжении 30 минут не сказываются на герметичности цементной крепи при опрессовке давлением 0,8 МПа, при превышении значения виброускорения более 11,5-12 G на протяжении 512 секунд не приводит к растрескиванию цементного камня и потере герметичности крепи.

По результатам экспериментальных исследований определено, что стенд позволяет создать вариативные условия: изменить тип долота, использовать гидравлические забойные машины и/или другие образцы горной породы/цементного камня.

В результате серии экспериментов с использованием ультразвука на приборах Пульсар-2.2 и A1220 Monolith установлено, что стандартный цементный камень (ЦР-1), обладающий динамическим модулем Юнга 18,43 ГПа, не способен выдержать испытания, в то время как (ЦР-6), обладающий модулем Юнга 11,12 ГПа, прошел испытания на выносливость, что указывает на его максимальное допустимое значение.

2. Введение в состав цементного раствора эпоксидной смолы содержанием от 4 до 13 % (от массы цемента) при В:Ц = 0,47 приводит к созданию вторичного скелета, состоящего из частиц эпоксидной смолы диаметром 0,1-0,5 мм соединенных между собой, что позволяет снизить модуль Юнга, увеличить коэффициент Пуассона и повысить выносливость цементного камня более чем в 11 раз.

С целью исследования внутренней структуры цементно-эпоксидного камня проведен анализ шлифовых материалов. В исследовании участвовали следующие образцы: ЦР-2-5, ЦР-7-8.

В центральной части шлифа образца ЦР-3 встречаются мелко-среднеразмерные сферы эпоксидной смолы, равномерно распределенные в объеме цемента. Возле больших шарообразных

вкраплений эпоксидной смолы наблюдаются плоскости, наполненные эпоксидной смолой, которые соединяют частицы, образуя вторичный скелет (рисунок 4).

Всего было проанализировано 18 шлифовых проб из 6 образцов цементного камня. К общим выводам можно отнести:

1) при увеличении концентрации эпоксидной смолы увеличивается количество включений в составе цементного камня;

2) при уменьшении концентрации эпоксидной смолы менее 4% образование вторичного скелета не фиксируется, связи между частицами эпоксидной смолы не образуются;

3) при увеличении концентрации эпоксидной смолы выше 13% отмечается увеличение размеров, как частиц эпоксидной смолы, так и связующих плоскостей, что отрицательно сказывается на связности образца цементного камня;

4) образование вторичного каркаса из эпоксидной смолы в матрице формирующегося цементного камня происходит за счет вытеснения жидкой эпоксидной смолы в естественные поры камня во время его твердения.

Дополнительно, для уточнения понимания механизма распределения эпоксидной смолы внутри цементного камня, проведены исследования образцов ЦР-1 и ЦР-5 на 3D рентгеновском томографе SkyScan 1173 (рисунки 5, 6). Поровое пространство цементно-эпоксидного камня (рисунок 5) равномерно заполнено эпоксидной смолой, что также видно на шлифовых пробах. Эпоксидная смола внутри порового пространства цементного камня образует вторичный скелет, следовательно, прочность камня будет определяться синергетическим действием двух компонентов.

Для подтверждения вышеизложенного образцы исследовались на открытую пористость и проницаемость с помощью анализатора ПИК-ПП. Выявлено, что использование эпоксидной смолы в составе цементного раствора снижает проницаемость и открытую пористость цементного камня более, чем в 20 раз, по сравнению со стандартным образцом (таблица 4), что указывает на механизм вытеснения смолы в поровое пространство цементного камня.

Таблица 4 - Результаты тестирования проницаемости по газу и открытой пористости

Раствор	Открытая пористость, %	Проницаемость*10 ¹⁵ , м ²
ЦР-1	22,9	1,4
ЦР-5	0,008	0,011

Тестирование разработанных составов (ЦР 1-6) по определению статических упруго-прочностных характеристик проведено с помощью разрушающих методов на испытательной системе MTS Direct Shear Test Systems, результаты которых представлены в таблице 5. Пример результатов испытаний упругих свойств для образца ЦР-5 показан на рисунке 7.

После выдержки этих же образцов в забойных условиях в течение 24 ч, проведены испытания на стенде-имитаторе виброускорений с целью оценки способности цементного камня сопротивляться динамическим нагрузкам (таблица 6) и стенде-имитаторе условий разбухания цементного камня (таблица 7).

Таблица 5 – Упруго-прочностные характеристики разработанных тампонажных растворов

Раствор	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Максимальные относительные деформации, ед.*10 ³	Прочность на сжатие/изгиб/ растяжение, МПа
ЦР-1	11,37	0,16	3,12	27,45/6,03/1,78
ЦР-2	10,03	0,24	3,69	24,14/5,31/5,67
ЦР-3	9,11	0,28	4,52	34,45/6,88/3,42
ЦР-4	7,89	0,27	4,82	26,05/8,07/1,98
ЦР-5	6,93	0,31	5,32	32,81/7,86/6,49
ЦР-6	7,21	0,29	5,02	24,67/6,54/1,52

По результатам исследований, наилучшими упругими свойствами обладают составы ЦР-5 (разработанный состав) и ЦР-6 (отраслевое решение), зафиксировано увеличение прочности на

растяжение цементно-эпоксидных систем за счет образования вторичного скелета.

Таблица 6 - Результаты испытаний составов ЦР -1, ЦР-5 и ЦР-6 на стенде-имитаторе виброускорений

Состав образца	Время стадии 3, с	Время стадии 4, с	Число ударов стадии 3, шт	Число ударов стадии 4, шт	Перегрузка на образец (G)
ЦР-1	33,17	4,74	1259,87	178,86	11,96
ЦР-5	585,73	56,20	22070,96	2116,12	11,79
ЦР-6	532,89	40,97	20039,14	1556,24	11,71

Таблица 7 - Результаты испытаний на стенде-имитаторе условий разбухания цементного камня

№ состава	Время при перегрузке 4-5 G, с	Результат опрессовки после воздействия 4-5 G	Время при перегрузке 11,5-12 G, с	Результат опрессовки после воздействия 11,5-12 G
ЦР-1	2020	падение 0 – герметично.	27	5 минут при 0,8 МПа, падение до 0,3 МПа – не герметично.
ЦР-5	2710	падение 0 – герметично.	624	падение 0 – герметично.
ЦР-6	2642	падение 0 – герметично.	499	падение 0 – герметично.

Введение в состав цементного раствора эпоксидной смолы в массовой концентрации от 4 до 13 % при В:Ц = 0,43÷0,47 позволяет повысить выносливость цементного камня более чем в 11 раз по сравнению со стандартным цементным камнем, а также снизить статический модуль Юнга и увеличить коэффициент Пуассона за счет образования вторичного скелета из эпоксидной смолы внутри порового пространства цементного камня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной научно-технической задачи повышения качества крепления нефтяных и газовых скважин путем использования состава тампонажного раствора с добавкой эластификатора, формирующего камень, способный сопротивляться многократным динамическим нагрузкам.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Выявлено, что использование эпоксидной смолы в качестве эластификатора в составе тампонажного раствора наиболее перспективно, прежде всего, за счет большей вариативности концентраций и меньшими рисками при проведении работ по цементированию обсадных колонн.

2. Определены негативные факторы, влияющие на качество крепи, среди которых наиболее значимым является динамическое воздействие бурильного инструмента через стенку обсадной колонны на цементный камень при бурении под следующую секцию, а также при проведении работ по вторичному вскрытию пласта.

3. Разработан алгоритм оценки упруго-прочностных характеристик цементного камня в условиях динамических нагрузок от действия бурильного инструмента с максимальными перегрузками до 12G в комплексе с определением динамических значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона, позволивший обосновать состав цементного раствора, удовлетворяющий условиям его применения.

4. На основе разработанного алгоритма предложена рецептура цементной системы с повышенными упруго-прочностными характеристиками - ЦР-5, характеризующаяся улучшенными упруго-прочностными свойствами, позволившая снизить модуль Юнга в 1,6 раза, увеличить коэффициент Пуассона в 1,9 раза, повысить выносливость к динамическим нагрузкам в 11 раз, снизить проницаемость и пористость в 20 раз за счет образования вторичного скелета из эпоксидной смолы внутри порового пространства цементного камня.

5. В качестве дальнейшего развития исследований по теме диссертации важно довести предлагаемые составы и разработанный алгоритм до стадии ОПР (опытно-промышленных работ), а также

внедрить дополнительные испытания, предлагаемые в алгоритме, в проектную документацию на строительство скважин.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях Перечня ВАК:

1. Блинов, П.А. Использование ультразвуковых методов исследований для оценки упругих свойств тампонажного камня / П.А. Блинов, **М.И. Садыков**, В.Г. Гореликов, А.П. Гаврилова, Вороник А.М. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2022. – № 12 (360). – С. 42-49. – DOI: 10.33285/0130-3872-2022-12(360)-42-49.

2. Блинов, П.А. Обоснование использования смол для улучшения упруго-прочностных свойств цементного камня и сравнительная оценка с существующими технологическими решениями / П.А. Блинов, М.В. Двойников, **М.И. Садыков**, А.М. Вороник, А.В. Морозова, Л.В. Ягудина // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2021. – № 9(345). – С. 31-36. – DOI: 10.33285/0130-3872-2021-9(345)-31-36.

3. Блинов, П.А. Разработка и исследование тампонажных составов с улучшенными упруго-прочностными свойствами для крепления нефтяных и газовых скважин / П.А. Блинов, **М.И. Садыков**, В.Г. Гореликов, В.В. Никишин // Записки Горного института. – 2024. – EDN OWJFHS.

Публикация в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Блинов, П.А. Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем / П.А. Блинов, **М.И. Садыков** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – № 334(1). – С. 97-105. – DOI: 10.18799/24131830/2023/1/3925.

Публикации в прочих изданиях:

5. Блинов, П.А. Оценка упруго-прочностных и технологических свойств цементно-эпоксидных систем при креплении скважин / П.А. Блинов, **М.И. Садыков**, А.А. Яковлева, А.В. Морозова, Е.В. Дьяченко, А.Н. Иващенко // Сборник материалов

II Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья». – Санкт-Петербург: Изд-во Бурение и нефть. – 2023. – S2 – С. 132-133.

6. **Садыков М.И.** Обоснование использования смолы для улучшения упруго-прочностных свойств цементного камня и сравнительная оценка с существующими технологическими решениями / М.И. Садыков, П.А. Блинов, А.М. Вороник // Сборник материалов X Международного молодежного научно-практического форума «Нефтяная столица». – Сургут: Изд-во АНО ЦМТР. – 2022. – С. 241-243.

7. **Садыков, М.И.** Обоснование улучшения упруго-прочностных свойств цементного камня за счет использования смол / М.И. Садыков, П.А. Блинов, А.М. Вороник // Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: Изд-во ДНТУ. – 2022. – С. 132–133.

8. **Садыков, М.И.** Оценка упруго-прочностных свойств цементно-эпоксидных систем / М.И. Садыков, П.А. Блинов // Сборник тезисов докладов I Международной научно-практической конференции «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья». – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургский горный университет. – 2022. – С. 22.

Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023660996. Программа по тестированию технологических свойств цементных растворов и расходу материалов в зависимости от необходимой плотности раствора: № 2023660185: заявл. 23.05.2023; опубл. 25.05.2023 / П.А. Блинов, **М.И. Садыков**, И.М. Лобачев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

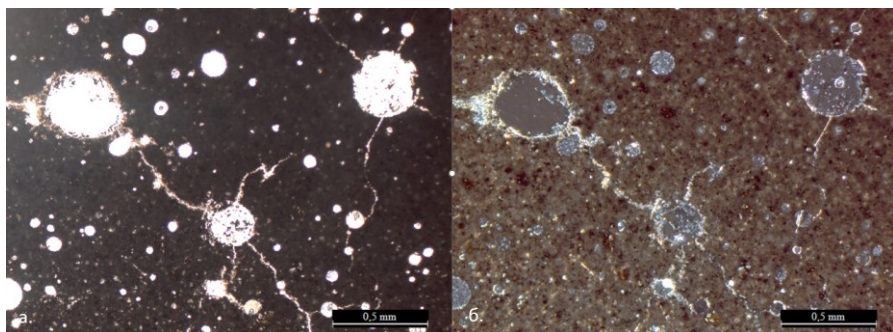


Рисунок 4 - Фотография шлифа цементного камня ЦР-3 (краевая часть):
а - с анализатором; б - без анализатора

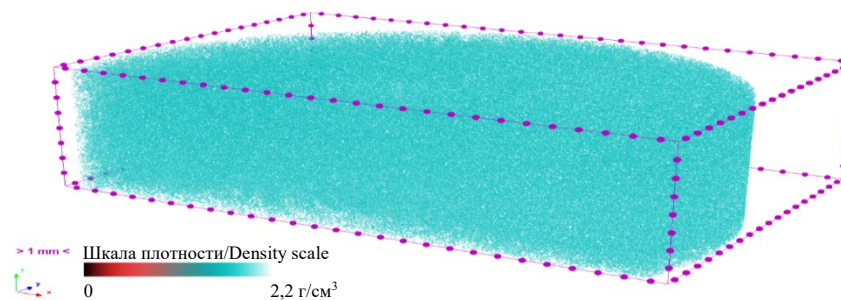


Рисунок 5 - Поровое пространство базового цементного камня ЦР-1

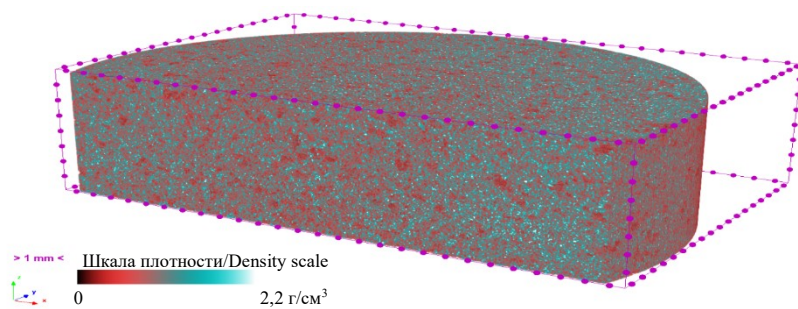


Рисунок 6 - Поровое пространство цементного камня ЦР-5



Рисунок 7 - Результаты определения статических
упруго-прочностных характеристик образца ЦР-5

Таблица 1 - Составы исследуемых тампонажных смесей

Компонент	ЦР-1	ЦР-1.3	ЦР-2	ЦР-3	ЦР-4	ЦР-5	ЦР-6	ЦР-7	ЦР-8
Цемент, %*	100								
В/Ц	0,47	0,47	0,47	0,44	0,43	0,47	0,44	0,47	0,42
Лигносульфонатный замедлитель, %*	0,2								
Регулятор водоотдачи, %*	0,25								
Пенегаситель, %*	0,2								
Смола, %*	4,11	–	4,11	7,92	11,9 0	4,11	–	3	14
Отвердитель %*	0,41	–	0,41	0,79	1,19	0,41	–	0,30	1,40
Латекс, %*	–	–	–	–	–	1	–	–	–
Эластомер, %*	–	–	–	–	–	–	5	–	–
Микроволокно, %*	–	0,9	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 2 – Динамические модуль Юнга и коэффициент Пуассона

Раствор	Динамический модуль Юнга, Гпа	Динамический коэффициент Пуассона
ЦР-1	18,43	0,15
ЦР-2	13,89	0,23
ЦР-3	11,31	0,27
ЦР-4	9,83	0,25
ЦР-5	9,52	0,28
ЦР-6	11,12	0,26

Таблица 3 – Результаты испытаний

Состав образца	Время стадии 3, с	Время стадии 4, с	Число ударов стадии 3, шт	Число ударов стадии 4, шт	Перегрузка на образец (G)
ЦР-1	33,17	4,74	1259	178	11,96
ЦР-1.3	401,30	46,20	15233	1756	12,05
ЦР-6	532,89	40,97	20039	1556	11,71