

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ИСМАГИЛОВА ЭЛЬВИРА РИМОВНА

**РАЗРАБОТКА «САМОЗАЛЕЧИВАЮЩИХСЯ» ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ
КРЕПЛЕНИЯ СКВАЖИН**

Специальность 2.8.2. – «Технология бурения и освоения скважин»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор

Фарит Акрамович Агзамов

Уфа - 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Анализ состояния вопроса, постановка цели и задач исследования.....	10
1.1 Область применения «самозалечивающихся» цементов.....	10
1.2 Известные способы герметизации водопроводящих каналов.....	20
1.3 Выводы к главе 1.....	27
Глава 2. Обоснование рабочей гипотезы.....	28
2.1 Концепция долговечного цементного камня.....	28
2.2 Концепция получения самовосстанавливающихся материалов.....	31
2.3 Обзор существующих технологий восстановления целостности цементного камня.....	36
2.3.1 Микрокапсулы для восстановления целостности цементного камня.....	36
2.3.2 Сплав памяти, восстанавливающий целостность цементного камня.....	37
2.3.3 Композиция для «самовосстановления» цементного камня.....	37
2.3.4 Технология «FUTUR» для восстановления целостности цементного камня.....	38
2.4 Выбор и обоснование принципа изоляции водопроводящего канала..	39
2.4.1 Требования к материалам для получения «самозалечивающихся» цементов.....	41
2.4.2 Анализ материалов для залечивания водопроводящих каналов цементного камня.....	44
2.5 Обоснование количества модифицирующей добавки.....	47
2.6 Выводы к главе 2.....	51
Глава 3. Методика проведения экспериментов и обработки полученных результатов.....	53
3.1 Методика рационального планирования экспериментов.....	54

3.2 Исследование свойств модифицирующей добавки.....	56
3.2.1 Методика исследования водопоглощающих свойств ядра добавки.....	56
3.2.2 Методика получения и исследования свойств водорастворимости оболочки добавки.....	57
3.2.2.1 Получение водорастворимого оболочного комплекса.....	57
3.2.2.2 Исследование криоструктурирования водорастворимого оболочного комплекса.....	58
3.2.2.3 Исследование скорости растворения оболочного комплекса.....	58
3.2.3 Методика нанесения оболочки на ядро добавки.....	59
3.2.4 Методика исследования прочностных свойств добавки.....	60
3.2.5 Определение толщины оболочного слоя методом растровой микроскопии.....	61
3.3 Исследование свойств цементного камня.....	62
3.3.1 Определение характера распределения модифицирующей добавки в цементном камне.....	63
3.3.2 Определение прочности и деформации цементного камня при его разрушении.....	64
3.3.3 Определение проницаемости цементного камня.....	64
3.3 Выводы к главе 3.....	65
Глава 4. Исследование и разработка «самозалечивающегося» цемента.....	66
4.1 Исследование свойств модифицирующей добавки.....	66
4.1.1 Исследование водонабухающего компонента добавки.....	67
4.1.2 Исследование водорастворимого компонента добавки.....	73
4.2 Исследование цементного камня, модифицированного добавкой.....	78
4.3 Обоснование состава «самозалечивающегося» цемента.....	83

4.4 Контрольные испытания «самозалечивающегося» цемента.....	85
4.5 Проведение натурального эксперимента на стендовом оборудовании....	86
4.6 Модельный промысловый эксперимент.....	99
4.7 Перспективы применения «самозалечивающегося» цемента.....	102
4.8 Экологическая безопасность и экономическая эффективность.....	103
4.9 Выводы к главе 4.....	106
Основные выводы	108
Список литературы.....	110
Приложения.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Качественное крепление скважины обусловлено созданием герметично изолированного заколонного пространства, при этом одной из основных функций цементной крепи скважины является барьерная защита обсадной колонны от воздействий агрессивной среды и предупреждение миграции пластовых флюидов. Однако под воздействием регулярных технологических нагрузок, при проведении работ, отличающихся выраженными касательными напряжениями, превосходящими предел механической прочности камня на участке крепи скважины, происходит потеря целостности цементной крепи, приводящая к обводнению скважины из-за заколонной циркуляции воды.

До настоящего времени единственным способом восстановления герметичности цементного кольца было применение различных технологий ограничения водопритокков, включающих остановку скважины и закачку под давлением герметизирующего состава в образовавшиеся каналы. При этом известны более 50 композиций, применяющиеся для изоляции и ограничения притока вод, которые часто оказываются недостаточно эффективными.

Исходя из вышеизложенного, актуальным является совершенствование традиционной технологии цементирования скважин, заключающееся в наделении тампонажной системы способностью к автономному восстановлению структуры в случае разгерметизации крепи скважины, которое исключает необходимость в проведении дорогостоящих ремонтно-изоляционных работ. Наиболее эффективным методом решения этих проблем является разработка и применение «самозалечивающихся» цементов.

Степень разработанности темы исследования

Существенный вклад в развитие научных основ в вопросах повышения качества крепления скважин и усовершенствования процессов их цементирования внесли такие видные отечественные ученые, как Ф.А. Агзамов, Р.Г. Ахмадеев, М.О. Ашрафьян, А.И. Булатов, Г.Р. Вагнер, Р.А.Гасумов и др. Благодаря их трудам разработаны и широко используются

эффективные тампонажные материалы для первичного и ремонтного цементировании. Несмотря на значительный объем исследований в данной области и достигнутые результаты, вопросы пролонгированного восстановления герметичности крепи скважин, исключая вмешательство ремонтной техники и человеческого фактора остались еще не исследованными.

Целью данной работы является повышение герметичности крепи скважин путем восстановления целостности цементного кольца, полученного из специального тампонажного материала, обладающего «самозалечивающими» свойствами.

Основные задачи исследований:

1. Обоснование требований к материалам для получения модифицирующей добавки в «самозалечивающиеся» цементы.
2. Обоснование компонентов и разработка состава активного водонабухающего агента.
3. Обоснование компонентов и разработка водорастворимого оболочного комплекса для регулирования скорости гидратации добавки.
4. Обоснование механизма изоляции водопроводящих каналов и способа активации модифицирующих добавок.
5. Разработка и исследование специального тампонажного цемента с эффектом «самозалечивания» у получаемого камня.
6. Разработка технологии получения и промысловая апробация «самозалечивающихся» цементов.

Научная новизна результатов

1. Обоснован принцип работы «самозалечивающихся» цементов, заключающийся в запуске водопогложительного механизма модифицирующих добавок с предельной концентрацией в 1% и максимальным размером частиц до 40 мкм, увеличивающихся в объеме до 500 раз после контакта с водой и блокирующих водопроводящие каналы размерами до 150 мкм.

2. Обоснован механизм активации «самозалечивающихся» цементов, запускающийся при длительном контакте добавок с посторонней водой, и разработан метод регулирования скорости гидратации модифицирующей добавки за счет многослойных оболочек, при толщине 30 мкм гарантирующих инертность добавки к жидкой фазе на этапе приготовления, закачки и продавки цементного раствора, и обеспечивающих отсутствие негативного влияния добавки на технологические свойства тампонажного раствора и цементного камня.

3. Обоснованы объекты для эффективного применения цемента «самозалечивающегося» с целью селективного крепления участков крепи, имеющих наибольшую вероятность образования сквозных открытых трещин.

Теоретическая значимость работы заключается в получении закономерностей и зависимостей, позволяющих решить основные задачи исследований.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в разработке «самозалечивающихся» тампонажных материалов для восстановления герметичности крепи скважины в процессе ее эксплуатации. Разработанный «самозалечивающийся» цемент защищен патентом РФ №2760860 «Тампонажный материал», прошел стендовые испытания и использован в скважинных условиях.

Методология и методы исследования

Решение поставленных задач осуществлялось при помощи планирования экспериментов и последующих экспериментальных исследований.

Исследования фильтрационных и прочностных характеристик модифицированного цементного камня производились согласно ГОСТ и стандартам ISO API. Гранулометрический состав компонентов определялся стандартным методом ситового анализа.

Оценка количественных характеристик и определение характера распределения модифицирующей добавки (МД) в общем объеме цементного камня производились при помощи сканирующего оборудования неразрушающего контроля CT Scanner.

Оценка деформаций и напряжения в модифицированном цементном камне производилась при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в прикладной программе ANSYS.

Нанесение оболочного слоя на ядро МД производилось при помощи технологии структурной грануляции на аппарате Lenosel, а толщина оболочного слоя определялась методом растровой электронной микроскопии при помощи электронного микроскопа JEOL JSM – 6610LV.

Регулирование водорастворимости оболочного комплекса производилось при помощи разработанного способа исследования скорости растворения твердых веществ, а исследование кинетики набухания добавок проводилась на приборе ПКН конструкции Жигача-Ярова.

Изучение влияния модифицирующей добавки на фильтрационные свойства цементного раствора и цементного камня производилось при помощи разработанной установки (патент №154661).

Положения, выносимые на защиту

1. Принцип «самозалечивания» цементного камня, основанный на активации водопоглотительного механизма интегрируемых в цемент добавок.
2. Состав «самозалечивающегося» цемента.
3. Результаты исследования влияния модифицирующей добавки на технологические свойства цементного раствора и камня.
4. Технология получения и применения «самозалечивающихся» цементов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы подтверждена данными экспериментальных исследований, полученных с использованием поверенных средств измерения на аттестованном лабораторном оборудовании по

общепринятым методикам, утвержденным в соответствующем порядке, а также установлена в результате проведения натурного исследования с применением стендового оборудования и модельного промышленного эксперимента.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии» (г. Алматы, 2014); Международной научно-технической конференции «Best student research award / Лучшая студенческая научная работа» (г. Манчестер, Великобритания, 2015); Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде (г. Уфа, 2016); Молодёжном грантовом конкурсе "УМНИК" (г. Уфа, 2016); на технической сессии «НИПИморнефтегаз» (СП «Вьетсовпетро», г. Вунгтау, Вьетнам, 2017); II-ой Международной молодежной конференции «TATARSTAN UpExPro 2018» (г. Казань, 2018); 72-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018» в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина (г. Москва, 2018); Всероссийской научно-технической конференции «75 лет нефтяному образованию в Республике Башкортостан» (г. Уфа, 2018); Международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле – 2019» (г. Октябрьский, 2019).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 в журналах, индексируемых в международной базе данных WoS, 2 в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, имеется 8 материалов и тезисов конференций, получено 2 патента.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов и списка литературы. Общий объем работы составляет 136 страниц и включает список литературы из 102 наименований, 5 приложений, 39 рисунков и 5 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Область применения «самозалечивающихся» цементов

Качественное крепление скважины обусловлено созданием герметично изолированного заколонного пространства путем цементирования составных элементов конструкции скважины. В связи с техническими задачами, возлагаемыми на крепь скважины, последняя должна надежно функционировать на протяжении всего срока службы подземного сооружения.

На сегодня достижение надежной и долговечной крепи нефтегазовой скважины сродни сверхзадачи, так как процесс крепления скважины - многофакторный, и включает в себя не только спуск обсадной колонны, но и подбор оптимального варианта ее центрирования, надлежащего вытеснения бурового раствора цементным, а также проектирование рецептуры цементного раствора с учетом всех особенностей, влияющих на природу фазовых превращений цементной суспензии.

Являясь заключительным и одним из важнейших этапов при строительстве скважин, цементирование в силу невозвратности процесса отверждения цементного раствора является однократной и неповторной процедурой. Исправление технологических ошибок практически невозможно, поэтому проведение данного мероприятия сопряжено с высокой ответственностью и точным соблюдением технологического процесса.

История эксплуатации разновозрастных скважин показывает, что цементный камень является наиболее уязвимым звеном и способен легко разрушаться под действием динамических нагрузок и давлений, действующих изнутри обсадной колонны, от воздействия агрессивных пластовых флюидов, действующих со стороны горных пород.

Нарушение герметичности цементного кольца может произойти из-за несоответствия в период ОЗЦ рецептуры тампонажного раствора, оснастки обсадных колонн, технологии цементирования горно-геологическим

условиям, а также в результате термических воздействий на колонну при освоении и эксплуатации скважин [1, 2]. Со свойствами тампонажных материалов связана группа физико-химических факторов, которая включает процессы водоотдачи, седиментационного расслоения и «зависания» растворов, трещинообразования, усадки, коррозионного поражения тампонажного камня и т.д.

Дефектообразование, происходящее в результате процессов в период загустевания, схватывания раствора и набора прочности формирующегося цементного камня, провоцирует образование полости, либо трещины вследствие возникновения разницы напряжений внутри цемента, вызванной разницей давлений. Известно [1,3], что давление в поровом пространстве цементного камня должно компенсировать горные напряжения. Давление внутри поры цементного камня обусловлено специально подобранной композицией цемента, а именно ее плотностью и вязкостью. Когда поровое давление компенсирует каждую из основных составляющих горного напряжения, то цементное кольцо остается герметичным, если же в системе имеет место перепад давлений, то происходит стремительное каналообразование [3]. На рисунке 1.1 представлена система «обсадная колонна – цементный камень», нагруженная внутренним давлением p_a , внешние воздействия отсутствуют. Осевое напряжение $\sigma_z = 0$ [3].

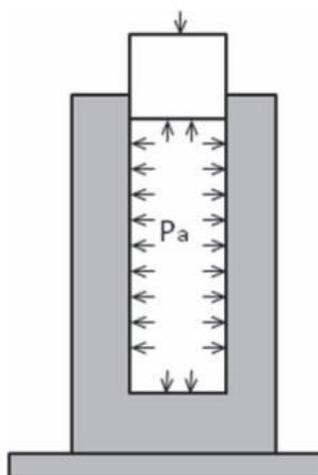


Рис. 1.1 - Схема нагружения системы «обсадная колонна – цементный камень» внутренним давлением [3]

Микроазоры на контакте цементный камень - обсадная колонна, могут также образоваться в результате механического воздействия на колонну при бурении из-под башмака, опрессовках, прострелочно-взрывных работах, гидроразрыве пласта и других технологических операциях. Перфорация, гидравлический разрыв пласта, опрессовка и механическое воздействие в сочетании с агрессивной коррозионной средой наиболее сильно провоцируют разрушение цементного камня под действием больших напряжений сдвига, возникающих при превышении динамических нагрузок [4].

Следствием действия перечисленных факторов становится [5]:

- поражение цементного камня под действием агрессивных компонентов пластового флюида;

- нарушение герметичности контактных зон цементного камня в результате твердения раствора в замкнутом объеме межколонного пространства;

- нарушение сплошности цементного камня в результате каналообразования в нем на ранних стадиях твердения цементоводной суспензии;

- ухудшение изоляционных свойств крепи в результате термодеструктивных процессов в цементном камне.

При этом статистика показывает, что бездобавочная рецептура тампонажного цемента в большинстве случаев не оправдывает ожиданий по сохранению целостности цементного кольца. Так, напряжения, возникающие в цементном камне во время вторичного вскрытия пласта, превышают предел прочности цементного камня на растяжение [3]. Тогда, как деформационные изменения, образовавшиеся в результате усталостного разрушения цементного камня, в сочетании с постоянно контактирующими с ним кислыми компонентами пластовой среды приводят к значительному снижению прочностных характеристик цементного камня [4].

Широкий диапазон температур, которому цементная система подвержена во время приготовления, закачки и ОЗЦ также непосредственно

влияет на качество получаемого цементного камня. Бездобавочная рецептура цементного раствора, в том числе уязвима в отношении разнотемпературного режима работы цемента в скважине в статических условиях и при закачивании раствора в скважину. Цемент теряет свои прочностные характеристики, подвергаясь разнице статической температуры и циркуляционной забойной температуры, которая ниже статической из-за постоянной циркуляции жидкостей в скважине и других взаимообменных процессов между пластом и жидкостями [5].

Устранение осложнений при проведении тампонажных работ может быть достигнуто при помощи ремонтно-изоляционных работ, а также при помощи комплекса дополнительных операций, разработанных для ликвидации осложнений при цементировании [6]. Использование современных технологий ограничения водопритоков может привести к увеличению добычи нефти, но все они требуют значительных затрат на проведение водоизоляционных работ, и часто носят временный характер [7].

Любое нарушение сплошности цементного кольца в процессе эксплуатации скважины приводит к возникновению заколонных перетоков или заколонной циркуляции (ЗКЦ) [8]. Обводнение скважин вследствие заколонной циркуляции (ЗКЦ) воды является одним из наиболее неблагоприятных последствий, приводящим к большим экономическим потерям, связанным с подъемом на поверхность, транспортированием, подготовкой и обратной закачкой в пласт больших объемов воды, а порой и с необходимостью ускоренного ввода в разработку новых месторождений для компенсации недоборов нефти. При этом осложнение разработки месторождений возникновением разножидкостных перетоков приводит к преждевременному обводнению продукции в добывающих и нерегулируемой закачке воды в нагнетательных скважинах [9]. Таким образом, потеря герметичности любого из элементов крепи скважины, приводит к тяжелым, а иногда и катастрофическим последствиям. Ошибочно принятое решение на

одном из этапов крепления может привести к технической непригодности и невозможности дальнейшей эксплуатации всего подземного сооружения.

Особую значимость эти вопросы приобрели в последние годы, когда пришло понимание важности экологического аспекта при строительстве и эксплуатации скважин. При этом большее внимание стало уделяться экологичности применяемых материалов, их влиянию на окружающую среду и здоровье человека.

Современный этап развития нефтедобычи как по всему миру, так и в России характеризуется общей тенденцией устаревания скважин, при этом происходит активное перераспределение скважин из действующих (добывающих или нагнетательных) в разряд объектов, находящихся в капитальном ремонте или ожидающих капитального ремонта. При этом физический износ технических сооружений усугубляется с увеличением количества операций, проводимых на таких скважинах.

В связи с этим особую важность приобретают вопросы поиска, разработки и внедрения технологий, позволяющих сохранить и восстановить целостность цементного камня и его прочностные характеристики.

Говоря о нефтегазодобывающих предприятиях регионов России, необходимо отметить, что проблема потери герметичности цементной крепи проявляется в виде заколонной циркуляции воды (ЗКЦ). Таким образом, наиболее активные в области добычи углеводородного сырья регионы, за 5 лет эксплуатации объектов добычи продемонстрировали следующий прирост объема работ на рынке ремонтно-изоляционных услуг (см. таб. 1.1).

Таблица 1.1 - Объем работ на рынке ремонтно-изоляционных услуг на месторождениях России [10]

Регион	Объем рынка РИР, млн. долл. США	
	2010 г.	2015 г.
Период		
Западная Сибирь	75,3	106,1
Волго-Урал	16,5	23,2

Тимано-Печорская провинция	5,8	11
Восточная Сибирь	3,8	12,6
Шельф России	2,3	5,7
Итого	103,7	158,6

Из таблицы 1.1 видно, что объем работ на рынке ремонтно-изоляционных услуг на месторождениях России к 2015 году составил 158,6 млн. долл. США, что превысило показатели 2010 года на 55%. Таким образом можно констатировать ежегодный стабильный прирост величины объема изоляционных работ. Такая тенденция объясняется не только износом внутрискважинного оборудования, но и в большей степени физическим износом объектов эксплуатации, так как большинство из них находятся на заключительном этапе разработки.

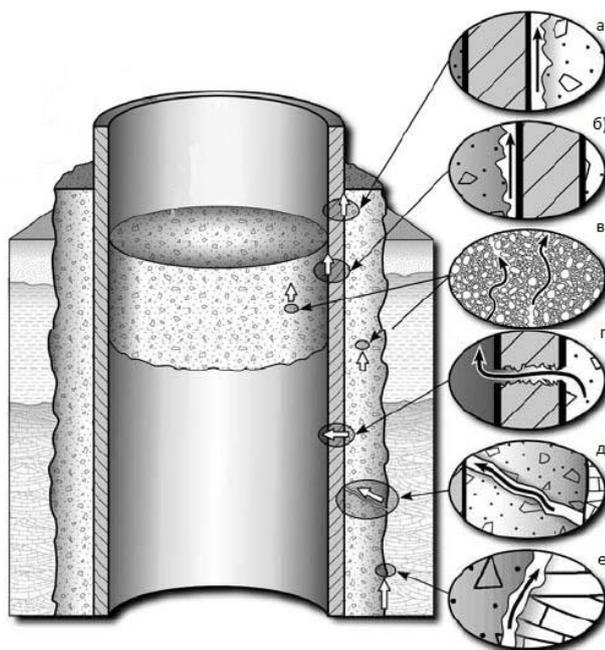
Сравнительный анализ промысловых данных показывает, что около 30% ремонтно-изоляционных работ относятся к водоизоляционным работам, а методами высокоточной термометрии, импульсным нейтрон-нейтронным каротажем, а также закачкой меченого вещества выявлено, что в 26% аварийных случаев обводнение произошло в результате заколонной циркуляции воды. Таким образом, умозаключено, что на борьбу с ЗКЦ на российских месторождениях в 2015 год потрачено 41,2 млн. долл. США, в то время, как стоимость ремонтных работ на американских месторождениях, обусловленных такими же повреждениями составила около 80 млн. долл. США [11].

Возникновение заколонной циркуляции может быть обусловлено не только низким качеством строительства скважин, но и созданием высоких перепадов давления на продуктивные пласты при эксплуатации скважин, дифференциацией текущих пластовых давлений между нефтяными и водонасыщенными пластами. Причинами могут служить и такие технические аспекты эксплуатации, как интенсивность и особенности проведения

технологических мероприятий, механическое взаимодействие элементов скважинного оборудования.

Проблема ЗКЦ может встречаться в любой период эксплуатации скважины, но более заметна после вторичного вскрытия или стимуляции скважины. Поступление посторонней воды является индикатором того, что канал существует. Длительная эксплуатация такого объекта может привести к преждевременному обводнению добываемой продукции скважины.

При этом проводящий канал ограничивается зонами контактов «цемент – обсадная колонна» и «цемент-пласт». Пластовая вода, которая нашла путь через уязвимые зоны цементного камня, остается циркулировать в нем, образуя разные виды заколонных перетоков (см. рис. 1.2).



а) м/у цементом и обсадной колонной; б) м/у обсадной колонной и цементным стаканом; в) сквозь цем. стакан; г) ч/з негерметичность обсадной колонны; д) ч/з трещины цементного кольца; е) м/у цементной крепью и пластом

Рис. 1.2 - Виды проявления заколонной циркуляции [12]

Справедливо упомянуть, что существуют и другие причины, приводящие к обводнению скважинной продукции (см. рис. 1.3).

В ряде нефтегазоносных районов осложнения, связанные с негерметичностью обсадных колонн и межпластовыми перетоками, составляют до 20% от общего числа осложнений. При этом на ремонтно-

изоляционные работы в эксплуатационном бурении тратится 60%, а в разведочном - около 80% от общих затрат на крепление скважин [13].



Рис. 1.3 – Основные причины обводнения скважинной продукции [9]

На сегодняшний день существует множество современных водоизоляционных материалов и технологий, направленных на ограничение водопритоков, благодаря которым возможно обеспечить качественное дополнительное фильтрационное сопротивление в водонасыщенной части пласта и уменьшить водопритоки. Однако все известные водоизоляционные технологии имеют низкую продолжительность технологического эффекта, в результате чего возникает необходимость в очередных остановках скважин, проведении повторных операций ремонтно-изоляционных работ с привлечением специалистов и технических средств, а также применении дорогостоящих водоизоляционных реагентов, что является фактическим основанием и предпосылкой к совершенствованию традиционной технологии цементирования скважин.

На практике применяют более 50 реагентов для изоляции и ограничения притока вод к скважинам [14, 15]:

- 1) смеси на основе минеральных вяжущих веществ (тампонажный портландцемент, шлак, гипс и их композиции);
- 2) тампонирующие смеси на базе органических вяжущих материалов, полимерные тампонажные материалы (ПТМ);

3) тампонажные растворы, полученные на базе минеральных вяжущих тампонажных материалов с различными облагораживающими добавками (ТЭГ, ТС-10, аэросил и др.), т.е. цементно-полимерные растворы (ЦПР);

4) многокомпонентные тампонажные смеси;

5) сжимающиеся тампонажные материалы и др.

Для воздействия на участки пласта с различными насыщающими жидкостями используются два основных метода изоляции притока воды: неселективный и селективный [10]. Наиболее предпочтительным является селективный метод изоляции притока воды.

При селективном методе изоляции используются специальные смеси, растворимые в углеводородах и нерастворимые в пластовой воде. Так, для ограничения притока воды по проницаемым пропласткам широко применяются аэрированные жидкости в сочетании с ПАВ, кислые гидрогели на основе силикатов щелочных металлов, аэрированные тампонажные составы с добавками натриевых и калийных солей нафтеновых кислот, композиции на кремнийорганической основе, биополимеры. Продолжительность эффекта после РИР с применением вышеуказанных материалов в скважинах на месторождениях в различных регионах России составила: от 10 месяцев (Самотлорское нефтяное месторождение), до 1 года (Анастасиевско-Троицкое нефтяное месторождение), 1-3 года (Ямбургское НГКМ), 2-3 года (Шелкановское месторождение) и до 4-х лет (Уренгойское ГНКМ) [10].

Очевидно, что дальнейшее совершенствование технологии цементирования позволит повысить качество разобщения продуктивных горизонтов и, следовательно, снизить влияние всевозможных факторов на обводнение скважин, таким образом, сократив количество ремонтно-изоляционных работ.

До настоящего времени единственным способом восстановления герметичности цементного кольца было применение различных технологий ограничения водопритокков, включающих остановку скважины и закачку под давлением герметизирующего состава в образовавшиеся каналы. Однако в

абсолютном большинстве случаев данный способ является низкоэффективным. В мировой практике для крепления скважин, в которых отмечаются межколонные проявления сразу после заканчивания, а также на объектах, эксплуатируемых в условиях постоянной миграции углеводородов используют самовосстанавливающиеся тампонажные цементы, которые показывают наилучший результат по сравнению с технологиями ограничения водопритоков. Примером такой тампонажной системы является самовосстанавливающийся цемент «FUTUR» фирмы Шлюмберже, который активируется при появлении перетока углеводорода (межколонные проявления газа, грифоны, перетоки), образуя отложения блокирующие каналы в поврежденном цементном кольце. Опыт применения «FUTUR» в США, Канаде, Германии, Италии, Вьетнаме и т.д. показал эффективность и востребованность альтернативного подхода в цементировании скважин [16]. Однако недостатком данного цемента является ограниченность в условиях применения, так как объектом ликвидации по совместительству триггерным механизмом является исключительно углеводород, «FUTUR» не проявляет способностей к самовосстановлению в условиях водопроявлений, при этом является очень дорогим средством профилактики разгерметизации заколонного пространства.

Таким образом, в условиях естественного технического износа действующего фонда скважин, повсеместно увеличивающегося количества ремонтно-изоляционных работ, необходимо отметить целесообразность в применении «самовосстанавливающихся» тампонажных цементов. Несмотря на уже имеющиеся успехи зарубежных коллег во внедрении «самовосстанавливающихся» тампонажных цементов, подобная цементная система является новой тенденцией для нефтяной промышленности России и нефтегазовых стран мира, поэтому требует более детального изучения механизмов активации и восстановления. В том числе требуется задание системе специальных свойств, обеспечивающих ее надежное функционирование в сложных пластовых условиях.

1.2 Известные способы герметизации водопроводящих каналов

Наиболее распространенными методами восстановления герметичности крепи скважины являются различные варианты тампонирования под давлением с применением чистого цемента или различных полимер-тампонажных составов. Выбор вида тампонирования зависит от характера нарушения и его приемистости.

Перед закачкой тампонажных составов интервал нарушения предварительно отключают установкой песчаной пробки, цементного моста или взрыв-пакера. В качестве ремонтно-изоляционных в основном применяют следующие технологии: гидрофобизирующие, осадкообразующие, гелеобразующие, комплексного действия. Наиболее популярными являются осадкообразующие и технологии комплексного действия [17, 18].

Основными осадкообразующими технологиями являются щелочно-полимерные и силикатно-щелочные композиции, основанные на образовании осадка в пластовых условиях. Осадок образуется за счет взаимодействия щелочных реагентов с солями поливалентных катионов, содержащихся в пластовой воде. Однако недостатками являются: ограничения применения по температуре и по водородному показателю (рН) среды [19, 20].

Типичными представителями гелеобразующих композиций являются водорастворимые неорганические соединения и гелеобразующие композиции на основе полимеров, способные при контакте с пластовой водой образовывать гели. Композиции на основе неорганических реагентов имеют низкую вязкость (близкую к вязкости воды), высокую проникающую способность, что выгодно отличает их от гелеобразующих композиций на основе полимеров. Недостатком является ограничение применения по типу коллекторов – не всегда гарантирована устойчивая адгезия водонепроницаемых экранов к гидрофобной пористой среде; цементные растворы, содержащие CaCO_3 в своем составе, родственны карбонатному коллектору, однако из-за низкой дисперсности частиц имеют ограниченную проникающую способность [21, 22, 23].

Ремонтно-изоляционные технологии комплексного действия, основанные на последовательном использовании потокоотклоняющих технологий и нефтewытесняющих составов, являются наиболее перспективным направлением развития ремонтных работ [24].

Технологии комплексного действия включают способы восстановления герметичности обсадных колонн использованием металлических продольно-гофрированных труб (коротких металлических пластырей) либо установкой профильных перекрывателей (изоляция интервала длиной до 150 м) в сочетании с тампонированием затрубного участка интервала нарушения. Так же эффективен спуск и цементирование дополнительной обсадной колонны, однако высокая стоимость работ, значительная потеря внутреннего диаметра скважины и последующие трудности при дальнейшей эксплуатации и ремонте накладывают серьезные ограничения для его применения. Возможным направлением при цементировании дополнительных колонн, показавшим хорошие результаты, может быть применение безмуфтовых труб [25].

Гидрофобизирующие технологии применяются как для среднеобводненных, так и для высокообводненных скважин [26].

Физико-химическая сущность гидрофобизации заключается в принудительном изменении фазовой проницаемости поверхности продуктивного коллектора путем закачивания в ПЗП под давлением мелкодисперсного гидрофобного порошка в углеводородном растворителе или инвертной эмульсии, дисперсионной средой которой является углеводородный растворитель (безводная нефть), а дисперсной фазой - кислота или кислотообразующая соль [27].

Для ограничения водопритоков (ОВП) в высокообводненных скважинах гидрофобизирующие составы в виде эмульсионных композиций закачиваются перед изолирующими составами, оттесняя воду от ствола скважины, гидрофобизируя поверхность проводящих каналов, обеспечивают защитный экран, препятствующий обратному движению воды к скважине за счет образования высоковязкой обратной эмульсии. При контакте с нефтью

эмульсия резко снижает свою вязкость и вымывается из нефтепроводящего канала [28].

Перспективным является проведение работ с использованием тампонажных растворов на углеводородной основе (ТРУО) [29, 30, 31]. В настоящее время на рынке представлены две группы ТРУО - безводные и эмульсионные, каждая из которых характеризуется своими особенностями.

Безводный тампонажный раствор и углеводородная жидкость способствуют образованию высокопрочного и малопроницаемого цементного камня с высокой степенью адгезии к породе. Безводный тампонажный раствор на углеводородной основе (БТРУО) представляет собой суспензию цемента (ЦС БТРУО - 48-80 %) с композицией ПАВ (ПАВ БТРУО - 0,2-0,5%) в специальной углеводородной жидкости (ДС БТРУО - 19,8-41,5 %). После попадания в водосодержащую среду происходит замещение углеводородной жидкости на воду, БТРУО превращается в густую пасту, а затем в высокопрочный и малопроницаемый цементный камень. Без контакта с водой раствор не густеет, не расслаивается и сохраняет свои свойства более 10 часов. ДС БТРУО может быть заменен на нефть [30].

Применение тяжелых и битуминозных нефтей является новым направлением в ремонтно-изоляционных работах. Эти нефти по их физико-химическим показателям перспективно использовать в технологии ограничения водопритока в карбонатных коллекторах [32, 33]. Разработанная технология основана на закачке в изолируемые пласты суспензии тампонажного портландцемента в предварительно разогретой смеси высоковязких нефтей. В нефтенасыщенных интервалах суспензия разбавляется нефтью и вымывается из коллектора, что свидетельствует о селективности технологии. Изоляционный экран в начальный период формирования может выдержать существующий перепад давления за счет многократного увеличения вязкости высоковязкой нефти при ее остывании до температуры пласта [21].

Известен способ ограничения водопритока с использованием водонабухающих полимеров (ВНП) [34]. Однако, использование большинства разновидностей водонабухающего полимера неэффективно, так как они ограниченно набухают в пластовой воде. Их нестабильная динамика набухания приводит к сокращению продолжительности эффекта. Используемые в настоящее время марки водонабухающих полимеров (АК-639 марок В415 и В615) практически не набухают в высокоминерализованной пластовой воде.

Эластомеры на основе водонабухающей резиновой и уретановой крошек также плохо набухают в пластовой воде, более того, такая продукция имеет очень высокую стоимость.

В работе [35] приведены результаты применения водонабухающих пакеров для изоляции трещиноватых участков горизонтальных стволов скважин. Водонабухающий пакер изготавливался из резинопolyмерного водонабухающего эластомера, устойчивого к кислому составу пластовой среды.

Интересна технология, концепция которой заключается в использовании армированных полимерных систем на основе водорастворимого полиакриламида ДР9-8177 [36]. Суть разработки - в модификации структурообразующих композиций путем добавления армирующих добавок, используемых для армирования цементных продуктов [37]. Рецептура состава и технология применения разработана для высокопроницаемых терригенных пластов и карбонатных коллекторов трещинного и трещинно-порового типа с целью увеличения нефтеизвлечения и ограничения водопритока в добывающие скважины. Опытно-промышленные работы на добывающих скважинах Татарстана показали значительное снижение обводненности добываемой продукции скважины и рост дебита по нефти.

Одним из методов ограничения притока воды различной природы в добывающие скважины является технология закачки вязкопластичных

силикатных гелей, гелеобразующих силикатных составов на основе жидкого стекла (щелочные силикатные гели) и кристаллического метасиликата натрия (кислые силикатные гели) и полимерных композиций [21].

Силикатный гель образуется со временем при повышенной температуре из маловязких растворов и представляет собой структурированную систему, иногда дополнительно упрочненную полимером (ПАА, гипан). Получаемый гель выдерживает значительные градиенты давления. Силикатные гели стабильны во времени при повышенной минерализации и температуре. Преимуществом всех силикатных гелей является возможность разрушаемости в скважинных и пластовых условиях растворами щелочей. Наиболее эффективно применение силикатных составов при изоляции заколонной циркуляции и изоляции подошвенной воды [38].

В области разработки новых технологических схем и приемов ВИР проведены испытания технологий селективной изоляции водопритока с использованием водоизоляционных систем (ВИС) на основе химических реагентов АКОР-БН102, ГПАН и ОВП-1 и закачки ВИС в пульсационном режиме, которые показали высокую эффективность на месторождениях Белоруссии [39].

Технология ОВП с подобными ВИС включает последовательную порционную закачку в пласт растворов осадкообразователя и осадителя (сшивателя), разделенных буферной жидкостью. Частным случаем является реакция ВИС с пластовой водой. При этом предполагается, что в пласте происходит их перемешивание с образованием твердого осадка [40].

Известен положительный опыт применения кремнийорганических тампонажных материалов АКОР и составов на их основе на месторождениях Российской Федерации, Республики Беларусь и Республики Казахстан [41].

Для отключения обводненных интервалов пласта и отдельных пластов Республика Башкортостан практикует применение тампонажных составов, представляющих собой смеси химических реагентов, образующих изолирующий материал в условиях призабойной зоны пласта [42].

С целью отслеживания причины и источника возникновения водопритока был проведен анализ промысловых данных по скважинам АНК «Башнефть». Показатели через 6 месяцев после ввода скважины в эксплуатацию следующие: у 10% скважин технологический брак при креплении; 5-6% скважин с прорывом вод при освоении. Основной причиной обводнения явилась заколонная циркуляция (ЗКЦ) вследствие нарушения контактных зон цементного камня. Выяснилось, что к 6 месяцам эксплуатации уже 30% скважин эксплуатировались с обводненностью 20-60%. Анализ проведения РИР показал, что из общего объема изоляционных работ, 76-80% приходится на изоляцию и ограничение водопритоков [43].

В качестве основы тампонажных составов используются: синтетические смолы «Резойл К-1», «Резойл Ф-1»; растворы маточные МР-У, МР-Х; латекс СКМС-ЗОАРК; гидрофобный мелкодисперсный порошок СМ, смола КФЖ, составы ОГР, Ремонт-1, Ремонт-12, Аккор-Б, Пластик КС [44].

Вышеуказанные технологии применяются в скважинах с терригенными и карбонатными пластами, с обводненностью 40–98% водой любой минерализации, с приемистостью объекта изоляции 10,0-20,0 м³/(сут·МПа).

При изоляции негерметичных резьбовых соединений, а также для заполнения микротрещин в цементном кольце широкое распространение получило использование композиций на основе водных растворов фенолформальдегидных смол типа ТС-10, ТСД-9, где в качестве отвердителя используют формальдегид, параформ или уротропин. Недостатками водных растворов фенолформальдегидных смол являются их высокая стоимость, токсичность и чувствительность к колебаниям температуры [45].

Имеются неплохие результаты по ограничению водопритоков в добывающие скважины путем закачки композиции «сильного геля» на основе ПАА и сшивателя, технология разработана в ООО «РН-УфаНИПИнефть» [21].

Следует отметить, что использование современных технологий ограничения водопритока может продлить срок службы скважины, сократить добычу попутно-добываемой воды, однако проведение водоизоляционных

работ требует значительных затрат, при этом эффект от таких работ зачастую краткосрочный.

За основной критерий изоляционного потенциала в сравнительной характеристике принимаются показатель ограничения попутно добываемой воды (ПДВ) и продолжительность технологического эффекта. В итоге об улучшении работы нефтенасыщенной части пласта судят по качеству создания дополнительного фильтрационного сопротивления в водонасыщенной части пласта и уменьшения водопритока [7].

На основе статистической обработки данных технологий ВИР [7], применяемых за 2005-2009 годы для изоляции обводненных интервалов пласта и ликвидации ЗКЦ в 71 скважине, была построена диаграмма технологической эффективности наиболее распространенных изоляционных материалов для проведения РИР на месторождениях Башкирии (см. рис. 1.4).

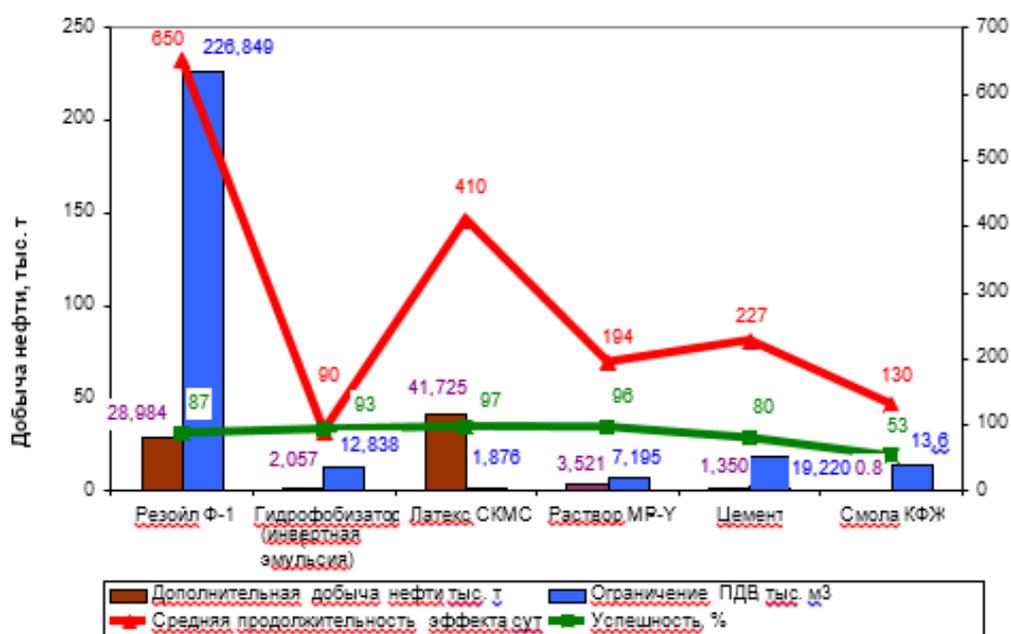


Рис. 1.4 – Эффективность проведения РИР с применением технологий ликвидации ЗКЦ на месторождениях Республики Башкортостан [7]

Как видно из рисунка, использование самой успешной, по количеству ограниченной попутно-добываемой воды, технологии Резойл Ф-1 отличилось средней продолжительностью эффекта в два года и успешностью работ до 87% [7]. Таким образом, можно констатировать, что все технологии обладают

не только преимуществами, но и недостатками, которые заключаются в высокой финансовой стоимости, краткосрочности эффекта, ограничениях в применении по геолого-техническим условиям и сложной доступности материала, что еще раз подчеркивает актуальность и необходимость прогнозирования динамики развития состояния крепи и эффективных способов снижения ее износа.

1.3 Выводы к главе 1

1. Основными причинами образования водоперетоков являются технические и технологические аспекты эксплуатации скважины, вызывающие ударные нагрузки на крепь, либо создающие перепад давлений, которые стремятся образовать полость, или трещину вследствие разницы напряжений внутри цемента и внутри горной породы, усугубленные воздействием агрессивных пластовых флюидов, действующих со стороны горных пород.

2. Анализ литературных и промысловых данных показывает, что под воздействием регулярных технологических нагрузок со временем происходит потеря целостности цементного камня, что объясняется низкими прочностными характеристиками камня из бездобавочной рецептуры тампонажного цемента, приводя к преждевременному физическому износу технического сооружения, а в частности к заколонным циркуляциям, а также способствует увеличению комплекса ремонтных работ на таких скважинах.

3. Известные водоизоляционные технологии, направленные на ограничение водопритоков, создающие дополнительные сопротивления в водонасыщенной части пласта, имеют низкую продолжительность технологического эффекта, в результате чего возникает необходимость в проведении повторных ремонтно-изоляционных работ с применением дорогостоящих реагентов, что является фактическим основанием и предпосылкой к совершенствованию традиционной технологии и материалов для цементирования скважин.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ГИПОТЕЗЫ

2.1 Концепция долговечного цементного камня

Под долговечностью цементного камня понимается его способность сохранять необходимый уровень строительно-технических свойств при длительной эксплуатации. Однако существует ряд факторов, способствующих разрушению цементного камня во время его эксплуатации, обусловленные, прежде всего, его щелочной природой ($pH > 12$) и химическим составом, пористой структурой, проницаемостью для газов и жидкостей.

На протяжении 100 лет с момента основания первых исследовательских лабораторий Э.П. Халлибертоном проводятся работы по изучению способов сохранения долговечности цементного камня, основным направлением которых является улучшение структурно-реологических и физико-механических свойств тампонажного раствора и камня.

Так, существенный вклад в развитие научных основ в вопросах повышения качества крепления скважин и усовершенствования процессов их цементирования внесли такие видные отечественные ученые, как Ф.А. Агзамов, Р.Г. Ахмадеев, М.О. Ашрафьян, А.И. Булатов, Г.Р. Вагнер, С.Н. Гаранович, И.Г. Гранковский, В.С. Данюшевский, Н.Х. Каримов, Н.Н. Круглицкий, Н.И. Крысин, В.И. Крылов, В.Г. Кузнецов, Ю.С. Кузнецов, А.Х. Мирзаджанзаде, Д.Ф. Новохатский, А.Ф. Полак, В.Н. Поляков, П.А. Ребиндер, Л.И. Рябова, В.П. Овчинников, З.З. Шарафутдинов, А.М. Яковлев, и др.

Перфорация, гидравлический разрыв пласта, опрессовка и механическое воздействие в сочетании с агрессивной коррозионной средой наиболее сильно провоцируют разрушение цементного камня под действием больших напряжений сдвига, возникающих в результате статических и динамических нагрузок. При этом статистика показывает, что бездобавочная рецептура тампонажного цемента в большинстве случаев не оправдывает ожиданий по сохранению целостности цементного кольца [7].

В то же время, на удалении нескольких метров от зоны перфорации, деформация цементного кольца может составлять 0,3-0,7 мм, что создает возможность сохранения целостности крепи скважины при соответствующей модификации цементов [1].

Существует множество современных водоизоляционных материалов и технологий, направленных на ограничение водопритоков, благодаря которым появляется возможность обеспечения качественного дополнительного фильтрационного сопротивления флюидам в водонасыщенной части пласта и уменьшения водопритоков. Большинство технологий по ограничению водопритоков (водоизоляционных технологий) имеют низкую продолжительность технологического эффекта, и кроме того они предполагают воздействие на пласт (водо- или нефтенасыщенный), но очень редко они направлены на восстановление целостности крепи скважины, нарушение которой восстанавливается намного сложнее, чем традиционное ограничение водопритока из пласта. В этом плане можно отметить, например, попытки наращивания или восстановления цементного кольца различными тампонирующими составами на минеральной или полимерной основе. Доказательством могут служить многолетние и безуспешные попытки ликвидации межколонных давлений (МКД), присутствующие с различной величиной давлений на большинстве газовых скважин [46].

Попытка закачки жидкости для восстановления герметичности цементного кольца с устья в затрубное пространство, практически всегда, не дает результата, поскольку в поры цементного камня и образовавшиеся в нем трещины имеют малую величину, и для закачки даже маловязкой жидкости требуются очень большие давления. При этом нет гарантий доведения этой жидкости до источника МКД, не говоря уже об инъекционных жидкостях на минеральной основе [47].

В этом плане, наиболее эффективным способом может явиться закачка герметизирующего состава в затрубное пространство через специальные отверстия в обсадной колонне выше/ниже эксплуатационного объекта.

Безусловно, существует множество эффективных технологий минимизации последствий от ударных воздействий механических нагрузок, испытываемых обсадной колонной и цементным камнем. Минимизация трещинообразования может быть достигнута применением заполнителей в тампонажных растворах, использованием армированных цементов и материалов и т.д. [48].

В качестве наполнителей для тампонажных растворов применяют легкие алюмосиликатные полые микросферы, которые при уменьшении объемной массы повышают прочность цементного камня, при этом последние хорошо переносят высокие температуры [48]. Механизм повышения удароустойчивости цементного камня при добавке микросфер состоит в гашении напряжений и возникающих трещин в микросферах.

Повышение показателей вибропоглощающих свойств можно получить, вводя в вяжущее анизометрические наполнители, то есть наполнители слоистой или чешуйчатой (несферической) формы, которые повышают модуль упругости базового материала [49].

Высокодисперсные волокнистые наполнители в цементных композициях оказывают положительное влияние на процессы структурообразования, прочность наполненных бетонов и другие физико-механические и эксплуатационные свойства бетона [50].

В результате совмещения армирующих композиционных элементов и цементной матрицы образуется комплекс свойств цементного камня, обладающий совокупными характеристиками каждого отдельно взятого участника композиции.

Введение фибры в цементные смеси модифицирует микроструктуру цементного камня, улучшая структуру бетонной композиции за счет контроля расслоения и сплошности смеси. Упругая пространственная многомерная хаотичная сетка из волокон препятствует седиментации частиц зерновой фракции смеси. Введение фибры уменьшает водопоглощение, увеличивает

прочность, морозоустойчивость, химическую стойкость, сульфатостойкость, износостойкость цементного камня [51].

Однако применение микросфер и дисперсного армирования не исключают разгерметизацию заколонного пространства и появление каналов при превышении возникающих напряжений над механической прочностью цементного камня во время внутрискважинных работ, и, самое главное, данные технологии не направлены на восстановление герметичности поврежденной цементной крепи.

В связи с чем, подтверждая расхожую фразу - профилактика лучше лечения, совершенствование тампонажного материала для крепления скважин становится приоритетной задачей в области улучшения качества строительства скважин.

Одним из современных альтернативных направлений в области совершенствования тампонажного материала является разработка «самозалечивающегося» цемента [52, 53], принцип работы которого заключается в герметизации водопроводящих каналов предварительно интегрированными в тампонажный цементный порошок модифицирующими добавками, которые, активируясь, блокируют образованные в цементном камне трещины, таким образом, восстанавливая герметичность крепи скважины.

2.2 Концепция получения самовосстанавливающихся материалов

Концепция самовосстанавливающихся полимерных материалов известна с 1980-х гг. В 1981-м году Дональд Джуд в своей работе отразил возможность исцеления невидимых микротрещин с целью продления срока службы полимерных компонентов [54].

Первыми статьями, которые продемонстрировали способность ряда полимерных материалов «самозалечивать» трещину были: «Пассивное умное самовосстановление в полимерных матричных композиционных материалах», опубликованная в Вирджинии, США [55] и «Автономное исцеление

полимерных композитов» [56], где были обнародованы успешные попытки оценить закономерность разрастания трещины в полимерных материалах и их восстановление. В 2003 году группа исследователей из разных американских университетов продемонстрировала самовосстанавливающийся армированный волокнами структурный полимер, который представлял собой матричный композитный материал с микрокапсулированным химическим катализатором, подвергавшийся трещинообразованию при комнатной температуре [57]. С тех пор многократно возрос интерес, связанный с поиском материалов и исследованием механизма самовосстановления, притянув внимание различных стратегически важных организаций - от архитектурных агентств, гражданского строительства до ВВС США [58] и Европейского космического агентства [59], которые вложили значительные средства для проведения исследований самовосстанавливающихся полимеров.

Первый обзор широкого спектра самовосстанавливающихся материалов был представлен профессором Делфтского технического университета, доктором Сибрандван дер Цваагом, который описал категории и различные подходы к разработке и совершенствованию фактических строительных способностей керамики, полимеров и металлов [60]. Наиболее убедительные исследования, связанные с явлением самовосстановления материалов, были продемонстрированы Делфтским техническим университетом во время проведения в 2007 году «Первой международной конференции по самовосстанавливающимся материалам», проходившей в Нидерландах. В то же время группа американских исследователей разработала концепцию применения частиц эффективного размера инкапсулированных в самовосстанавливающиеся полимеры. При этом модифицирующие частицы были соразмерны максимально возможному размеру трещин. Таким образом, результат исследований продемонстрировал достижение желаемого восстановительного эффекта [61].

В журнале «Химия материалов», опубликованном в 2008 году, доктор Шеба Д. Бергман и профессор Фред Вудл, основываясь на свойстве

обратимости, полностью описали способность полимеров к восстановлению [62]. Те же результаты были подтверждены и дополнены исследовательской группой из Университета Варвика, которая более детально изучила явление самовосстановления в полимерах [63].

Профессор Ричард П. Вул внес вклад в материаловедение, описав механическое и термическое повреждение и заживление полимеров [64]. Команда Д.И. Ву в своей статье описала механизм разрушения и концепцию заживления в полимерных системах, а также предложила методы оценки эффективности самовосстановления [65].

Полный спектр применения самовосстанавливающихся способностей материалов был обобщен в работах китайских исследователей [66].

Команда авторитетных и опытных исследователей под руководством Н.Р. Сотгоса представила общественности новую концепцию «Биоинспирированных материалов для самоочистки и самовосстановления», которая продемонстрировала перспективу самовосстановления материалов с помощью интегрированных биосистем и автономного реагирования на повреждения [67].

Первое «Потенциальное применение самовосстанавливающихся материалов в строительной отрасли» было официально опубликовано группой исследователей из Университета Кардиффа, которая указала общественности на проблемы долговечности цементных материалов и предсказала высокий спрос на самовосстанавливающиеся бетоны [68].

В то же время, вопрос применения самозалечивающихся материалов при строительстве скважин совершенно не исследован. Поэтому, на сегодняшний день, только компания Шлюмберже является единственной нефтесервисной организацией, разработавшей и успешно применяющей «самозалечивающийся» цемент Futur, который активно применяется для цементирования скважин. При этом роль триггерного механизма для активации цементной системы Futur выполняют углеводородные газы. Таким образом, при появлении трещин в цементном камне, некоторые компоненты

проникнувшего углеводородного газа вступают в контакт со специальными добавками, интегрированными в цемент при его изготовлении или затворении. После взаимодействия добавки и углеводородного газа ранее поврежденный цементный камень восстанавливается до первоначального вида, сохраняя исходную прочность. Цементное кольцо герметизируется в течение нескольких часов, после чего миграции жидкости не происходит [69].

Обзор Эрин Б. Мерфи и Фреда Вудла охватил «Мир умных исцеляющих материалов» [70]. В их исследовании представлен глубокий взгляд на область применения самовосстанавливающихся материалов, представлены некоторые активаторные механизмы и способы залечивания каналов, вкратце обсуждается долговечность и многократность использования композитных материалов.

В «Ежегодном обзоре исследований новых материалов» группа авторитетных авторов сообщила о новом подходе к разработке безопасного, долговечного класса эластомеров, а также о различных способах нанесения покрытий на материалы [71].

С 2010 года значительный объем исследований был посвящен проблемам инкапсуляции и транспортировки, различных самозалечивающих агентов внутрь материала (изделия) [72, 73, 74], а также проблемам применения ингибиторов для защиты от коррозии [75, 76].

Почти девять лет группой ученых из Делфтского технического университета под руководством микробиолога профессора Хенка Джонкерса проводились исследования и разработка самовосстанавливающегося бетона, об успешном применении которого было объявлено 14 мая 2015 года. Концепция данной разработки заключалась в введении особенного вида бактерий (бацилл) в состав строительного бетона и обеспечение им питательной среды. Эти бактерии были заключены в биоразлагаемый пластик, разлагающийся при взаимодействии с водой. После разложения капсул, бактерии начинали питаться лактатом (гидроксидом) кальция и выделять отложения кальция (CaCO_3), который в свою очередь является гомогенным по

отношению к цементному материалу, обеспечивая идеальную адгезию к последнему. За счет прочного сцепления с продуктами твердения цемента, продукт жизнедеятельности бактерий перекрывал канал, тем самым блокируя путь миграции газа [77]. По утверждению автора разработки, его продукт лучше всего подходит для строительства подземных хранилищ опасных отходов, а также для прокладки подземных туннелей, фундаментов, автодорожных мостов, бетонных перекрытий и гидротехнических сооружений.

Наука, изучающая материалы и механизмы самовосстановления, существует уже более 35 лет, однако самый большой прорыв был сделан за последние 15 лет. Это объясняется развитием нового направления инженерной и химической наук - нанотехнологии, дающей возможность работать со структурой атома и, подвергая его различным манипуляциям, создавать новый продукт.

При этом, основополагающие исследования были проведены учеными из США и Нидерландов. Американцами был определен спектр материалов, демонстрирующих способности к самовосстановлению; изучен механизм автономного самозалечивания. Голландцами разработаны: способы инкапсулирования самозалечивающих агентов, их транспортировка до места назначения, триггерные механизмы, среды обитания самозалечивающих агентов, методы оценки эффективности самовосстановления, условия для тестирования их функциональной пригодности и мн. др.

Самовосстанавливающиеся системы нашли свое применение в различных областях, особенно были успешно применены в промышленном строительстве. Однако подобная «умная» цементная система является новой тенденцией для нефтяной промышленности, поэтому требует более детального изучения механизмов активации и восстановления. В том числе требуется задание системе специальных свойств, обеспечивающих ее надежное функционирование в сложных пластовых условиях.

2.3 Обзор существующих технологий восстановления целостности цементного камня

2.3.1 Микрокапсулы для восстановления целостности цементного камня

В работе [55] представлена инновационная система, имеющая строение пассивной умной микрокапсулы, оболоченной (покрытой) силикагелем. Указанная система обеспечивает самозалечивание в результате золь-гель реакции сульфированного полистирола в водо-нефтяной среде. При проведении исследований микрокапсулы помещали в раствор цемента вместе с углеродными микроволокнами. В схватившемся цементном растворе (камне) создавали микротрещины, и далее наблюдали за полимеризацией, инициированной контактом исцеляющего агента и катализатора. Эффект самовосстановления оценивался по изменению газопроницаемости и изменению полного электрохимического сопротивления, которые демонстрировали полное восстановление цементного камня за 28 дней [55].

Биомиметическая концепция (концепция подражания путем копирования модели поведения или образа объекта) самовосстановления также была продемонстрирована на цементных образцах-балочках, полученных из цементов, в растворы которых включались «исцеляющие» агенты, заключенные в полые пористые волокна, или в полые стеклянные трубки с хрупким герметиком. Автономное «заживление» продольных трещин проходило при комнатной температуре, при этом успешность восстановления составила 45%, а при 80 °С - 80% [55].

Успешное применение механизма самозалечивания также было продемонстрировано вводом волоконно-армированных пластиков, диспергированных микроинкапсулированных исцеляющих агентов и катализаторов в матрицу цемента. При этом высвобождение активных агентов происходило при тепловом воздействии, или вакууме, а также при механической нагрузке, а восстановление целостности изначально

поврежденного цементного камня происходило путем заполнения пустот продуктом полимеризации добавок в среде катализатора [69].

2.3.2 Сплав памяти, восстанавливающий целостность цементного камня

В работе [78] показана возможность исцеления невидимых микротрещин суперсовременными интеллектуальными материалами, такими как сплавы памяти формы.

Эффект памяти формы — явление возврата к первоначальной форме при нагреве, которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации. В работе [78] показана возможность создания композиции, в матрице которой бы сохранялась память исходной структуры цельного цементного камня, и с использованием указанной концепции возможность выявить способность к самовосстановлению цементного камня, в котором под воздействием механических нагрузок образовались трещины.

В результате совместных исследований [78] ученых из США и Канады предложена цементная композиция, которая представляет собой сверхвысокопрочный бетон, армированный волокном полимера и резиновой крошкой, приготовленных специальной термообработкой. Данная композиция относится к материалам, активирующимся при тепловом воздействии, или при механической нагрузке. Такая композиция способна быстро реагировать на внешнюю среду, время начала реакции после воздействия на триггер, варьируется от 5 до 60 секунд, в зависимости от температуры, минерализации водной среды [78]. При моделировании канала диаметром 1,5 см и средней температуре 90 °С, доказанная эффективность составила 80%, причем, чем больше температура, тем выше эффективность добавки.

2.3.3 Композиция для «самовосстановления» цементного камня

Самозалечивание камня из специальной цементной композиции, разработанной учеными из Мичиганского университета, происходит

автоматически в местах появления трещин и происходит без внешнего вмешательства [79].

Разработанная цементная композиция включает в себя гидравлический цемент, воду, песок, золу, водопоглощающий агент и короткие волокна, равномерно распределенные при перемешивании. Благодаря наличию микрокремнезема в составе смеси и неполной гидратации вяжущего, а также присутствию CO_2 в воздухе и в воде, возможно получить эффект самозалечивания бетонных конструкций без создания специальных условий. Авторы считают, что для получения желаемого эффекта ширина трещины должна быть менее 50 мкм [79].

Самозалечивание бетонных конструкций исследовалось при различных воздействиях окружающей среды, включая смачивание - сушку, фильтрацию воды и погружение в хлоридные среды. Во время фильтрации воды было отмечено постепенное снижение проницаемости во времени, а спустя месяц после начала гидратации композита произошла полная остановка фильтрации. Основной причиной запечатывания каналов явилось формирование отложений карбоната кальция в результате гидратации оксида кальция и последующего присоединения углекислого газа [79].

В практике применялся гидравлический цемент с водоцементным отношением равным от 0,5 до 0,8. Отношение массы песка к цементу находится в пределах от 0,8 до 1,0. Армирующими элементами являлись волокна из поливинилового спирта с диаметром 30–60 мкм, в количестве от 1,5% до 3,0% от общего объема композита [79].

2.3.4 Технология «FUTUR» для восстановления целостности цементного камня

Ранее отмечалось, что компанией Шлюмберже разработан и успешно применяется «самозалечивающийся» цемент FUTUR, используемый для цементирования скважин и активируемый углеводородными газами.

Шлюмберже гарантирует перекрытие нефтегазового потока через микрозазор шириной до 100 мкм в течение нескольких часов [16, 53].

Активный цементный камень FUTUR действует как экран, который реагирует автоматически при контакте с углеводородами, мигрирующими к устью скважины в результате повреждения цементного кольца и потери им изоляционных свойств. Поскольку источником углеводородных флюидов, как правило, является продуктивный пласт, для улучшения разобщения горизонтов данный раствор из данного цемента рекомендуется размещать в виде двух барьеров над изолируемым пластом толщиной не менее 150 м [16, 53].

Плотность такого тампонажного цемента варьируется в пределах 1400 кг/м³ - 1920 кг/м³. Существуют температурные ограничения: 20 °С - 138 °С [16].

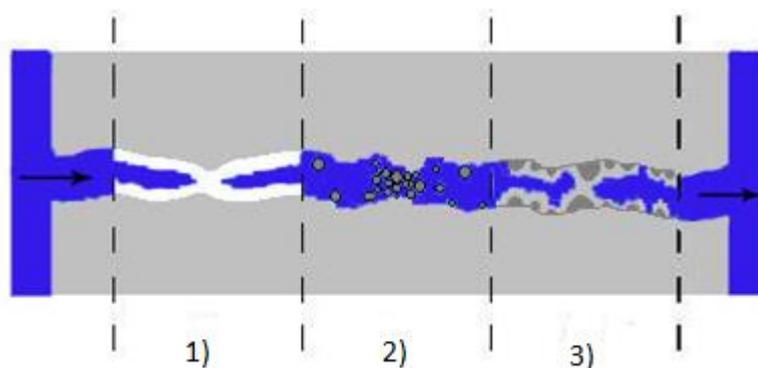
2.4 Выбор и обоснование принципа изоляции водопроводящего канала

В связи с тем, что основной тенденцией крупнейших месторождений России является переход скважин в категорию сооружений с длительной историей эксплуатации и соответственно все возрастающим объемом ремонтно-изоляционных работ, в качестве объекта для устранения и по совместительству активатором «самозалечивающего» механизма выбрана вода [7].

Самовосстанавливающиеся материалы можно разделить на три большие группы: добавки инкапсулированные (гранулы), добавки в оболочке сосуда (волокно) и добавки без оболочек. Каждая группа отличается механизмом, используемым для активации «самозалечивающих» агентов [7].

Очевидно, что феномен самовосстановления - это сложное явление, которое активируется под воздействием какой-то внешней силы (например, воды). Активация протекает в несколько стадий: в первой стадии при повышении нагрузки на камень в нем появляется канал (трещина); на втором

этапе происходит появление воды, которая в конкретном случае играет роль пускового механизма в процессе «самозалечивания»; третий этап - закупорка самой водопрводящей трещины. Отсутствие водопритоков – это результат эффективной работы агента на третьем этапе. Однако, результат может быть достигнут при помощи разных подходов в изоляции проводящего канала. Так, изоляция трещины может произойти при помощи ее полного закупоривания в результате реакции с осаждением карбоната кальция на стенки канала, второй вариант, это когда агент прилипает к стенкам трещины, затрудняя фильтрацию жидкости и последний вариант - трещина может быть блокирована при помощи агента, активированного водой, при этом его размер после набухания превышает размер трещины (см. рис. 2.1) [7].



1) отложение карбоната кальция; 2) блокирование набухшими частицами; 3) перекрытие агентом, прилипшим к стенкам трещины

Рис. 2.1 – Способы изоляции трещины [7]

В нашем случае выбран принцип «самозалечивания» пораженных цементов при помощи модифицирующих добавок, которые после вторичного взаимодействия с водой должны иметь способность к перекрытию трещины.

При этом необходимо сформулировать основные требования к материалам для получения «самозалечивающихся» цементов, а также выявить спектр материалов, наиболее пригодных для модифицирования тампонажных цементов.

2.4.1 Требования к материалам для получения «самозалечивающихся» цементов

Исходя из условий эксплуатации скважины, а именно: воздействия знакопеременных температур, высоких давлений, влажности и различных динамических нагрузок, приходящихся на крепь скважины, были определены требования к виду и свойствам модифицирующих добавок, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Наличие прочной многослойной оболочки, которая должна предотвратить преждевременное набухание добавки на этапе приготовления и закачки цементных растворов.

Ядро модифицирующей добавки, которое может представлять собой водонабухающий полимер, необходимо обочивать в прочный водорастворимый слой, так как будучи неизолированным превентивной оболочкой, он способен влиять на реологические свойства цементного раствора. В частности, при контакте с водой активный компонент без защитной оболочки будет поглощать воду в большом количестве, что на этапе приготовления и закачки цементного раствора в скважину может привести к увеличению вязкости тампонажного раствора и преждевременному загустеванию.

2. Начало активации ядра за счет водопоглощения должно быть не ранее 6 часов после окончания цементирования.

Известно, что в процессе гидратации жидкий цементный раствор переходит в камневидное состояние, при этом в результате гидратации цемента происходит образование иглообразных кристаллов различной формы и размера. Спустя, приблизительно, 6 часов объем цементного раствора заполняется скелетом крупных иглообразных кристаллов, образованных продуктами гидратации алюминатов C_3A . В последующем пространство между крупными кристаллами заполняется мелкими кристаллами продуктов гидратации C_3S и C_2S . На каждом этапе между продуктами гидратации формируются пространственные связи, обуславливающие процесс

загустевания цементной смеси и последующий набор прочности цементным камнем. Обеспечивая добавке превентивную оболочку, можно гарантировать ее химическую инертность при гидратации цемента в период его схватывания и начале твердения, что необходимо для проведения безаварийной процедуры по герметизации затрубного пространства скважины цементным раствором. Кроме того, для образования трещин необходима определенная прочность цементного камня, потому, что в жидком цементном растворе трещины не образуются. В этом случае могут образоваться каналы, имеющие другую природу, а именно, из-за седиментационного расслоения цементного раствора. Другое дело, что эти каналы тоже надо герметизировать.

При приготовлении цементных растворов принимают водоцементное отношение 0,45-0,6, тогда как для полной гидратации цемента достаточно 20% воды от веса цемента. Другими словами, в цементном растворе, для обеспечения его подвижности, всегда есть избыток воды, которая будет активно взаимодействовать с не изолированной добавкой, причем даже небольшая убыль воды будет негативно сказываться на подвижности растворов. Поэтому задержка начала гидратации модифицирующей залечивающей добавки является обязательным условием.

3. Длительность эффекта самозалечивания - до полного прекращения поступления воды.

При образовании канала произвольной геометрии трещина будет стремиться к разряжению на границе контакта модифицирующая добавка-частица цемента вследствие разницы размеров и плотностей контактирующих частиц. Таким образом, есть предположение, что на пути своего разряжения трещина будет гарантировано пересекать многократно встречающиеся модифицирующие добавки. Вода, проходящая по образовавшемуся каналу, будет встречать на пути миграции добавку и, после взаимодействия с молекулой полимера в ней сохраняться. В свою очередь модифицирующая добавка, способная абсорбировать количество воды в сотни раз больше своей массы, должна удерживать ее при условии сохранения гигрометрического

равновесия, что неизбежно в случае замкнутости системы. Таким образом, независимо от степени разбухания добавки, ее водопоглотительного потенциала должно быть достаточно для полного и долгосрочного блокирования водопроводящего канала.

4. Способность перекрывать трещины размером от 50 до 150 мкм.

Согласно данным компании Шлюмберже размер водопроводящих каналов составляет около 100 мкм [16, 53], что диктует размер набухшей модифицирующей добавки, необходимый для эффективной блокировки водопроводящего канала. Таким образом, ясно, что размер модифицирующей добавки в пике активации должен превышать максимальные значения проводящего канала для его водоизоляции.

5. Сохранение способности многократного действия на периодическое возникновение дефектов.

Из пунктов 2 и 3 заключено, что активация добавок должна происходить в результате длительного и непосредственного контакта с пластовой водой, однако, как известно из литературы [12], свободная вода, циркулируя по уязвимым зонам цементной крепи, способна образовывать разные виды заколонных перетоков, которые при образовании новых зон разряжения могут мигрировать по путям наименьшего гидравлического сопротивления, которые обусловлены размерами проводящих каналов и их лиофильностью. Таким образом, модифицирующая добавка должна обладать способностью многократной активации в случае периодического действия на нее триггера.

6. Отсутствие влияния на технологические свойства тампонажного раствора и цементного камня.

Необходимость в отсутствии влияния модифицирующей добавки на технологические свойства цементного раствора продиктовано прокачиваемостью цементного раствора и отслеживается от момента затворения до набора прочности цементной смеси. Снабдив добавку регулируемой растворимой оболочкой, возможно обеспечить необходимые

параметры подвижности, седиментационной устойчивости и т.д. цементного раствора. Требование в отсутствие влияния модифицирующей добавки на технологические свойства цементного камня продиктовано необходимостью достижения стандартных показателей механической прочности и проницаемости.

2.4.2 Анализ материалов для залечивания водопроводящих каналов цементного камня

Проведенный анализ модифицирующих добавок позволил определить спектр материалов, наиболее пригодных для модифицирования тампонажных цементов.

Из сформулированных в п. 2.4 принципа «самозалечивания» пораженных цементов и п.п. 2.4.1 требований к материалам для получения «самозалечивающихся» цементов, следует, что модифицирующая добавка должна представлять собой активный, но предварительно изолированный водонабухающий компонент, который при поступлении пластовой воды способен самоактивироваться и набухать, заполняя весь объем полости, блокируя образовавшийся канал [7].

Для проведения исследований выбраны материалы, поглощающие и задерживающие воду, и, кратно увеличивающие свой объем. Исходя из этого были выбраны: полиакриламид (ПАА), водонабухающий полимер (ВНП В-615), полиакрилат натрия (ПАН), сшитые сополимеры ПАА, активные гидроизолирующие минеральные добавки и набухающие эластомеры [80].

Для каждого материала оценена его пригодность в качестве водопоглотителя, также представлены результаты экспериментов по определению кинетики набухания материалов, и стойкости механическому разрушению [81].

Полиакриламид (ПАА) технический $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CONH}_2)-]_n$, представляет собой сополимер полиакриламида с акрилатами при содержании последних не более 10%, производится из нитрила акриловой кислоты $\text{CH}_2=$

СН — СN, который при гидролизе в присутствии серной кислоты дает акриламид и частично акриловую кислоту. Существуют температурные ограничения, поскольку ПАА термически устойчив до 100°C. Низкомолекулярные разновидности ПАА могут быть использованы для создания добавок с целью герметизации и снижения фильтрации цементного камня, высокомолекулярные разновидности ПАА подходят для создания эластичной и прочной пленки с высокой флокулирующей способностью, что связано с высокой молекулярной массой полимера, структурообразующая способность которого возрастает с увеличением молекулярной массы [82].

Водонабухающий полимер (ВНП) представляет собой единые макромолекулы, сшитые из молекулярных цепочек. Цепочки и связи между ними образуют упругую сетку, которая в сухом геле или частично наполненном водой скручена и плотно упакована в небольшом объеме крупинок, для которых осмотическое давление является водопоглощающим механизмом. Размер частиц гранул ВНП - не более 2 мм, плотность от 1150 до 1200 кг/м³. Порошкообразный ВНП набухает во времени в пресной воде в 80-100 раз, а в пластовой воде (с минерализацией 150 г/литр и больше) – в 50-60 раз по объему. Процесс набухания и расширения ВНП не зависит от давления на него, также он стоек к воздействию температуры (до 170°C) [83].

Полиакрилат натрия – натриевая соль полиакриловой кислоты, имеет химическую формулу вида $[-CH_2-CH(COONa)-]_n$, и представляет собой анионный полиэлектролит с отрицательно заряженной карбоксильной группой в основной цепи. Одним из основных свойств соединения является способность абсорбирования жидкости в 200—300 раз больше собственного веса. Полиакрилаты натрия хорошо растворяются в воде, при этом легко набухают, поэтому являются хорошими загустителями и гелеобразователями. Они имеют хрупкую рассыпчатую структуру, устойчивы к негативному воздействию бактерий и температур (до +200 °C) [84].

Гидроизолирующие минеральные добавки (ГМД) также можно применять для восстановления герметичности цементного камня.

Пуццолановая активность ГМД определяется присутствием в их составе аморфного кремнезема, который взаимодействует с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образуя высокодисперсные гидросиликаты кальция с повышенными вяжущими свойствами, что способствует как увеличению прочности камня, так и уменьшению размеров пор, что снижает проницаемость цементного камня. Такой активностью обладают, например, кислые золы, пуццолановая реакция которых начинается в возрасте бетона 7-14 суток, а основная ее часть протекает в период 30 - 90 дней [85].

Высокодисперсные ГМД, такие как микрокремнезем, метакаолин наиболее активно взаимодействуют с известью в раннем возрасте, начиная с 3 суток. Высокая химическая активность микрокремнезема приводит к тому, что, по некоторым данным, 25 - 30% его от массы цемента могут полностью связать $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне, которая сохраняется в цементном камне после окончания процесса гидратации клинкеров C_3S и C_2S , при этом аморфный кремнезем после взаимодействия с гашеной известью формирует основные продукты-носители прочности [85].

Водонабухающие эластомеры – это каучуки и резиновые смеси, которые работают по принципу осмоса, и вода втягивается в эластомер и удерживается в нем из-за перепада солености поперек поверхности эластомера. Набухающие эластомеры-полимеры обладают высокоэластическими свойствами. Регулируя состав эластомерных композиций можно задавать величину набухания в конкретной среде (до 400% и более), скорость набухания, температуру эксплуатации и т.д. Однако, водонабухающие эластомеры не могут использоваться в высококонцентрированных солевых растворах, и теряют свои прочностные свойства при высокой степени набухания [86].

Сшитый сополимер АА – суперабсорбент на основе анионного полиакриламида. Он представляет собой нерастворимые в воде сшитые сополимеры акриламида и акрилата калия. Полимеры содержат набор полимерных цепочек, параллельных друг другу. Они регулярно соединены

сшивающими агентами, образуя сетку. Когда вода контактирует с одной из этих цепочек, она втягивается в молекулу полимера благодаря осмосу, и сохраняется, быстро мигрируя внутрь полимерной сетки. Сшитый сополимер АА абсорбирует количество воды до 500 раз больше своей массы, переходя в гели. Плотность сухого суперабсорбента равна 1400 кг/м^3 , плотность после полного завершения процесса абсорбции воды - 1058 кг/м^3 [87].

2.5 Обоснование количества модифицирующей добавки

Для проверки оптимальности количества, свойств модифицирующей добавки и ее распределения при заданном водоцементном отношении внутри цементного раствора, была построена математическая модель. При этом приняты следующие допущения:

- 1) Жидкостью затворения является ньютоновская жидкость, вода.
- 2) Получаемый цементный раствор относится к вязкопластичным жидкостям.
- 3) Гигрометрические процессы при переходе вязкопластического цементного геля в камневидное состояние не принимаются во внимание.
- 4) Проводится учет распределения частиц полимера в цементном камне.
- 5) Влияние времени не рассматривается.
- 6) За основу взяты результаты, полученные при замере проницаемости, которые показали, что при интегрировании 1% модифицирующей добавки фильтрация в образце снизилась в среднем на 82%.
- 7) Градиент давления прорыва воды по заколонному пространству принят равным $2,8 \text{ МПа/м}$.

Представим, что формула 2.1 демонстрирует матрицу цементного камня, приготовленного из бездобавочного цементного раствора с нормированным водоцементным отношением, который не содержит каких-либо модифицирующих добавок. Из практики известно, что такой камень является абсолютно водопроницаемым, допуская фильтрацию через себя пластовых флюидов. Нижепредставленная формула (2.1) описывает полную

фильтрацию воды (значение V) сквозь цементный камень (значение M_0) не содержащий модифицирующих добавок (значение C).

$$M_0 = C = V, = C - V = 0 \quad (2.1)$$

Пусть M_0 - вязкопластичный цементный раствор, а M_1 - гель, переходящий в камневидное состояние.

$$M_1 = P + 0.01C = 0.18V, \Rightarrow P + 0.01C - 0.18V = 0, \quad (2.2)$$

где C – доли цемента;

V – снижение фильтрации;

P – доли полимера.

Ранее нами было экспериментально показано, что при добавлении 0,01 доли полимера к 1 части цемента, фильтрация снизилась на 82%. Уравнение (2.1) демонстрирует, что без добавления полимера идет полная фильтрация воды, но после добавления полимера фильтрация снижается на долю (- 0,18).

Если принять, что обе жидкости модели участвуют в переходе в твердую фазу, то возможно приравнять начальные и конечные значения моделей.

$$M_0 = M_1, \quad (2.3)$$

$$C - V = 0.01P + C - 0.18V, \quad (2.4)$$

$$0.01P = -0.82V \Rightarrow V = \frac{0.01}{-0.82}P, \quad (2.5)$$

Из этого следует, что частицы полимера оптимально распределенные (главное условие), как в вязкопластичном цементном растворе, так и в цементном камне, смогут дать сокращение фильтрации на 99,82% (знак «минус» демонстрирует сокращение) путем блокирования водопроводящих каналов. Так, за оптимальное распределение принято понятие матричной системы, частицы полимера которой располагаются в узлах регулярной решетки, состояние которой достигается при формировании цементного камня. Таким образом, пренебрегая хаотичностью движения при

вязкопластичном течении, полагается, что при указанной плотности и концентрации добавки, она займет оптимальные позиции при переходе в камневидное состояние.

В таблице 2.1 в первой колонке указаны части содержания полимерного компонента, равные 0,2%, суммарно добавляемые в цементный раствор до максимально установленной концентрации в 1%, во второй колонке – соответствующее содержанию полимера значение сокращения проницаемости в цементном камне.

Таблица 2.1 – Проницаемость цементного камня от количества полимерной добавки

№	Полимер	Проницаемость
1	(0,2%)	-0,012
2	(0,4%)	-0,024
3	(0,6%)	-0,04
4	(0,8%)	-0,049
5	(1%)	-0,061

Для наглядности модели представим результат в графическом виде, который демонстрирует максимальное сокращение водопроводимости каналов при интеграции в цементный раствор 1% равномерно распределенной полимерной добавки (см. рис. 2.2).

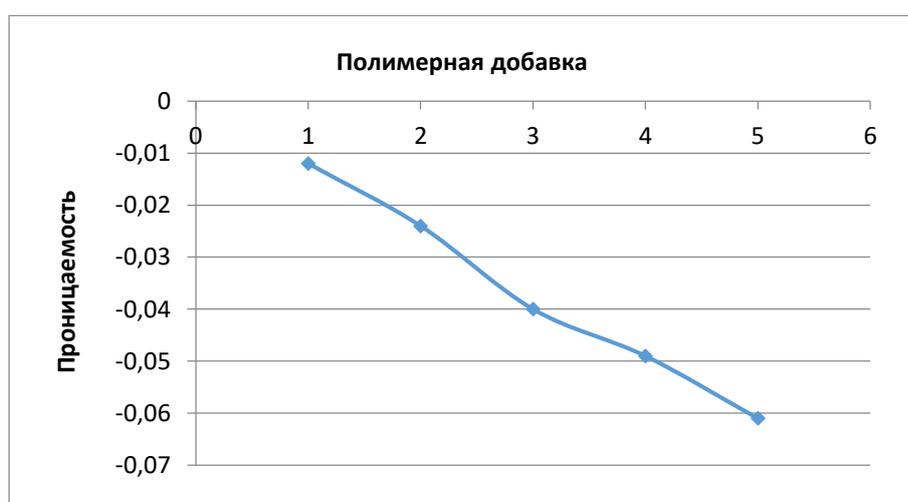


Рис. 2.2 – Изменение проницаемости при распределении полимерной добавки

Далее производилось изготовление цилиндрических и прямоугольных образцов цементного камня для экспериментального подтверждения фильтрационных и прочностных характеристик при рассчитанном 1% содержании модифицирующей добавки. Образцы были залиты в соответствующие формы, срок ОЗЦ выждан. Часть сухих образцов испытана сразу, другая - погружена на 3 суток в воду.

Тест на изгиб продемонстрировал прочность трехсуточной балки в 8,042 МПа, против 2,350 МПа сухой балки.

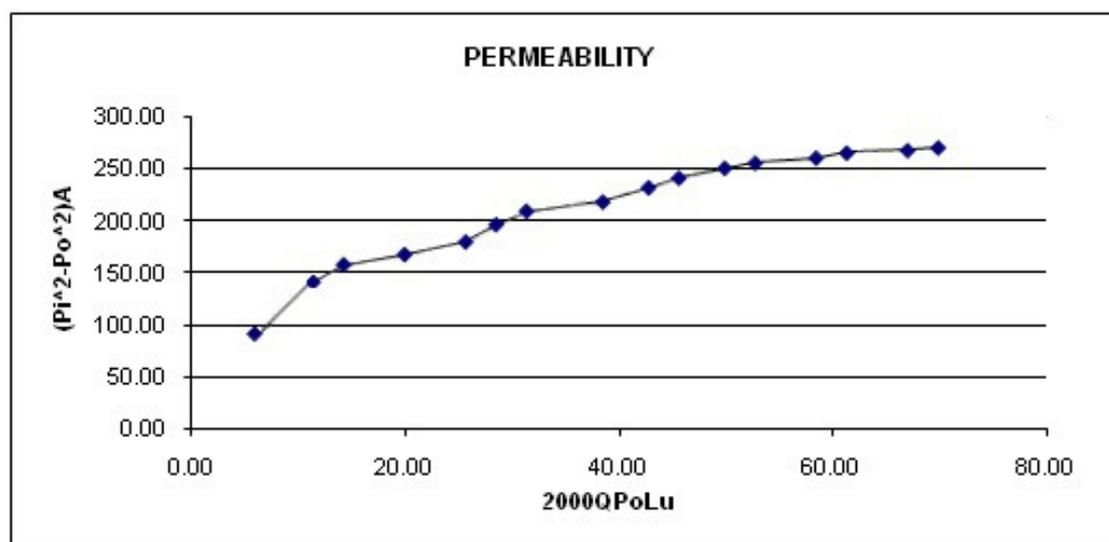


Рис. 2.3 – Исследование образца цементного камня на проницаемость

Результаты фильтрационных исследований образца цементного камня приведены на графике рисунка 2.3, где ось ординат отражает усилие, с которым газ движется по цилиндрическому образцу цементного камня, ось абсцисс – значения фазовой проницаемости, полученной из расширенного уравнения Дарси для фильтрации сжимаемого газа при установившемся режиме потока и изотермическом условии, где известны объемный расход газа Q (см³/с), вязкость μ (сП), длина L (см) и площадь поперечного сечения A (см²) образца, начальное давление при запуске системы P_o (атм), а также конечное давление нагнетания P_i (атм). Так, из полученных результатов фильтрационных испытаний следует, что при 1% содержании МД

проницаемость трехсуточного образца цементного камня снизилась многократно.

Увеличение количества водонабухающих гранул более 1% сильнее снижает проницаемость камня, однако негативно сказывается на его прочности. При уменьшении количества водонабухающих гранул менее 0,5% залечивания пор не происходит.

2.6 Выводы к главе 2

1. Существующие водоизоляционные материалы и технологии, способные ограничить водопиток в скважины, не эффективны при восстановлении целостности крепи скважины.

2. Применение микросфер и дисперсного армирования повышает прочность и удароустойчивость цементного камня, а также улучшает физико-механические и эксплуатационные свойства, однако не исключает разгерметизацию заколонного пространства, так как эти материалы не направлены на восстановление герметичности поврежденной цементной крепи.

3. Зарубежные технологии, восстанавливающие структуру бетона, такие как: микрокапсулы с внедренным катализатором; сверхвысокопрочный бетон, армированный волокном полимера и резиновой крошкой; цементная композиция из гидравлического цемента, воды, песка, золы, водопоглощающего агента и волокон, пригодны исключительно для промышленно-гражданского строительства.

4. «Самозалечивающийся» цемент FUTUR применяется для крепления скважин, однако проявляет способность к восстановлению поврежденной структуры только при контакте с углеводородами.

5. Исходя из актуальных для России проблем, объектом для устранения и по совместительству активатором «самозалечивающего» механизма выбрана пластовая вода.

6. Выбран принцип «самозалечивания» пораженных цементов при помощи блокирования каналов набухшими частицами интегрированных в тампонажный материал модифицирующих добавок, которые после взаимодействия с водой должны увеличиться в объеме и привести к перекрытию трещины.

7. Основными требованиями к модифицирующим добавкам являются наличие прочной многослойной оболочки, задержка активации ядра, длительный эффект самозалечивания, способность перекрывать трещины размером от 50 до 150 мкм, многократность активации, отсутствие влияния на технологические свойства тампонажного раствора и цементного камня.

8. Рассмотренные и проанализированные реагенты, в частности, полиакриламид (ПАА), водонабухающий полимер (ВНП В-615), полиакрилат натрия (ПАН), сшитые сополимеры ПАА, активные гидроизолирующие минеральные добавки и набухающие эластомеры, объединены в общую группу по двум признакам - увеличение добавки в объеме за счет водопоглощающего механизма, и последующая изоляция водопритока блокированием проводящих каналов в результате кратного увеличения объема модифицирующей добавки.

9. Математическое моделирование процесса фильтрации жидкости через образец камня из «самозалечивающегося» цемента позволило выявить оптимальную концентрацию модифицирующей добавки равной 1%, необходимой для максимального сокращения проницаемости камня при условии сохранения его прочности.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Теоретические исследования оптимальности количества модифицирующей добавки при заданных свойствах и условиях распределения внутри цементной системы производились при помощи математического моделирования физического процесса методами статистической обработки результатов экспериментальных данных и корреляционного анализа.

В ходе исследований использовался тампонажный портландцемент марки ПЦТ-I-G-CC-1. Физико-механические свойства модифицирующих добавок, раствора и цементного камня из модифицированного цемента определялись согласно ГОСТ 26798.2-96 «Цементы тампонажные типов I-G и I-H. Методы испытаний» при водоцементном отношении 0,44 на стандартных приборах согласно ГОСТ 1581-96 «Портландцементы тампонажные. Технические условия» и ГОСТ 310.1.96 «Цементы. Методы испытаний».

Для проверки принципиальной возможности применения добавок в качестве целевого модификатора были кустарно изготовлены настроечные испытательные образцы. Исследование кинетики растворения/набухания гранул проводилась на приборе ПКН конструкции Жигача-Ярова.

Исследование фильтрационных и прочностных характеристик производилось на стандартном технологическом оборудовании по стандарту API при тестировании цилиндрических и прямоугольных образцов цементного камня, изготовленных из тампонажного цемента и настроечных испытательных образцов модифицирующей добавки в эмпирически подобранном количестве. Гранулометрический состав компонентов определялся стандартным методом ситового анализа.

Оценка влияния неоднородности структуры цементного камня на механическую прочность (механизм разрушения, прочность на сжатие/изгиб, ударостойкость) производилась при помощи пресс машины для определения прочности материалов. Определение фильтрационных характеристик

(проницаемости по газу/жидкости) производилось на тестере проницаемости цементного камня OFITE модель 360.

Оценка количественных характеристик и определение характера распределения модифицирующей добавки (МД) в общем объеме цементного камня произведены при помощи сканирующего оборудования неразрушающего контроля CT Scanner.

Оценка деформаций и напряжения в модифицированном цементном камне производилась при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в прикладной программе ANSYS.

Нанесение оболочного слоя на активное ядро модифицирующей добавки производилось при помощи технологии структурной грануляции Lenosel.

Толщина оболочного слоя определялась методом растровой электронной микроскопии при помощи электронного микроскопа JEOL JSM – 6610LV.

Регулирование водорастворимости оболочного комплекса производилось при помощи разработанного практического способа для исследования скорости растворения твердых веществ.

Изучение влияния модифицирующей добавки на фильтрационные свойства цементного раствора (седиментационная устойчивость) и цементного камня (проницаемость) производилось при помощи разработанного практического способа исследования фильтрационных свойств пористых материалов (патент №154661).

Обработка и интерпретация полученных результатов производилась при помощи специальных программных продуктов.

3.1 Методика рационального планирования экспериментов

Для проектирования оптимального состава раствора «самозалечивающегося» цемента применялась рациональная методика планирования экспериментов и математическая обработка полученных

данных, позволившая выявить оптимальную концентрацию исходных реагентов.

При планировании эксперимента на первоначальном этапе ставилась задача связывания посторонней воды, фильтрующейся через цементную крепь. Были рассмотрены механизмы связывания свободной воды за счет внедрения активных добавок - объекта, характеристики которого выступают в качестве независимых переменных. В качестве модели для исследования влияния изучаемых характеристик обозначен водопроводящий канал. В качестве критериев оценки влияния рассматриваемых характеристик объекта определены степень связывания воды и последовательное отсечение водопроводящего канала. Далее с учетом выбранных независимых переменных и модели оценки влияния исследуемых характеристик определен последующий порядок выполнения исследовательской работы, а также объем сбора необходимой информации.

В связи с тем, что для оценки влияния характеристик объекта выбраны два взаимозависимых критерия, то для удовлетворения данного условия сформулирован общий признак объекта (модифицирующей добавки) - достижение объемного увеличения его физических размеров за счет связывания посторонней воды, приводимый согласно принципу однофакторного дисперсионного анализа. Из рассмотренных механизмов, приводящих к влажностной деформации объекта, т.е. к его объемному увеличению за счет абсорбции воды, выбран водопоглощающий.

На следующем этапе проводился анализ, позволивший выявить спектр материалов, способных проявлять признак водопоглощения, при помощи статистического группирования по общему признаку.

Далее рассматривались степень трудоемкости процессов оболачивания в зависимости от дисперсности частиц, интегрируемость в цементный раствор. Анализ ко-факторов общего признака позволили выявить наиболее предпочтительный материал, в качестве которого использован сшитый сополимер акриламида.

Взяв за критерий оптимальность по признаку физико-механической прочности пленки в качестве раствора для приготовления водорастворимой оболочки разработан интерполимерный комплекс.

3.2 Исследование свойств модифицирующей добавки

В главе 2 был рассмотрен и проанализирован ряд реагентов, отличающихся способностью к водопоглощению и последующему кратному увеличению своего объема, что необходимо для разработки модифицирующей добавки, таргетированной на физическое блокирование водопроводящего канала в цементном камне.

Подбор наиболее эффективной оболочки, покрывающей водонабухающее ядро, и последующее регулирование ее свойств водорастворимости является наиважнейшим аспектом, т.к. оболочный слой выполняет превентивную функцию и предназначен для исключения преждевременного контакта полимерного ядра с водой, а как следствие исключения преждевременной активации и набухания добавки во время затворения и закачивания цементного раствора в скважину [88].

3.2.1 Методика исследования водопоглощающих свойств ядра добавки

Водопоглощение, сопровождающееся влажностной деформацией, т.е. увеличением размеров и объема материала при увлажнении или полном насыщении материала водой, называется набуханием. При определении степени набухания образца материала при водопоглощении наиболее важным является оценка кинетики набухания, определяемая через массовое выражение.

Оценка кинетики набухания проводилась на приборе ПКН-2 конструкции Жигача-Ярова, принцип работы которого основан на определении начального объема образца сухого реагента и объема набухшего

образца по мере нахождения его в исследуемой жидкой среде. Метод исследований соответствует стандарту API 13I.

3.2.2 Методика получения и исследования свойств водорастворимости оболочки добавки

3.2.2.1 Получение водорастворимого оболочного комплекса

После испытания множества комбинаций водорастворимых реагентов, была установлена необходимость разработки водорастворимого оболочного комплекса, позволяющего регулировать скорость гидратации модифицирующей добавки и обладающего повышенной механической прочностью.

Работы по улучшению эксплуатационных свойств оболочки были направлены на модификацию базового раствора из ряда органических полимеров, другим полимером из ряда полисахаридов при воздействии технологического приема стеклования. Для изготовления защитной оболочки нами использовались карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и поливиниловый спирт (ПВС).

Для каждого реагента в комбинации рассчитывались его критические концентрации и для опытов брались концентрации близкие к критическим.

Далее каждый из полимеров в отдельности наводились на теплом минерализованном растворителе. После чего производилось смешение растворов двух полимеров путем капельного введения добавляемого полимерного раствора в базовый при соотношении 1:1. Полученная полимерная композиция перемешивалась в течение 15-ти минут на магнитной мешалке, так как магнитное поле способствует активному синтезу высоковязких реактивов, однородному перемешиванию и комплексованию. В результате получался полимерный комплекс (ПК) с регулируемыми свойствами, значительно отличающимися от свойств исходных компонентов.

3.2.2.2 Исследование криоструктурирования водорастворимого оболочного комплекса

Поскольку при охлаждении полимерной композиции сначала кристаллизуется чистый растворитель, а растворенные вещества концентрируются в еще жидкой части образца, то должно происходить увеличение количества водородных связей в системе. В результате криолиза сшивается структура полимерной композиции за счет усиления взаимодействия в системе полимер-полимер, что приводит к образованию устойчивых узлов сетки криогеля [89].

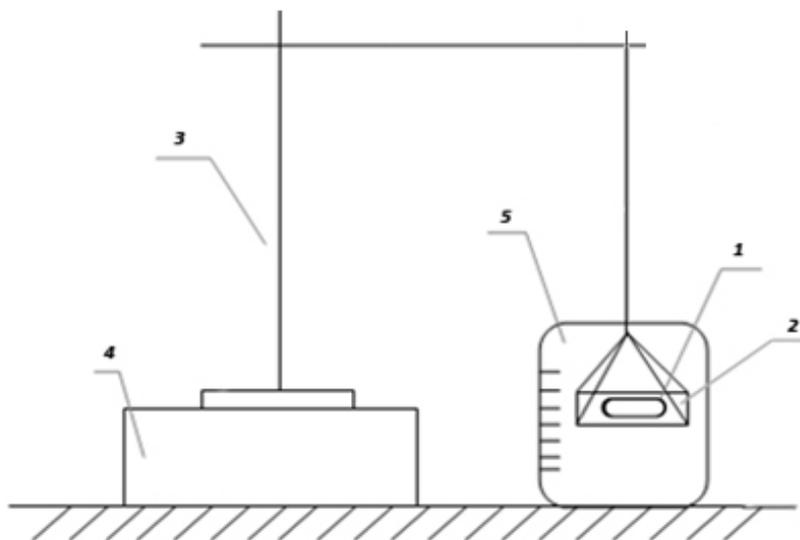
Для изучения закономерности данных процессов было выполнено исследование полимерного комплекса на криоструктурирование, которое проводилось при действии знакопеременных температур. Эксперименты проводились следующим образом: приготовленный при нормальной температуре и залитый в форму раствор, замораживался и выдерживался в течение 3-х суток в морозильной камере при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем размораживался при нормальной температуре.

Реологические свойства и время структурирования ПК исследовались при помощи ротационного вискозиметра. Так, было установлено, что структурообразование ПК во времени протекает с увеличением динамической вязкости, что говорит о действенности метода криоструктурирования.

3.2.2.3 Исследование скорости растворения оболочного комплекса

Регулирование водорастворимости оболочного слоя производилось при помощи разработанного практического способа [90] для исследования скорости растворения твердых веществ, который заключался в следующем (см. рис. 3.1): образец, отлитый из полимерного комплекса водорастворимых органических полимеров с заданными геометрическими параметрами, заранее обезпузыривался вакуумированием и высушивался. Далее подготовленный сухой, взвешенный образец растворимого материала размещался на сетчатую платформу, подвешенную на плече легкового штатива. Электронные весы, на которых устанавливался штатив, калибровались под нулевое значение. Под

тяжестью собственного веса образец погружался в емкость с пресной водой. Секундомером засекалось время начала растворения образца, и по мере его растворения фиксировалось убыль его массы по шкале весов. По окончании растворения образца прекращалось изменение его массы, что выражалось в установлении постоянного значения на шкале весов. Изменение веса образца, отнесенное ко времени растворения, показывало скорость растворения образца в растворителе.



1 – образец исследуемого материала, 2 –сетчатая платформа, 3 – штатив, 4 –весы, 5 – емкость с растворителем

Рис. 3.1 - Установка для определения скорости растворения твердых веществ

3.2.3 Методика нанесения оболочки на ядро добавки

Нанесение пленочного покрытия осуществлялось методом структурной грануляции в аппаратах псевдоожиженного слоя - это процесс, представляющий собой напыление тонкой однородной пленки на поверхность гранул, находящихся в псевдоожиженном состоянии.

При нанесении покрытия в псевдоожиженном слое гранулы «оживаются», т.е. на них распыляется раствор с одновременным высушиванием продукта в потоке подаваемого нагретого воздуха. Малый размер капель и правильно подобранная вязкость распыляемой среды обеспечивают равномерное нанесение раствора оболочки.

Жидкость для покрытия впрыскивается через форсунку в направлении, противоположном направлению потока воздуха (в противотоке, сверху вниз см. рис. 3.2). При дальнейшем восходящем движении частиц в потоке воздуха происходит их высушивание.

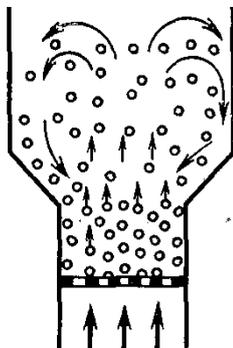


Рис. 3.2 – Схема движения частиц в псевдооживленном слое [91]

Для увеличения механической прочности оболочки гранулы использовали специальный прием знакопеременных температур для улучшения стеклования нанесенного раствора. Известно [92], что при охлаждении полимеров, находящихся в виде растворов, расплавов или в высокоэластичном состоянии, перегруппировка или изменение конформации макромолекул сильно затрудняется в результате резкого увеличения времени релаксации звеньев цепи. Поэтому при резком охлаждении в определенном температурном интервале полимеры не успевают образовывать кристаллическую структуру, могут просто отвердеть или застекловаться, т.е. легко подвижная жидкость перейдет в твердое состояние без изменения фазы, то есть с сохранением ближнего порядка.

3.2.4 Методика исследования прочностных свойств добавки

После приготовления добавка с многослойной оболочкой испытывалась на прочность и подверженность механической деградации при перемешивании в скоростной мешалке. Таким образом, моделировались процессы затворения и закачивания цементного раствора в скважину, при которых добавка испытывала продолжительные механические нагрузки,

приводящие к разрушению материала. Добавка, после воздействия механической нагрузки, погружалась в прибор ПКН-2 для оценки кинетики набухания, заполненный раствором хлоркальциевой воды и выдерживалась в нем. Отсутствие динамики увеличения размера добавки при изменении ее объема в воде свидетельствовало о целостности оболочного покрытия.

Выбор хлоркальциевой воды был обусловлен следующим. При образовании негерметичности в цементной крепи, возникновении заколонной циркуляции или подтягивания подошвенной воды в скважину, цементный камень подвергается воздействию агрессивной среды пластовых вод. Поскольку, как правило, минерализация пластовых вод в большей степени обусловлена наличием хлоридов, количество которых в несколько раз превышает концентрацию гидрокарбонатных ионов, то именно действие растворов хлоридов будет определять набухание добавок в цементном камне. Кроме того, не следует исключать и интенсификацию коррозионных процессов цементного камня в указанных средах.

3.2.5 Определение толщины оболочного слоя методом растровой микроскопии

Для оценки влияния толщины оболочного слоя на скорость его растворения, проводилось исследование толщины оболочки добавки методом растровой электронной микроскопии, позволяющей исследовать особенности строения структуры различных материалов, а также находить степень и виды влияния этих особенностей на свойства материалов (см. рис. 3.3).

Добавку раскалывали так, чтобы получить скол оболочного покрытия и оголяющуюся часть водонабухающей сердцевины, затем при помощи электронного микроскопа JEOL JSM – 6610LV и специального программного приложения Inca-Point получали детальные изображения ее структуры при увеличении до 3000 и более раз, а также проводили полный спектральный анализ [81]. Это достигалось тем, что поверхность образца добавки подвергали облучению электронного зонда, производя сканирование

основных точек поверхности. При этом качество сигнала зондирования зависит от поверхности образца, а результат взаимодействия электронного пучка с точками на исследуемом образце фиксируется специальными датчиками. Исследования проводились в специализированной лаборатории УГНТУ.



Рис. 3.3 – Оборудование для исследования толщины оболочки добавки методом растровой электронной микроскопии

3.3 Исследование свойств цементного камня

3.3.1 Определение характера распределения модифицирующей добавки в цементном камне

Для подтверждения работоспособности интегрированной в цементный раствор модифицирующей добавки были проведены исследования методом неразрушающего контроля, позволившие выявить характер распределения модифицирующей добавки (МД) в общем объеме цементного камня [93].

В лаборатории университета Сэлфорд (Манчестер, Великобритания) при помощи сканирующего оборудования C.T. Scanner (компьютерный томограф), позволяющего осуществлять неразрушающий контроль цементного образца, исследовался характер распределения модифицирующей добавки (МД) в общем объеме цементного камня и оценивались их

количественные характеристики. Сканер позволил увидеть пустоты и примеси, вычислить пористость материала, проницаемость, сделать 3D CAD поверхности сканируемого объекта (см. рис. 3.4).

C.T. Scanner формирует имеджи при помощи комбинации рентгеновских лучей, испущенных под разными углами для построения изображения послойного сечения (виртуальные «ломтики») конкретных областей сканируемого объекта. Для интерпретации изображений используется специальное программное обеспечение.

Для выполнения данного эксперимента были изготовлены образцы камня цилиндрической формы из раствора с водоцементным отношением 0,5, приготовленные из тампонажного портландцемента, содержащего 1,0% модифицирующей добавки.

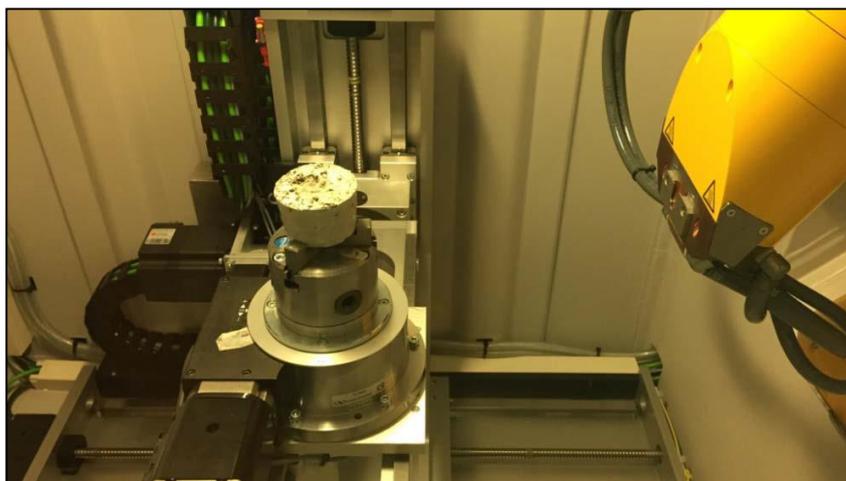


Рис. 3.4 – Процесс сканирования образца цементного камня

3.3.2 Определение прочности и деформации цементного камня при его разрушении

Универсальная испытательная машина для измерения предела прочности образцов при сжатии/изгибе модель E160N (MATEST) применяется при испытаниях на сжатие и изгиб цементных образцов прямоугольной формы 40,1x40x160 мм, выдержанных в воде при определенных значениях температуры и давления во времени в соответствии со стандартами API/ISO. Машина имеет жесткую двухколонную раму, поставляется в комплекте с

нижней нажимной пластиной и стержнем для легкой фиксации приспособления для сжатия. Модель E160N также оснащена цифровыми блоками управления, оборудована двумя датчиками давления, обеспечивающими диапазон измерения 0 – 15 кН для испытаний на изгиб и 15-500 кН для испытаний образцов на сжатие. "Cyber-Plus Evolution" – это цифровой 8-ми канальный блок управления для сбора, отображения, обработки и сохранения данных, полученных в результате испытания. Он работает аналогично стандартному ПК с операционной системой Windows, позволяя задавать и настраивать необходимые параметры, при этом во время испытаний на цветном сенсорном дисплее отображается момент разрушения и нагрузка, при которой происходит разрушение образца.

3.3.3 Определение проницаемости цементного камня

Проницаемость цементного камня определялась на приборе OFITE MODEL 90 CementPermeameter в соответствии с рекомендациями стандартов API Recommended Practice 10B-2/ ISO 10426-2.

Перед испытанием на проницаемость по газу образцы сушат до постоянной массы в сушильном шкафу или эксикаторе. Перед испытанием на проницаемость по жидкости, образцы насыщают водой. Выдерживают образец погруженным в воду до начала испытания. Проницаемость образцов цементного камня по жидкости и по газу рассчитывают по закону Дарси.

Тестер проницаемости цементного камня по газу (азоту) предназначен для измерения газопроницаемости образцов цементного камня (керн) 1” диаметр x 1” длиной. Образец цементного камня (керн) помещается в манжету, которая вводится в «модифицированную» испытательную ячейку «Hassler» (материал – нерж. сталь 316). Расход измеряется 2 калиброванными расходомерами – на высокий и низкий расход. Давление газа на входе в образец регистрируется по стрелочному манометру (диапазон измерения: от 0 до 200 PSI (13,6 атм), цена деления 0,5 PSI, точность 0,25% ВПИ). Давление на выходе – атмосферное [94].

3.4 Выводы к главе 3

1. Обоснован комплекс методик и приборов для анализа свойств модифицирующих добавок для создания «самозалечивающихся» цементов, раствора и цементного камня.

2. Разработан практический способ для исследования скорости растворения твердых веществ.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА «САМОЗАЛЕЧИВАЮЩЕГОСЯ» ЦЕМЕНТА

4.1 Исследование свойств модифицирующей добавки

Исследование свойств модифицирующей добавки включает комплекс исследований, направленных на выбор наиболее подходящего водонабухающего компонента по критериям, предъявляемым как к самому компоненту: дисперсность, способность к водопоглощению, так и к цементному композиту: механическая прочность, проницаемость (см. п. 4.1.1). Комплекс исследований также направлен на создание эффективного оболочного покрытия, отвечающего требованиям механической прочности и водорастворимости (см. п. 4.1.2).

Подбор состава «самозалечивающегося» цемента производился при помощи корректировки компонентного состава цементной смеси. Корректировка состава заключалась в установлении оптимального количества модифицирующей добавки, равномерно распределенной по узлам регулярной решетки цементной матрицы. Теоретические исследования оптимальности количества модифицирующей добавки при заданных свойствах и условиях распределения внутри цементной системы производились при помощи математического моделирования физического процесса, которые подробно описаны в пункте 2.5. Прикладной формат корректировки заключался в следующем: в подготовленный цементный порошок добавлялся один из подобранных водонабухающих материалов, количество которого назначалось с интервалом 0,2%, суммарно добавляемым в цементный раствор до максимально установленной концентрации в 1% (см. п. 2.5, 4.3); из смесей формовались образцы цилиндрической и прямоугольной форм, которые изготавливались и тестировались при условиях, регламентируемых стандартами API/ISO.

4.1.1 Исследование водонабухающего компонента добавки

Для проверки принципиальной возможности применения материалов: полиакриламида (ПАА), водонабухающего полимера (ВНП В-615), полиакрилата натрия (ПАН), сшитого сополимера ПАА, активных гидроизолирующих минеральных добавок и набухающих эластомеров в качестве водонабухающего компонента добавки были изготовлены настроечные испытательные образцы модифицирующих добавок. Далее были проведены исследования кинетики набухания каждого из вышеперечисленных материалов, а также испытания на прочность и определение проницаемости образцов цементного камня, изготовленных с применением вышеперечисленных добавок.

Для исключения преждевременной активации и набухания добавки во время приготовления (затворения и перемешивания) цементного раствора, водонабухающие компоненты покрывались оболочным слоем (см. п. 4.1.2). Методика подготовки добавки описана в п. 3.1.3 главы 3. Обоснование размера гранул приведено в п. 4.2.

Оценка кинетики набухания гранул ПАА (см. рис. 4.1), показала, что оболоченная добавка начала набухать через 2 часа, и далее продолжала в течение 7 часов при максимальном увеличении объема до 150%, по сравнению исходным объемом добавки.

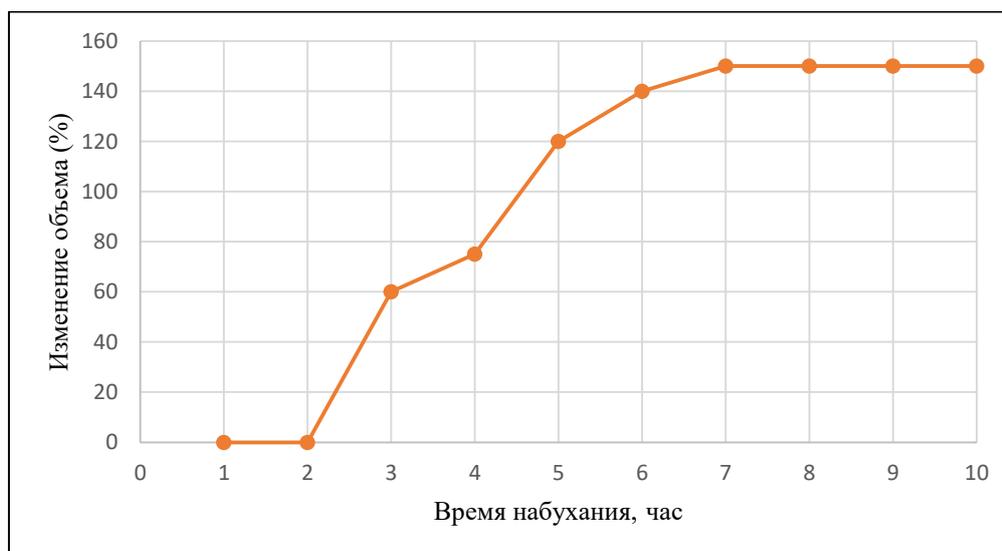


Рис. 4.1 - Динамика набухания ПАА

При определении проницаемости образцов «самозалечивающегося» цемента по газу (азоту) цилиндрические образцы изготавливались и испытывались в соответствии с API RP 10B-2/ ISO 10426-2с. Образец, изготовленный с 1% модифицирующей добавки на основе ПАА при В/Ц=0,5, получил сквозные дефекты, и развалился на части, не достигнув давления газа в 2 атм.

При тестировании образца на изгиб в возрасте 2-х суток, результаты не превысили 3,3 МПа. На рисунке 4.2 представлен снимок образца, на сломе которого визуализируются гелеобразные волокна ПАА, весь образец покрыт слизью, при этом камень обладает неоднородной структурой, замечены средних размеров полости.



Рис. 4.2 - Образцы камня с добавкой ПАА (1%) после испытания на изгиб

Кроме того, дисперсность порошка ПАА, обусловленная концентрацией напряжений, вызывает сложности при его обочивании.

Испытания водонабухающего полимера (ВНП) показали, что степень набухания за первые десять часов достигает 144% от первоначального объема, за первые сутки – 174%, и за 4 суток – 321%, в первые 2-е суток скорость набухания полимера наиболее стремительная, после чего наступает фаза стабилизации (см. рис. 4.3).

Образцы, изготовленные из цемента, модифицированного добавкой ВНП (1%), показали проницаемость равную 0,002 мкм².

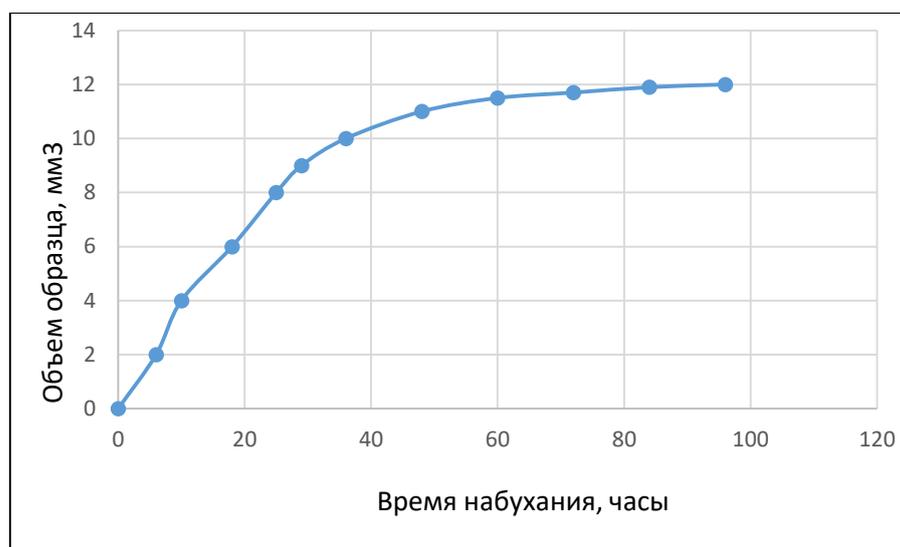


Рис. 4.3 - Динамика набухания ВВП

Прочность образцов в возрасте 2-х суток в воде и 5-ти суток на воздухе составила 7,4 МПа. На рисунке 3.4 видно, что при наложении изгибающей нагрузки, образец сломался не до конца, при этом на трещине визуализируются гелевидные волокна (см. рис. 4.4 а). После 5 суток воздушного твердения волокна высохли, и трещина стянулась (см. рис. 3.4 б).



а) 2-е суток в воде

б) 5 суток на воздухе

Рис. 4.4 - Образцы с добавкой ВВП (1%)

Недостатком данного материала также явилась сложность при создании оболочки на ВВП. Кроме того, дисперсность порошка ВВП, обусловленная концентрацией напряжений, вызывает сложности при его оболочивании и последующее комкование, что сказывается на качестве цементного теста и камня. Концентрация ВВП в объеме 1% излишняя.

Набухание полиакрилата натрия (ПАН) проходит в течение 13 часов, с увеличением объема до 175% (см. рис. 4.5).

Цементный камень, изготовленный из цемента, модифицированного добавкой ПАН (1%), показал проницаемость равную $0,0012 \text{ мкм}^2$, что в несколько раз меньше проницаемости камня с добавкой ВНП, и в десятки раз меньше проницаемости цементного камня без добавок.

Прочность образцов на изгиб в возрасте 2-х суток в воде и 5-ти суток на воздухе составила 9,9 МПа. Добавка ПАН хорошо интегрировалась в цементный раствор и мало заметна на срезе образца цементного камня (см. рис. 4.6).

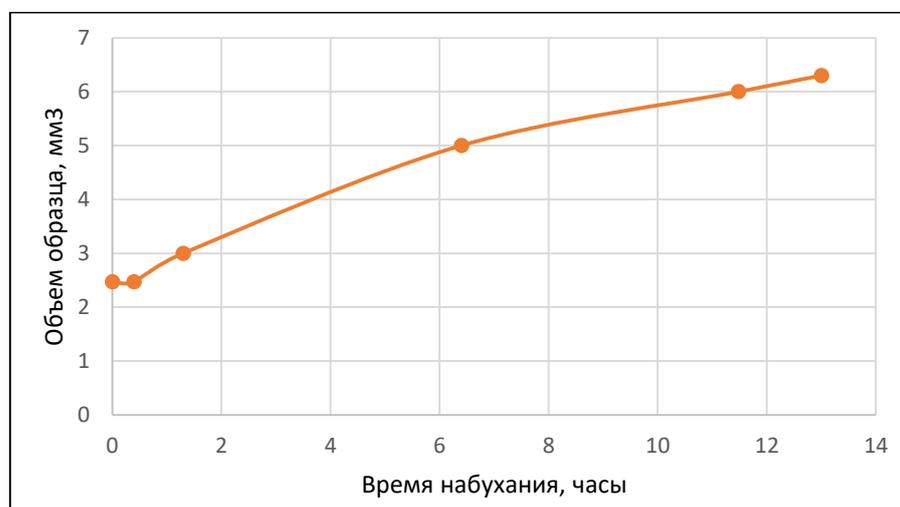


Рис. 4.5 - Динамика набухания ПАН

Недостатком данного материала явилась сложность его оболачивания.



Рис. 4.6 - Образцы с добавкой ПАН (1%)

Гидроизолирующие минеральные добавки (ГМД) были представлены микрокремнеземом. Видимого набухания микрокремнезема не произошло, однако проницаемость образца цементного камня составила 0,001 мкм², а прочность на изгиб в возрасте 2-х суток - 8,4 МПа. Эти результаты объясняются изменением структуры камня при трансформации Ca(OH)₂ в гидросиликаты кальция за счет введенного микрокремнезема.

Недостатками данного материала явились небольшое набухание и сложности при его оболачивании в связи с нано размерами. Кроме того, необходимо регламентировать присутствие ГМД, так как не должно происходить полного связывания Ca(OH)₂, и нарушения условий пассивации обсадной колонны.

Водонабухающие эластомеры (резиновые смеси) показали, что величина их объемного набухания в водной среде может варьироваться, для пресной воды - до 850%, пластовой воды - до 200%. Температурный диапазон применения эластомеров от -30 до +100°C (см. рис. 4.7, рис. 4.8).

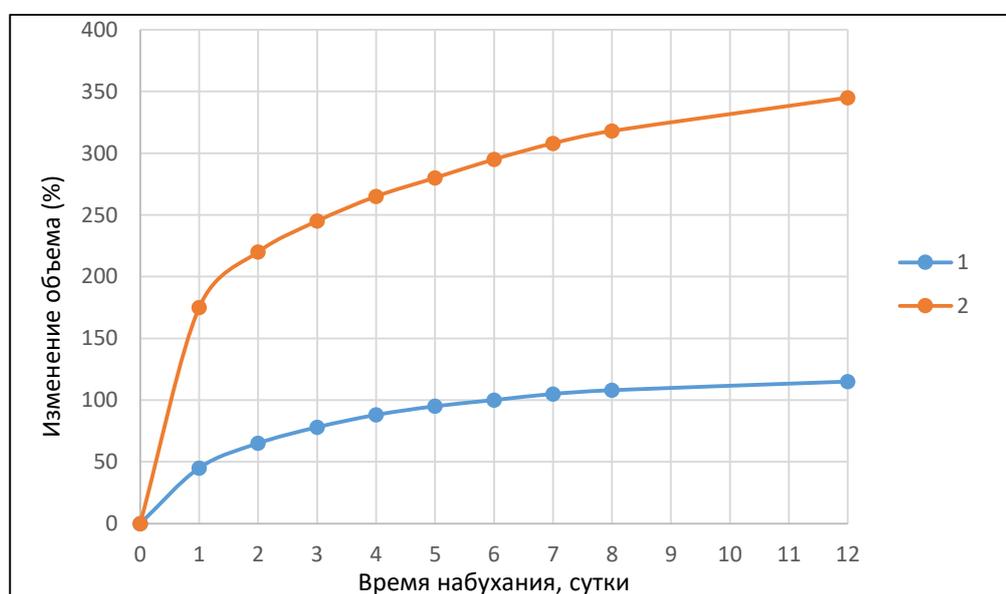


Рис. 4.7 - Динамика набухания образцов резиновых смесей, отличающихся концентрацией модификаторов водопоглощения в пластовой воде с минерализацией 5% при 90 °С

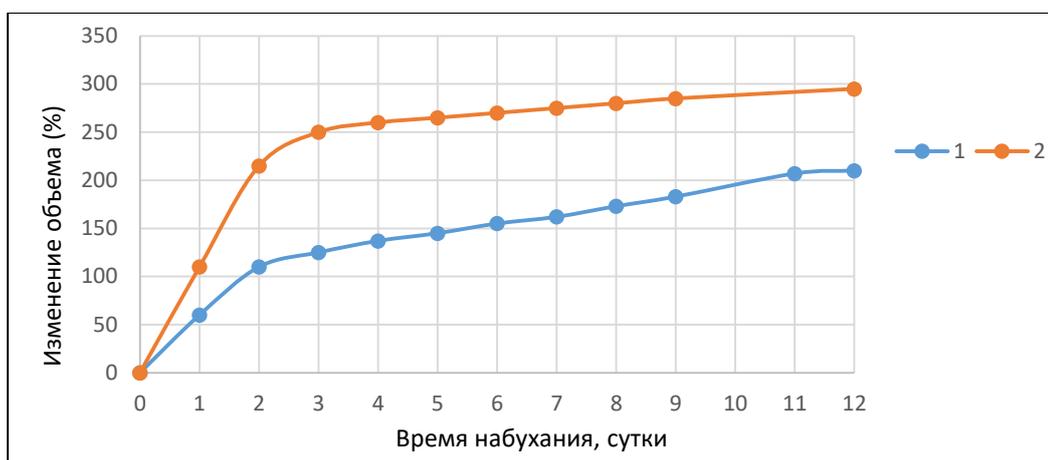


Рис. 4.8 - Динамика набухания образцов резиновой смеси в пластовой воде с минерализацией 25%: 1 - при 22 °С; 2 - при 90 °С

Образцы с добавкой резиновой смеси показали проницаемость равную $0,0014 \text{ мкм}^2$, и прочность на изгиб в возрасте 2-х суток - 7,4 МПа.

Главными недостатками водонабухающих эластомеров (резиновых смесей) явились слабая адгезия с цементным камнем и сравнительно небольшая степень набухания.

На рисунке 4.9 представлена динамика набухания сшитого сополимера АА, суперабсорбента, который абсорбирует большую часть влаги в течение часа. Замечено, что чем меньше размер гранул суперабсорбента, тем больше скорость и объем абсорбции. Полимер легко покрывается оболочкой.

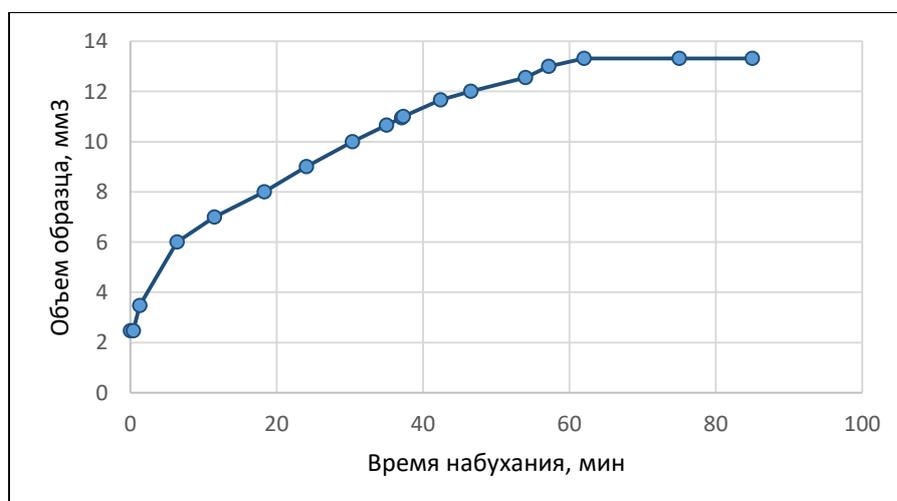


Рис. 4.9 - Динамика набухания суперабсорбента на основе анионного полиакриламида

Наблюдая за динамикой усушки гранул суперабсорбента, в течение 12 суток с момента извлечения прибора ПКН-2 из воды сферы суперабсорбента постепенно уменьшались до размера в 13 мм и держались стабильно в таком размере 1 неделю.

Образцы с добавкой сшитого сополимера АА (1%) показали проницаемость равную 0,0018 мкм², а предел прочности на изгиб, в возрасте 2-х суток составил 8,0 МПа.

Образцы суперабсорбента легко покрываются водорастворимым полимерным комплексом, который способен выдержать растворение в течение 6 часов (см. п.п. 3.1.2.3), и не вызывают сложностей при его интеграции в цементную систему, так как плотность и размер частиц соразмерны частицам цементного порошка.

4.1.2 Исследование водорастворимого компонента добавки

Испытания множества водорастворимых реагентов и их комбинаций показали недостатки их применения в качестве превентивного слоя, способного защитить модифицирующую добавку от ранней гидратации. В связи с чем принципиальной необходимостью стала разработка водорастворимого оболочного комплекса с улучшенными свойствами, такими, как способность регулировать скорость гидратации модифицирующей добавки и повышенная механическая прочность.

При помощи модификации базового раствора из ряда органических полимеров полимером из ряда полисахаридов при воздействии технологического приема стеклования получили полимерный комплекс (ПК) с регулируемыми свойствами, значительно отличающимися от свойств исходных компонентов.

Подвергая приему криоструктурирования, сшивали и упрочняли структуру полимерной композиции. Так, на рисунке 4.10 представлена кинетика растворимости полимерной композиции, приготовленной без каких-

либо дополнительных технологических приемов, на рисунке 4.11 - кинетика растворимости полимерной композиции, подвергнутой криолизу.

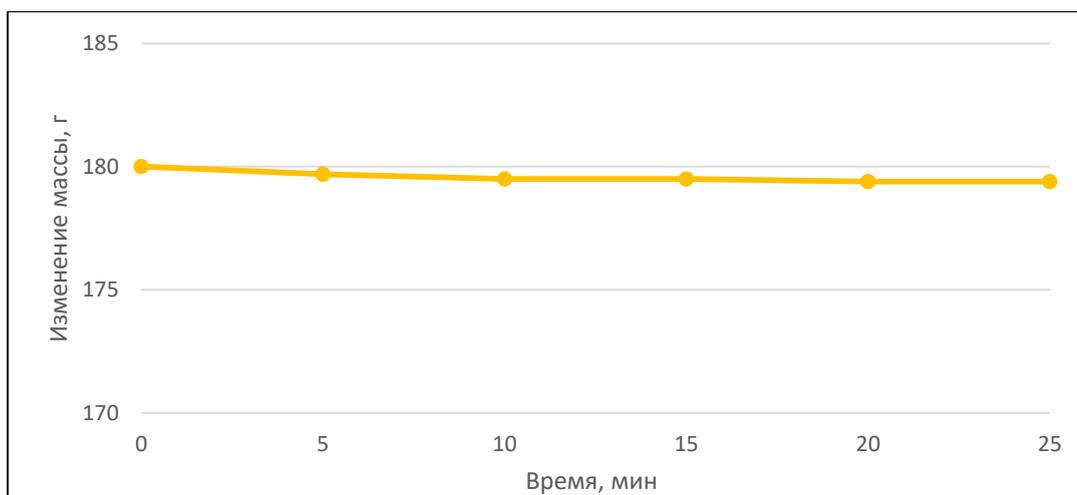


Рис. 4.10 – Кинетика растворимости полимерной композиции

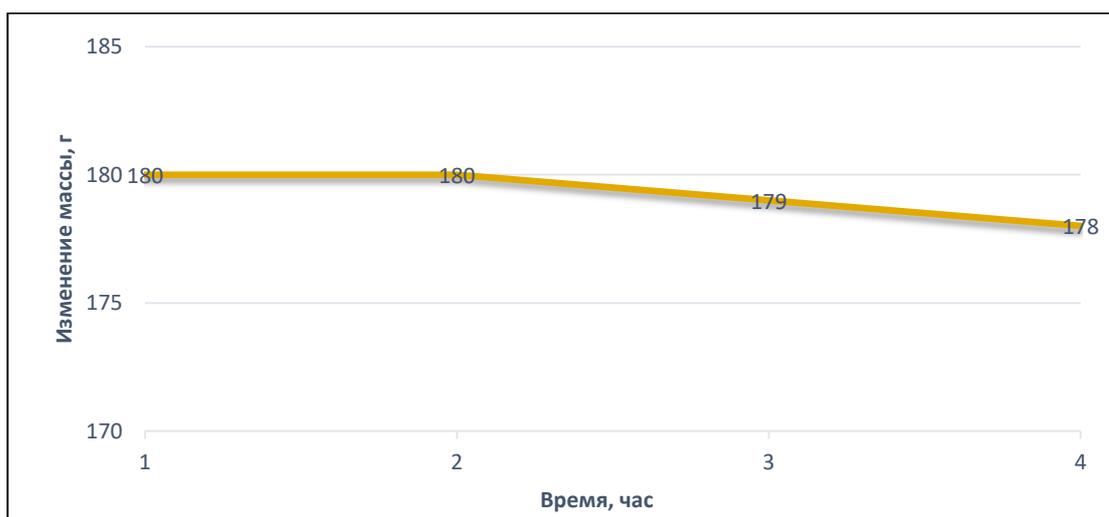


Рис. 4.11 – Кинетика растворимости полимерной композиции после криолиза

Далее в лабораторных условиях были изготовлены рабочие образцы модифицирующих добавок, ядра которых покрывались раствором ПК при помощи технологии, имитирующей структурную грануляцию, т.е. создавались условия распыления раствора на предварительно подготовленные активные ядра при их одновременном запекании во взвешенном состоянии. Данная технология подходит для нанесения пленочного материала на поверхность частиц размерами от 100 мкм до 3 мм. Подвергая воздействию знакопеременных температур, производилось стеклование гранулы.

Для исследования превентивных способностей оболочного слоя (см. таб. 4.1, рис. 4.12) активные водонабухающие ядра были разделены на 3 группы, каждая из групп покрывалась соответственно 1-м/ 2-мя/ 3-мя слоями водного раствора ПК, просушивалась и исследовалась на кинетику растворения/набухания на приборе ПКН конструкции Жигача-Ярова, принцип работы которого основан на определении начального объема образца сухого реагента и объема набухшего образца по мере нахождения его в исследуемой жидкой среде.

Таблица 4.1 – Исследование кинетики растворения многослойного покрытия

Время, час	Растворимость, мм ³		
	1 слой	2 слоя	3 слоя
0	0	0	0
0,5	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0,1	0
3	0,1	0,2	0,2
4	1,0	0,2	0,3
5	1,8	0,3	0,4
6	2,8	0,4	0,6
7	-	0,4	0,7
8	-	3,0	3,0

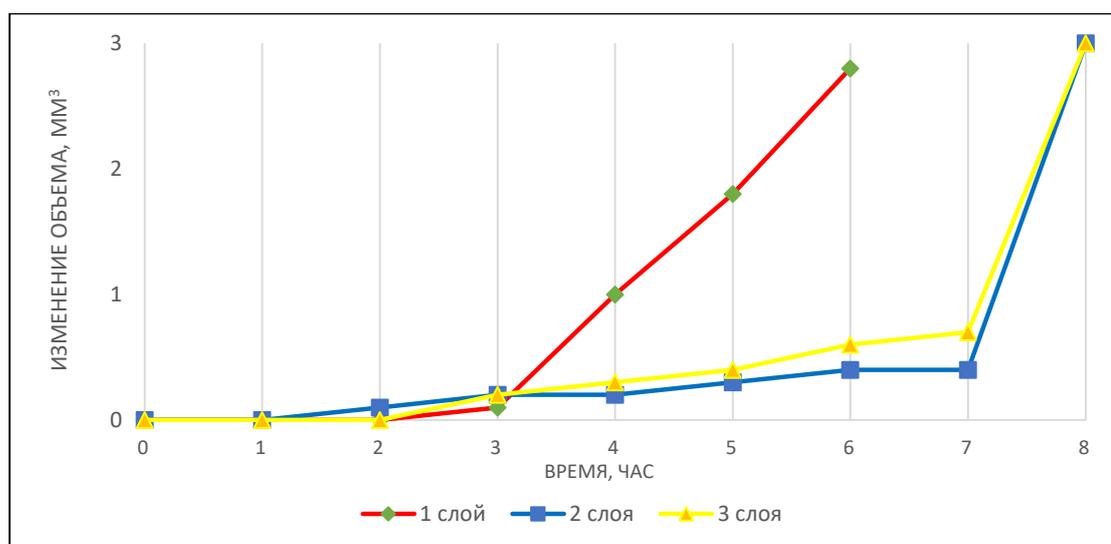


Рис. 4.12 – Оценка превентивных способностей оболочного покрытия

Наиболее адекватные результаты продемонстрировала группа гранул с двухслойной оболочкой, которая после приготовления испытывалась на прочность и подверженность механической деградации при перемешивании в скоростной мешалке, имитирующей процесс затворения и закачивания цементного раствора в скважину (см. таб. 4.2, рис. 4.13).

Таблица 4.2 – Исследование кинетики растворения 2-х слойного покрытия после механической деградации

Время, час	Изменение объема, мм ³
0	0
0,5	0
1	0
2	0,1
3	0,23
4	0,23
5	0,37
6	0,53
7	0,86

Построенные графики растворения оболочки – набухания ядра во времени продемонстрировали увеличение добавки на 30% от исходного размера за 6 часов пребывания в хлоркальциевой воде (см. рис. 4.13), состав которой обоснован в п. 3.1.4 главы 3.

Данные результаты свидетельствуют о том, что добавка, покрытая 2-х слойной оболочкой, обладает высокой механической прочностью, достаточной для сдерживания механической нагрузки, возникающей в процессе затворения и закачивания цементного раствора в скважину.

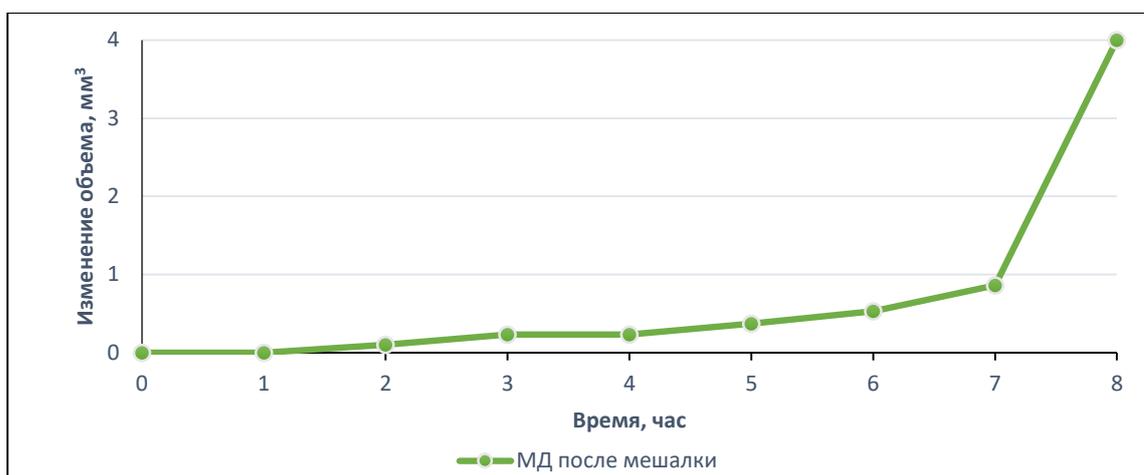


Рис. 4.13 – Оценка превентивных способностей 2-х слойного покрытия после механической деградации

Для определения зависимости скорости растворения оболочного слоя от ее толщины проводилось исследование методом растровой электронной микроскопии. При помощи электронного микроскопа JEOL JSM – 6610LV и специального программного приложения Inca-Point удалось получить детальные изображения структуры добавки при увеличении до 3000 и более раз, а также провести ее спектральный анализ (см. рис. 4.14).

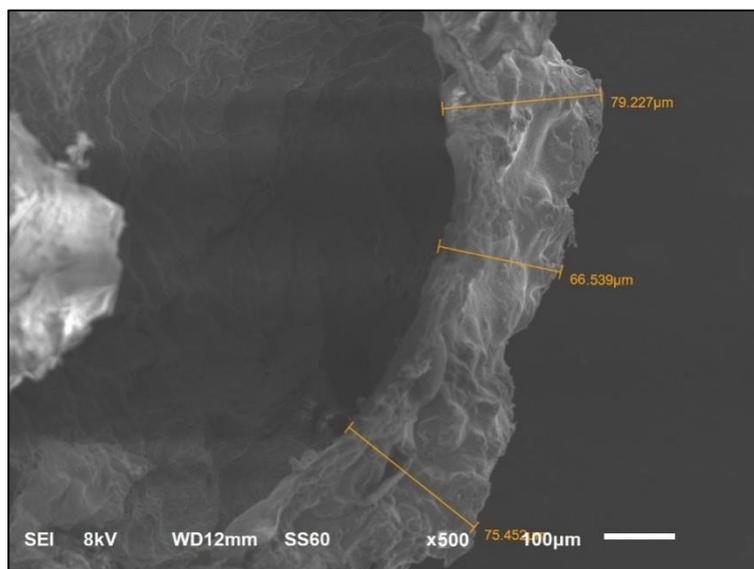


Рис. 4.14 – Исследование многослойной оболочки на срезе добавки

Множественное увеличение изображения частиц, создающих оболочный слой, позволило замерить толщины слоев оболочки, а также при помощи

специального программного приложения определить элементный состав оболочек: КМЦ (Ca, Mg, Zn), ПВС (SiO₂, Al₂O₃, Ti, Fe, CaO, MgO, NaO). Данная информация позволила также косвенно подтвердить предполагаемую толщину однослойной оболочки, которая в среднем равнялась 30 мкм.

Исследование толщины оболочного слоя на электронном микроскопе подтвердило предположение о том, что чем слой толще, тем он прочнее, и тем его растворение протекает дольше по времени (см. рис. 4.12).

4.2 Исследование цементного камня, модифицированного добавкой

Дополнительные исследования цементного камня производились при помощи сканирующего оборудования неразрушающего контроля CT Scanner, которое позволило оценить количественные характеристики и определить характер распределения модифицирующей добавки (МД) в общем объеме цементного камня.

Результаты самых первых опытов по сканированию образцов цементного камня показали необходимость регулирования дисперсности добавки, а также улучшения взаимодействия между гранулами МД и цементным раствором. Слабое распределение и осаждение добавки в нижней части образца свидетельствовало о неправильном подборе концентрации МД в растворе, либо о тяжелом весе и большом размере добавки. В связи с чем, возникла необходимость в регулировании зависимости между прочностью цементного камня и дисперсностью добавки.

Известно, что нагрузка, отнесенная к площади, равна напряжению. Суммируя удельную поверхность всех зерен цемента, выводим, что суммарная площадь будет однозначно больше площади удельной поверхности одного внедренного агента любого размера. Так, например, $20/100=0,5$, но $20/5=4$. Частица с площадью меньшей будет испытывать больше напряжения, чем суммарные частицы, где нагрузка будет распространяться на все зерна. Частица большого размера будет испытывать большее внешнее и внутреннее напряжение, и на ее контакте будет стремиться к его разряжению. Разряжение

будет иметь распространение в горизонтальной плоскости, так как линии концентраторов напряжения идут вертикально, сгущаясь на границах частицы.

Данный факт означает то, что грубодисперсные частицы добавки являются менее эффективными по сравнению с мелкодисперсными, которые лучше удерживаются в растворе, что исключает расслоение и способствует однородности структуры камня. При этом повышается седиментационная устойчивость и улучшается удароустойчивость полученного камня, и чем больше по времени перемешивание – тем больше в цементном растворе образуются продуктов твердения, добавки начинают взвешенно удерживаться в растворе, так как по мере перемешивания начинают взаимодействовать коагуляционные связывающие структуры [93].

Известно, что размер водопроводящих каналов составляет около 100 мкм (по данным компании Шлюмберже) [95], тогда логично, что для эффективной изоляции водопроводящего канала размер набухшей частицы должен превышать эти значения.

Для того чтобы перекрыть канал размером 100 мкм, в цементный камень необходимо внедрить модифицирующую добавку с плотностью примерно равной плотности цементного раствора и размером в пределах размера зерен клинкера, таким образом, предотвратив оседание или всплытие добавки.

При активации водой модифицирующая добавка должна увеличивать исходный размер в десятки раз. В частности, добавка размером в 5 мкм должна обладать степенью набухания 2000%, а при размере в 40 мкм – 250%.

Оценка кинетики набухания показала, что МД набухает в пресной воде, увеличивая исходный объем до 3000%, а в пластовой – до 2000%, что подтверждает способность выбранного модифицирующего агента блокировать максимально возможные водопроводящие трещины.

Поскольку полное растворение оболочки МД и ее активное набухание в контакте с водой начинается только спустя 7 часов (см. рис. 4.13), то этого времени вполне достаточно для завершения процесса формирования

пространственной структуры после начала гидратации цементного раствора. Поэтому можно утверждать, что отрицательного влияния интегрируемой добавки на реологические свойства цементного раствора не происходит. Добавка также не оказывает влияния на раствор в период загустевания, схватывания и набора прочности формирующегося цементного камня, чему в определенной степени способствует равенство (сопоставимость) размеров добавки и зерен цемента.

Результаты последующего сканирования образцов цементного камня с добавками меньшего размера продемонстрировали равномерность распределения МД, что может говорить об оптимальности подобранного количества и плотности добавки, которая удерживалась во взвешенном состоянии до затвердевания цементного раствора (см. рис. 4.15).

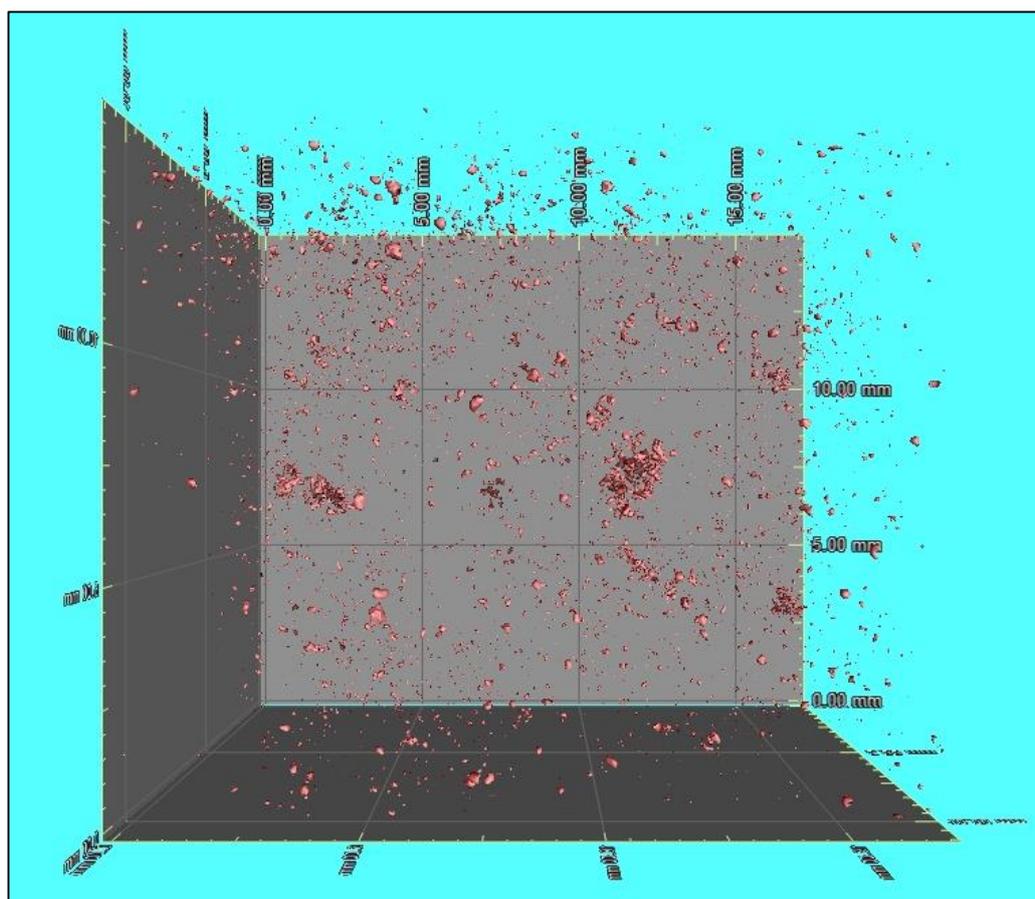


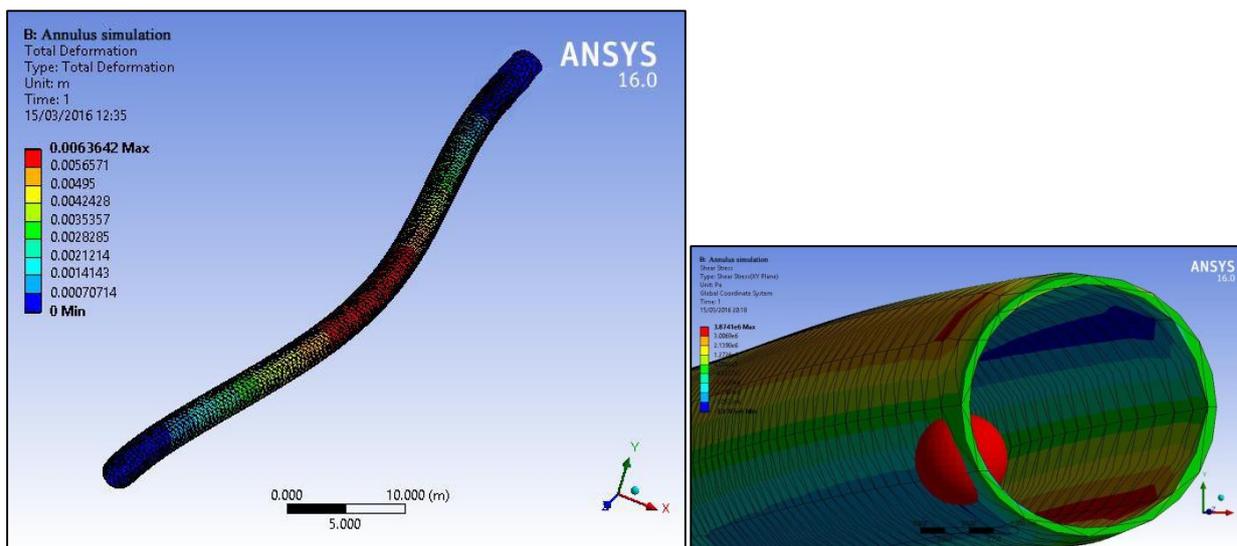
Рис. 4.15 – Распределение модифицирующей добавки в объеме цементного камня

На следующем этапе ставилась задача оценки влияния характера распределения модифицирующей добавки на проницаемость и прочность цементного камня, которая решалась при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в прикладной программе ANSYS, позволившая произвести оценку деформации и напряжения в цементном камне, учитывая гетерогенность его структуры.

Моделирование касательных напряжений на крепь скважины показало, что наибольшие напряжения приходятся на зону приложенной динамической нагрузки и незначительны на периферии вне зависимости от гетерогенности тампонажного материала.

Рисунок 4.16 (а) демонстрирует нагрузку, приложенную к образцу цементного камня, при которой напряжение растет линейно вместе с деформацией до тех пор, пока не начнется развитие микротрещин и разрывов, переходя от линейно-пропорциональной зависимости к нелинейному закону вблизи точки разрушения. Красным цветом на рисунке обозначается место концентрации наибольшего напряжения, когда трещины срастаются между собой и достигают критического размера, в этом случае образец дает трещину, природой возникновения которой является механизм, связывающий напряжение на поверхности раздела с геометрической формой образца.

Рисунок 4.16 (б) демонстрирует величину поглощенной образцом энергии в месте наиболее разнородной структуры камня. Предполагается, что красная точка на рисунке - это место локации осажденной добавки. Данная картина также синхронизируется с тестом прочности, при котором в начальные секунды тестирования образец противостоит инициированию и разрастанию трещин, упруго деформируясь и поглощая энергию разрыва. При дальнейшем увеличении напряжений образец перестает поглощать энергию разрыва, идет раскрытие и разрастание трещин, нагрузка превышает предел механической прочности при необратимости деформационных изменений, в результате чего балка ломается.



а) напряжения в зоне приложения динамической нагрузки; б) деформации от характера распределения добавки

Рисунок 4.16 – Результаты моделирования касательных напряжений на крепь скважины

Однако значения деформации в цементном камне зависят не только от зоны, вида и объема прилагаемой динамической нагрузки, но также от дисперсности, характера распределения добавки в объеме цементного камня, что было также подкреплено результатами лабораторных испытаний по определению предела прочности камня на изгиб (п. 4.1.1). Так, при неравномерном распределении добавки в общем объеме цементного камня, в частности ее сгущении при осаждении, тестирование образцов на прочность на изгиб показало самые низкие результаты (2,35 МПа).

При равномерном распределении добавки в объеме цементного камня работает теория 3D фильтрации, когда вне зависимости от места подхода воды проводящий канал будет заблокирован. На аппаратах для замера проницаемости рабочие агенты газ/вода (API 10B-2/ ISO 10426-2, 1997) подводятся к торцевому краю образца, чаще снизу-вверх, поэтому возможно проверить только линейную фильтрацию через цементный камень. При этом в случае осаждения модифицированной добавки, прибор не покажет реальную картину с возможным подключением каналов воды, например, перетоки из

вышележащих пластов. Однако такой вариант осаждения добавки приемлем для моделирования «залечивания» трещин в призабойной зоне пласта, образовавшихся при перфорации в результате неконтролируемого расползания капиллярных дефектов.

Внимательно изучив процессы автономной работы МД внутри цементной матрицы, были подобраны свойства модифицирующих добавок с учетом их влияния на результирующие свойства цементного камня.

4.3 Обоснование состава «самозалечивающегося» цемента

«Самозалечивающийся» цемент представляет собой тампонажный материал, включающий вяжущее вещество и модифицирующие добавки.

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент тампонажный ПЦТ-I-G-СС-1.

В качестве модифицирующих добавок использовался водонабухающий полимерный материал, изготовленный из гранул суперабсорбента на основе анионного поликриламида [96], покрытых водорастворимой оболочкой полимерного комплекса.

В качестве раствора для приготовления водорастворимой пленки рассмотрены интерполимерные комплексы (ИПК), ранее широко изученные и демонстрирующие успешность применения при создании высокомолекулярных координационно сшитых гелей, симбатность (схожесть) изменения предела прочности и относительного удлинения при разрыве которых играет принципиальную роль в структурообразовании. Таким образом, взяв за критерий оптимальность по признаку физико-механической прочности пленки исследована смесь отдельно приготовленных растворов на основе компонентов карбоксиметилцеллюлозы и поливинилового спирта. Вместе с тем, основываясь на доказательствах советских ученых [97], принимаем за факт интерполимерное взаимодействие в растворах и пленках полисахаридов и полимеров виниловых мономеров. При этом доказательством возможного интерполимерного взаимодействия, сопровождающегося

структурообразованием, послужили результаты исследования зависимостей эффективной вязкости от напряжения сдвига при сдвиговом течении раствора, указывающие на симбатность (схожесть) изменения предела прочности и относительного удлинения при разрыве пленки релятивно компонентного состава смеси полимеров. Вязкость определялась на вискозиметре, предел прочности пленки при растяжении – на разрывной машине. Таким образом, потеря текучести раствора под действием собственного веса (зафиксированная визуально) свидетельствовала об активном структурообразовании. Показано, что увеличение вязкости полимерного комплекса связано с увеличением количества дополнительно образованных водородных связей. Скорость и степень растворимости оболочки зависят от ее толщины, времени контакта, температуры и минерализации пластовой воды.

Процентный состав компонентов «самозалечивающегося» цемента следующий: портландцемент - 99,0-99,5%, модифицирующие добавки – 0,5 – 1,0% [98].

После обоснования состава водонабухающего полимерного материала для изготовления «самозалечивающегося» цемента была произведена опытная партия модифицирующих добавок. Изготовление партии и проведение комплекса экспериментальных исследований по нанесению полимерных покрытий на водонабухающий полимерный материал осуществлено в лаборатории ООО «МИП «Новые решения» [99]. Методика изготовления опытной партии модифицирующей добавки включала предварительную механоактивацию активного водонабухающего ядра и нанесение на него пленочного покрытия аппаратным способом. Поскольку скорость водопоглощения измельченных модифицирующих добавок значительно увеличивается [93], что связано с феноменом механоактивации – приобретением высокой реологической активности при деформации микродефектов, концентрирующих на себе напряжения, для повышения эффективности модифицирующих добавок, они подвергались

дополнительному помолу в лабораторном дезинтеграторе при скоростях соударения 150 м/с [7].

4.4 Контрольные испытания «самозалечивающегося» цемента

Комплекс исследований раствора и камня «самозалечивающегося» цемента, включающий изучение основных показателей реологических, прочностных и фильтрационных свойств, произведен в лаборатории крепления скважин ООО НПП «Буринтех» [100].

Испытания опытной партии «самозалечивающегося» цемента проводились в соответствии с нормативной документацией на тампонажные материалы (ГОСТ 26798.1-5/6/8/9, ISO 10426-2/10, ГОСТ 1581-96, ГОСТ 310.3, ТУ 5734-014-55839907-2017).

Согласно протоколу проведенных испытаний, соответствующих ТУ 5734-014-55839907-2017 [100], получены результаты испытаний двух тампонажных материалов (таблица 4.4), отличающиеся наличием модифицирующей добавки.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний тампонажных материалов в лаборатории крепления скважин ООО НПП «Буринтех»

Наименование показателя	Фактическое значение	
	ПЦТ-1-50 (ОАО Сухой Лог)	Исследуемый материал
1. Плотность, г/см ³	1,84	1,86
2. Водно-смесевое отношение	0,5	
3. Растекаемость тампонажного раствора, мм	210	197
4. Водоотделение тампонажного раствора, мл	2,8	1
5. Водоотдача при температуре 24°С, мл/30 мин	1150	50
6. Прочность цементного камня при изгибе, при температуре 24°С, МПа: - через 3 суток твердения	2,7	8,0

- через 7 суток твердения	3,8	6,8
- через 14 суток твердения	4,1	5,2
7. Проницаемость (2 сут), мД	87,5	1,7
8. Сроки схватывания, ч-мин:		
- начало	4-10	4 - 40
-конец	5-10	5 - 50

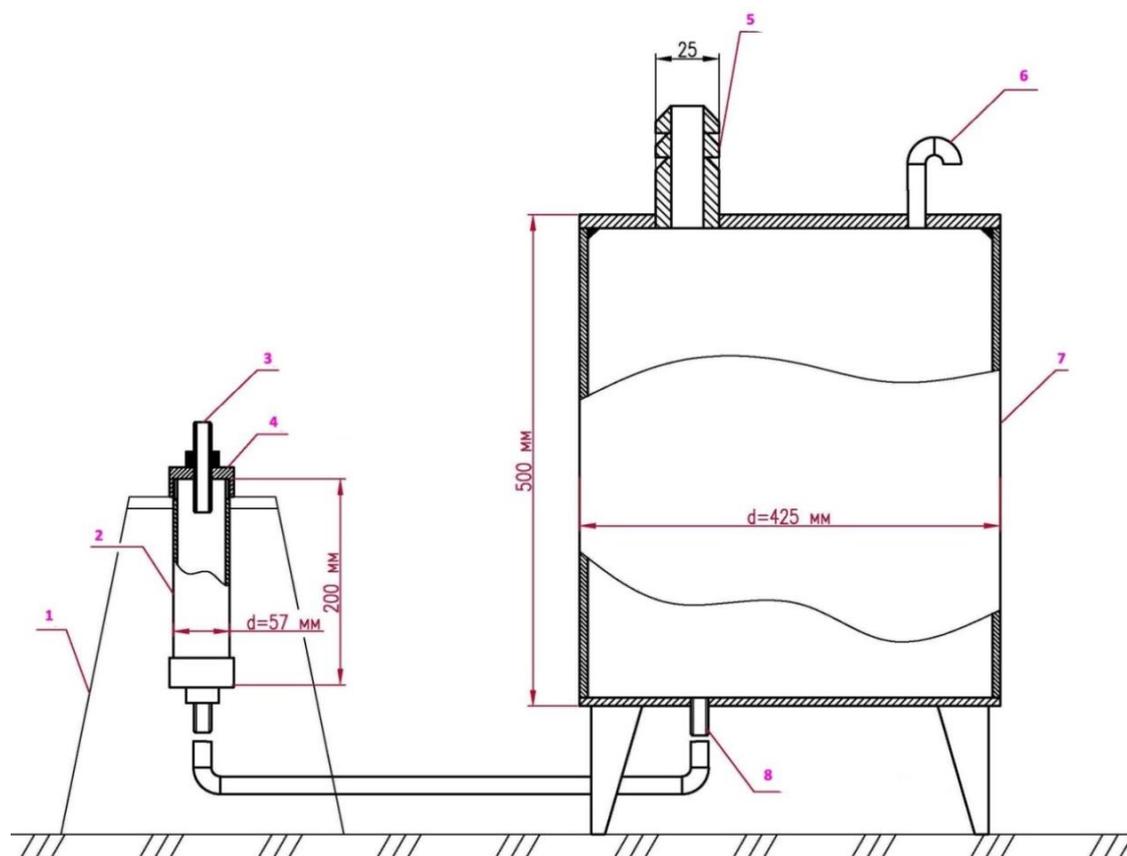
Проведенный комплекс исследований раствора и камня «самозалечивающегося» цемента, показал полное отсутствие влияния набухающих добавок на реологические свойства цементного раствора во время затворения, процессов загустевания и схватывания. Испытания также показали, что набухающие добавки не ухудшают механические свойства цементного камня. Введение набухающей добавки значительно снижает проницаемость цементного камня, вплоть до полной остановки фильтрации [100].

4.5 Проведение натурального эксперимента на стендовом оборудовании

Для проверки состоятельности концепции и предложенной рецептуры по приготовлению «самозалечивающегося» цемента была разработана методика с применением стендового оборудования, которая позволила исследовать фильтрационные свойства модифицированного добавками цементного камня, а также изучить влияние модифицирующей добавки на технологические свойства цементного раствора и цементного камня [90].

С целью проведения наиболее приближенного к скважинным условиям эксперимента было разработано специальное стендовое оборудование (см. рис. 4.17), которое представляло собой циркуляционную систему, выполненную в виде установленного на опоре герметично закрытого цилиндрического корпуса постоянного давления, и рабочего цилиндра. Цилиндрический корпус выполняет функции напорной емкости, снабженной на верхней крышке дыхательным патрубком с перекрывающим краном и

патрубком для подключения к компрессору, к нижней крышке приварен патрубок, подсоединяющийся гибкой трубой к рабочему цилиндру. На обеих торцевых поверхностях рабочего цилиндра установлены гайки с отверстиями для резьбового штуцера, один из которых отведен на манометр, а другой - служит для обвязки с напорной емкостью [90].



1 – рама для крепления рабочего цилиндра, 2 – рабочий цилиндр, 3 – резьбовой штуцер, 4 – гайки с отверстием для штуцера, 5 – патрубок для подключения компрессора, 6 – дыхательный патрубок, 7 – напорная емкость, 8 – патрубок для соединения гибким шлангом напорной емкости с рабочим цилиндром.

Рис. 4.17 - Установка для исследования фильтрационных свойств тампонажного раствора [90]

Методика проведения стендового эксперимента заключалась в следующем: из герметично закрытой напорной емкости под установленным давлением от компрессора рабочий агент (вода) нагнетался через гибкий

шланг в рабочий цилиндр, заполненный модифицированным тампонажным раствором и выждавшим ОЗЦ, при этом фиксировался объем вошедшей и профильтрованной через камень жидкости [90].

По данным работ [95, 52] усредненный градиент давления прорыва воды по заколонному пространству составляет около 2,8 МПа/м. Французские ученые в своих исследованиях по разрушению цементного кольца показывают, что при существующих динамических нагрузках современная скважина подвержена перепаду давления от 1,4 МПа/м до 5,3 МПа/м [95].

Отечественные ученые в своих работах показали, что цементное кольцо начинает разрушаться при перепаде давления в 2 МПа/м [7]. Принимая данный факт во внимание, и учитывая конструктивные особенности рабочего цилиндра, а именно его длину, рассчитывали давление, которое необходимо подать компрессором для имитации давления водопрорыва, т.е. равное 0,4 МПа.

Для проведения натурального эксперимента использовалась изготовленная опытная партия модифицирующей добавки, которая затем интегрировалась в установленной пропорции в портландцемент тампонажный для приготовления цементного раствора.

Перед использованием опытная партия прошла контрольное исследование кинетики растворения/набухания гранул на приборе ПКН конструкции Жигача-Ярова, которое подтвердило предъявленные к ней требования, далее приступили к выполнению стендового эксперимента. В первую очередь произвели обвязку стендового оборудования и опрессовку на давление, превышающее рассчитанное давление водопрорыва на 50%. Убедившись в исправности оборудования, приступили к приготовлению раствора «самозалечивающегося» цемента, рассчитав объем в соответствии с объемом рабочего цилиндра. Раствор был получен затворением водой в соотношении 1:2 «самозалечивающегося» цемента, представляющего собой порошок портландцемента с интегрированными в него гранулами модифицирующего агента, полученными в ходе изготовления опытной

партии. Заполнив рабочий цилиндр цементным раствором, данный узел поместили во влажные условия на ОЗЦ в течение 24 часов, затем камень оставили на хранение в течение суток над водой и суток на воздухе.

С целью физического моделирования процесса трещинообразования в цементном камне, рабочий цилиндр с цементным камнем внутри подвергался механическому воздействию, нагружаясь до образования системы трещин при помощи пневмомолота. После создания искусственных трещин в цементном камне, рабочий цилиндр обвязали с циркуляционной системой. Циркуляционная система была запущена включением компрессора с постепенным доведением давления нагнетания воды до 4 атм. (см. рис. 4.18).



Рис. 4.18 – Стендовое оборудование

Повествуя о воде, необходимо отметить, что в качестве рабочего агента использовалась пластовая вода, попутно добытая с месторождений Республики Башкортостан.

Вода гидрокарбонатного типа, имеющая степень минерализации до 1 г/л из скважины глубиной 2173 м, расположенной на Узыбашевской площади, вскрывшей намюр-серпуховские отложения. Отбор в интервале перфорации 1453-1571 м, $T_{пл}=25$ °С.

Вода хлоркальциевого типа со степенью минерализации до 262,33 г/л из скважины глубиной 1420 м, расположенной на Шелкановском месторождении, вскрывшей Турнейские отложения. Отбор в интервале перфорации 1379,6 – 1387,6 м, $T_{пл}=23$ °С.

Исследование пропускной способности цементного камня, модифицированного добавками, производилось поочередным пропуском пластовой воды под давлением.

Провели сравнительный анализ водопроточной способности трех образцов цементного камня, первый из которых модифицирован «самозалечивающими» добавками фильтровал воду гидрокарбонатного типа; второй – модифицирован «самозалечивающими» добавками фильтровал воду хлоркальциевого типа; третий - цементный камень из бездобавочного цемента фильтровал пресную воду. При этом было замечено следующее: при фильтрации пластовой воды минимальной степени минерализации и повышенной температуры (60°С) через образец из «самозалечивающегося» цемента происходило максимально быстрое растворение превентивной оболочки и максимальная активация водонабухающего ядра. Время, за которое установился режим фильтрации жидкости, равнялось 6 часам, при этом расход воды составил 150 мл/мин. Спустя еще 9 часов, в динамике уменьшения расхода фильтрующейся воды, произошло полное прекращение фильтрации (см. рис. 4.19). При этом был отмечен скачок давления на манометре, который превысил 4 атм. При росте давления нагнетания воды до 6 атм. отмечено, что срыв блокирующего агента из водопроводящего канала не произошел. Таким образом, можно утверждать, что, находясь в порах цементного камня, водонабухающая добавка, обернутая водорастворимой оболочкой, жестко закрепляется в порах, и не вымывается фильтрующейся под давлением водой.

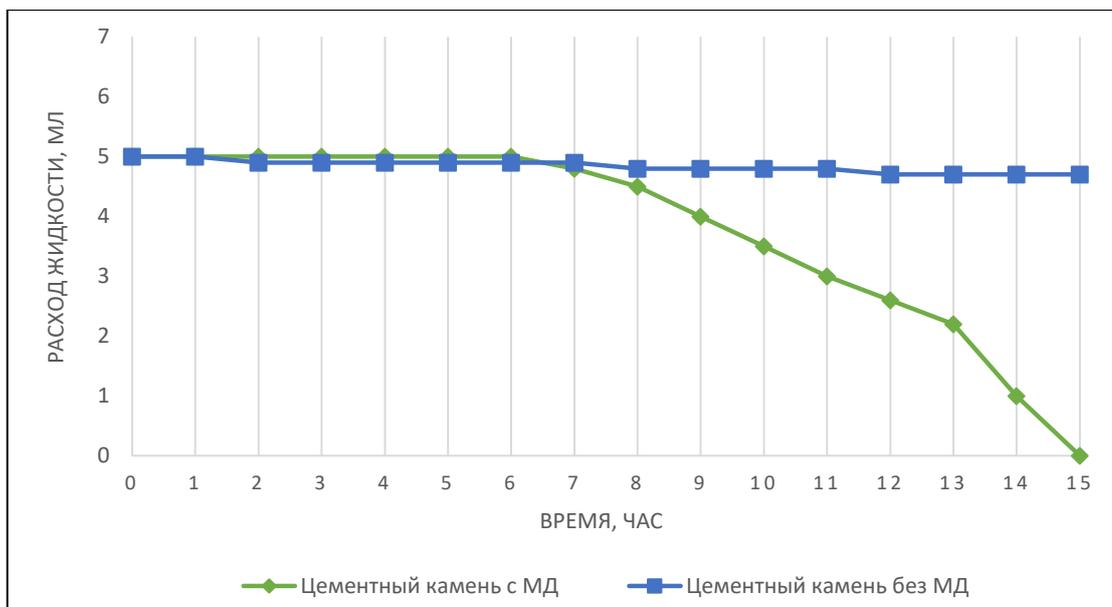


Рис. 4.19 – Исследование фильтрации пластовой воды через образцы ЦК при температуре 60 °С и минимальной степени минерализации

При фильтрации пластовой воды максимальной степени минерализации и низкой температуры (20°С) через образец из «самозалечивающегося» цемента происходило растворение превентивной оболочки с минимальной скоростью и минимальной активацией водонабухающего ядра. Время, за которое установился режим фильтрации жидкости, равнялось 10 часам, при этом расход воды составил 150 мл/мин. Спустя еще 12 часов, в динамике уменьшения расхода фильтрующейся воды, произошло полное прекращение фильтрации (см. рис. 4.20). При этом был отмечен скачок давления на манометре, который превысил 4 атм. При росте давления нагнетания воды до 6 атм. отмечено, что срыв блокирующего агента из водопрводящего канала не произошел.

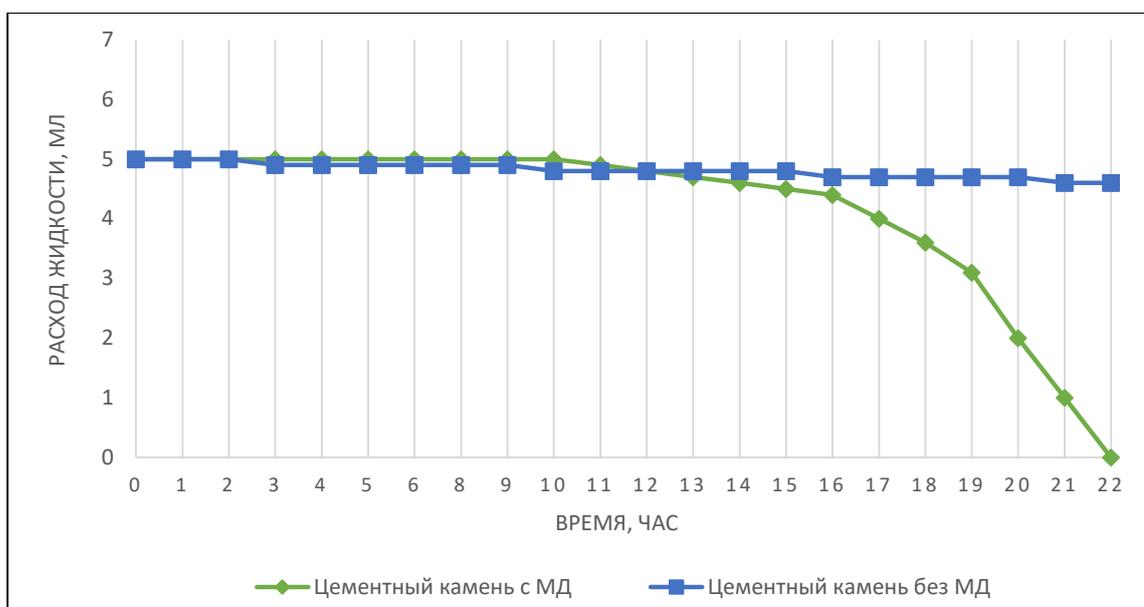


Рис. 4.20 – Исследование фильтрации пластовой воды через образцы ЦК при температуре 20 °С и максимальной степени минерализации

Третий образец был изготовлен из бездобавочного цемента, при этом замечено, что при установившемся режиме фильтрации количество входящей жидкости была равна количеству жидкости, профильтрованной через цементный камень. Расход воды через пористую среду составил 150 мл/мин.

Следует отметить, что в камне, модифицированном добавками, за 8 часов (12 часов для холодной пластовой воды) установившейся фильтрации было связано 75% воды, при этом 25% воды камень пропускал последующие 7 часов (10 часов для холодной пластовой воды) до полной остановки фильтрации воды. Общее время с момента начала гидратации камня до полной остановки фильтрации воды составило 15 часов (22 часа). В камне из бездобавочного цемента зарастание трещин не произошло даже по истечению нескольких суток, при этом по истечению указанного времени в свободной циркуляции оказалось 92,5% воды, и только 7,5% воды было связано непрогидратировавшим ранее микрокремнеземом, находящемся изначально в составе цементного клинкера.

Из исследований влияния температуры раствора и степени минерализации на активаторные механизмы суперабсорбента известно, что в

горячей (от 60 °С) пресной воде в течение 1 часа наблюдается максимально быстрое водопоглощение с увеличением гранулы суперабсорбента на 550% от первоначального объема (см. рис. 4.21).

В горячей (от 60 °С) минерализованной воде в течение 1 часа наблюдается максимальное водопоглощение с увеличением гранулы на 490% от первоначального объема (см. рис. 4.21).

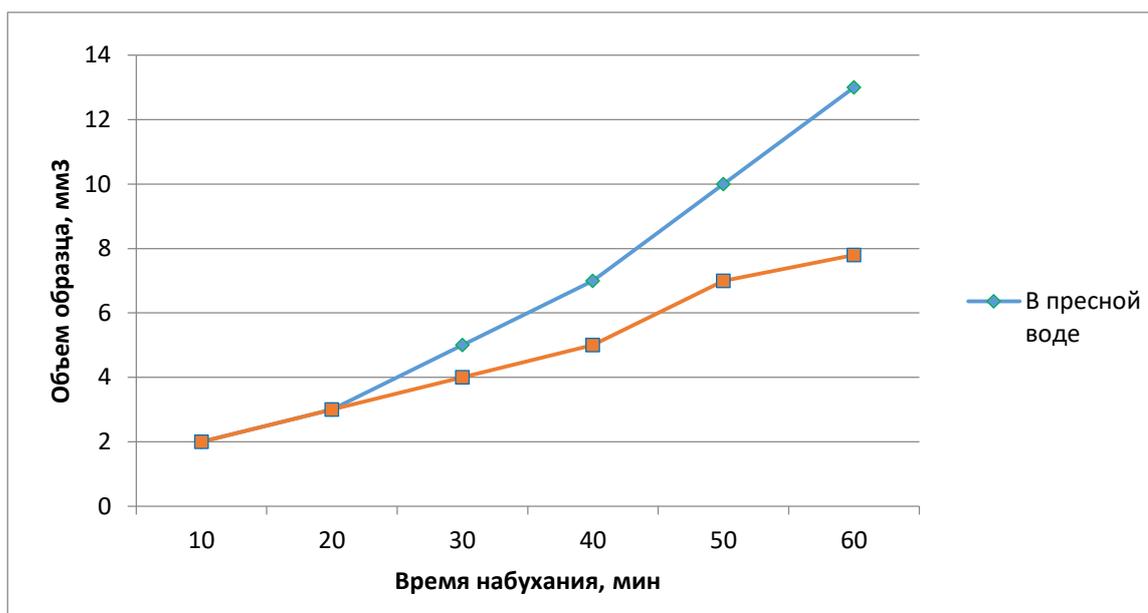


Рис. 4.21 - Динамика набухания суперабсорбента в горячем растворе (от 60 °С)

В холодной (до 22 °С) пресной воде в течение 1 часа наблюдается максимально быстрое водопоглощение с увеличением гранулы суперабсорбента на 100% от первоначального объема (см. рис. 4.22).

В холодной (до 22 °С) минерализованной воде в течение 1 часа наблюдается максимальное водопоглощение с увеличением гранулы на 40% от первоначального объема (см. рис. 4.22).

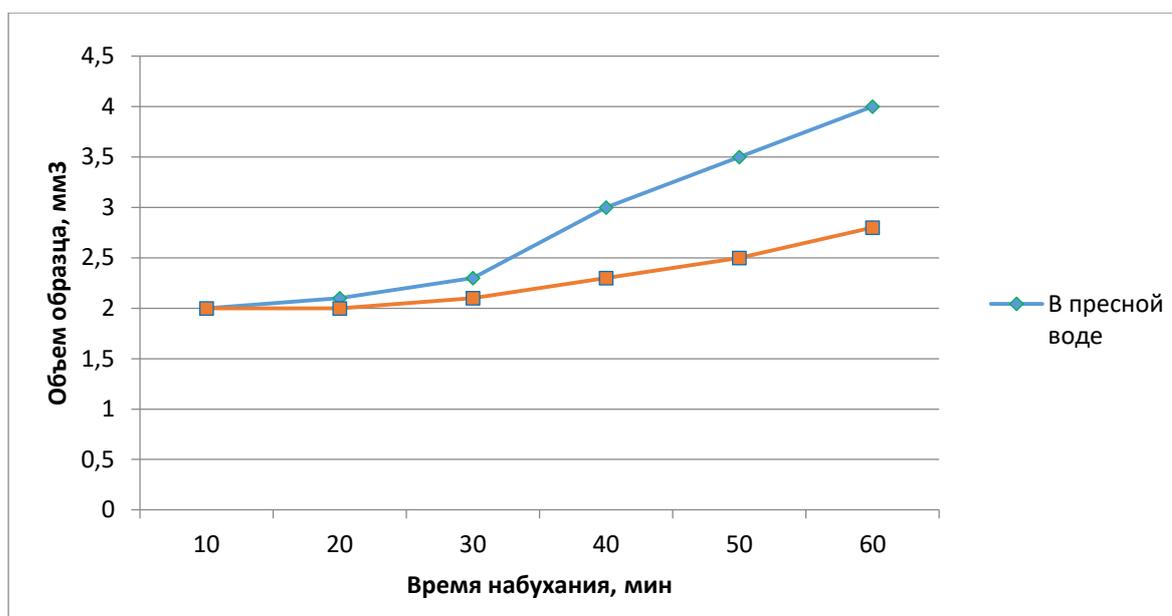


Рис. 4.22 - Динамика набухания суперабсорбента в холодном растворе (до 22 °C)

Из полученных графиков (см. рис. 4.21, рис. 4.22) следует, что скорость абсорбции гранул суперабсорбента зависит от температуры раствора, в котором они находятся. Также выяснилось, что скорость поглощения воды от 60°C и выше ограничивается некоторым максимальным значением, определяющим структуру суперабсорбента. При погружении гранулы в кипяток происходит ее постепенное разрушение. Ухудшению абсорбирующих свойств суперабсорбента способствует повышенная минерализация воды, что приводит к невозможности достижения максимально возможного размера гранулой.

Произведена также попытка оценить размер порового канала, принимая во внимание фильтрацию пластовой воды с постоянным расходом через условный капилляр и поры межгранулярной пористости цементной матрицы.

Проницаемость жидкости при фильтрации через капилляр оценивается из соотношения уравнений Дарси и Пуазейля:

$$Q = \frac{k \times F \times \Delta p}{\mu \times L}, \quad (4.1)$$

$$Q = \frac{R^2 \times F \times \Delta p}{8\mu \times L}, \quad (4.2)$$

Откуда:
$$k = \frac{R^2}{8}, \quad (4.3)$$

Где k – проницаемость породы, m^2 ;

F - площадь фильтрации, m^2 ;

Δp – перепад давления, Па;

μ - вязкость, Па·с;

L – длина, м;

D - диаметр капилляра, м.

После преобразования коэффициента проницаемости и радиуса капилляра к одной размерности получим эмпирическое уравнение для оценки коэффициента проницаемости при фильтрации жидкости через капилляр:

$$k = 0,125 R^2, \quad (4.4)$$

$$F = \pi R^2, \quad (4.5)$$

Перед тем, как подставить известные значения всех параметров в уравнение Дарси и выразить из него радиус капилляра, необходимо перевести их в систему [СИ].

$$\frac{\Delta p}{L} = 2 \text{ МПа/м} = 2 \cdot 10^6 \text{ Па/м};$$

$$\mu_{\text{пл.в.}} = 1,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$Q = 150 \text{ мл/мин} = 2500 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q = \frac{0,125 R^2 \times \pi R^2 \times \Delta p}{\mu \times L}; \quad (4.6)$$

$$2500 \cdot 10^{-9} = \frac{0,125 R^2 \times \pi R^2 \times 400}{1,8 \cdot 10^{-3} \times 0,2}; \quad (4.7)$$

$$R^4 = 5,7326 \cdot 10^{-15};$$

$$R = 0,000275 \text{ м} = 0,275 \text{ мм};$$

$$D = 0,55 \text{ мм}.$$

Вычислив максимальный диаметр капилляра (либо суммарную величину капилляров) участвующего в фильтрации, следует вывод о том, что

данный поровый канал относится по величине к сверхкапиллярным, а значит, движение жидкости происходит свободно, без какого-либо влияния капиллярных сил.

Объем водопроводящего канала, имеющего форму правильного цилиндра, можно вычислить по следующей формуле, подставив известные значения:

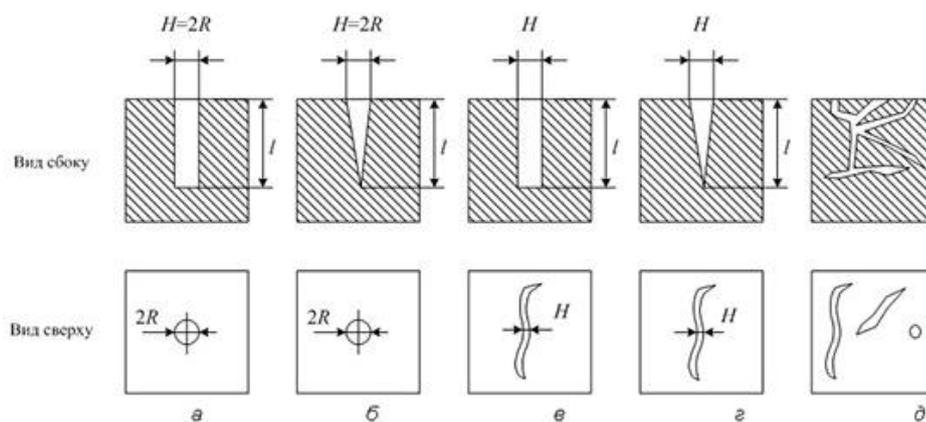
$$V = F \cdot h = \pi R^2 h; \quad (4.8)$$

$$V = 47,5 \text{ мм}^3.$$

Отсюда следует вывод, что модифицирующая добавка в процессе ее гидратации в условиях высокой степени минерализации раствора и умеренной температуры жидкости способна перекрывать проводящие каналы с площадью сечения до $0,237 \text{ мм}^2$ и диаметром до $0,55 \text{ мм}$. Таким образом, можно утверждать, что разработанная модифицирующая добавка, имеющая размер в диапазоне размера частиц зерен клинкера, обладает необходимым потенциалом для перекрытия каналов в 500 мкм в условиях умеренных температур и высокой степени минерализации пластовой воды.

Исходя из вопросов о состоятельности добавки в перекрытии каналов различной величины и вариативности ее расположения, была поставлена задача по определению модели каналов, для которых наиболее предпочтительным будет применение «самозалечивающихся» добавок.

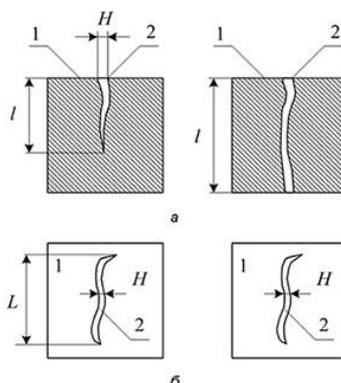
Капиллярные дефекты, возникающие в цементном камне при проведении технологических операций внутри обсадных колонн или коррозии цементного камня, можно условно подразделить на следующие виды: поры, имеющие сечение близкое к окружности; трещины с параллельными стенками в виде щели; трещины с непараллельными стенками конического сечения; трещины, имеющие произвольную геометрию (см. рис. 4.23) [101].



а) цилиндрическая пора; б) коническая пора; в) трещина с параллельными стенками; г) трещина с непараллельными стенками; д) трещина произвольной геометрии

Рис. 4.23 – Основные виды капиллярных дефектов в цементном камне

Как известно образование любого канала, характеризуемого длиной, шириной (раскрытие несплошности) и глубиной, обозначает трещину. При этом различают тупиковые (замкнутые) и сквозные трещины (см. рис. 4.24).



а) тупиковая и сквозная трещины вид сбоку б) тупиковая и сквозная трещины вид сверху

Рис. 4.24 – Характеристика трещин

На рисунке 4.24 (а) слева обозначена тупиковая трещина, которая имеет только один выход на поверхность, на 4.24 (б) справа изображена сквозная трещина, которая имеет два выхода на поверхность.

Однако, часто дефекты в цементном камне в виде трещин, образовавшиеся в результате усталостного разрушения цементного камня, перфорационных работ, избыточной водоотдачи, или объемной усадки

представляют собой смешение различных моделируемых каналов, сообщающихся и не сообщающихся между собой.

Причем наиболее опасными, с точки зрения герметичности крепи скважины, являются сквозные поры и капилляры, поэтому для «самозалечивающихся» цементов активатором набухания добавки должна быть вода (нижняя, верхняя, подошвенная), прорывающаяся по образовавшимся каналам и приводящая к обводнению скважинной продукции.

Таким образом, предполагается, что наиболее предпочтительными каналами для локального размещения модифицирующей добавки и последующего блокирования пор этой добавкой будут сквозные открытые трещины. Естественно, это не исключает эффективной работы добавки в других каналах, и предполагается, что нет ограничения по ее применимости по видам проявления негерметичности крепи скважин.

На рисунке 4.25 представлено изображение образца цементного камня, снятое при помощи компьютерной томографии в лаборатории университета Сэлфорд, на котором визуализируется гранула модифицирующей добавки, после активации блокировавшая сквозной водопроводящий канал.



Рис. 4.25 – Компьютерная томография цементного камня, модифицированного «самозалечивающимися» добавками

При помощи спектрального анализа, выполненного на оборудовании неразрушающего контроля CTScanner, получен снимок (см. рис. 4.26) того же образца цементного камня со сквозным водопроводящим каналом,

демонстрирующий количественный и качественный состав диагностируемого образца согласно спектру взаимодействия разнородных веществ с излучением, присутствующих в данном образце. Так, синим цветом обозначены частицы цемента и гомогенные ему включения. Зеленым цветом обозначено место локализации прогидратировавшей модифицирующей добавки. Транзиентная спектральная зона обозначает локализацию сухих гранул модифицирующей добавки, не нашедших контакт с водой.

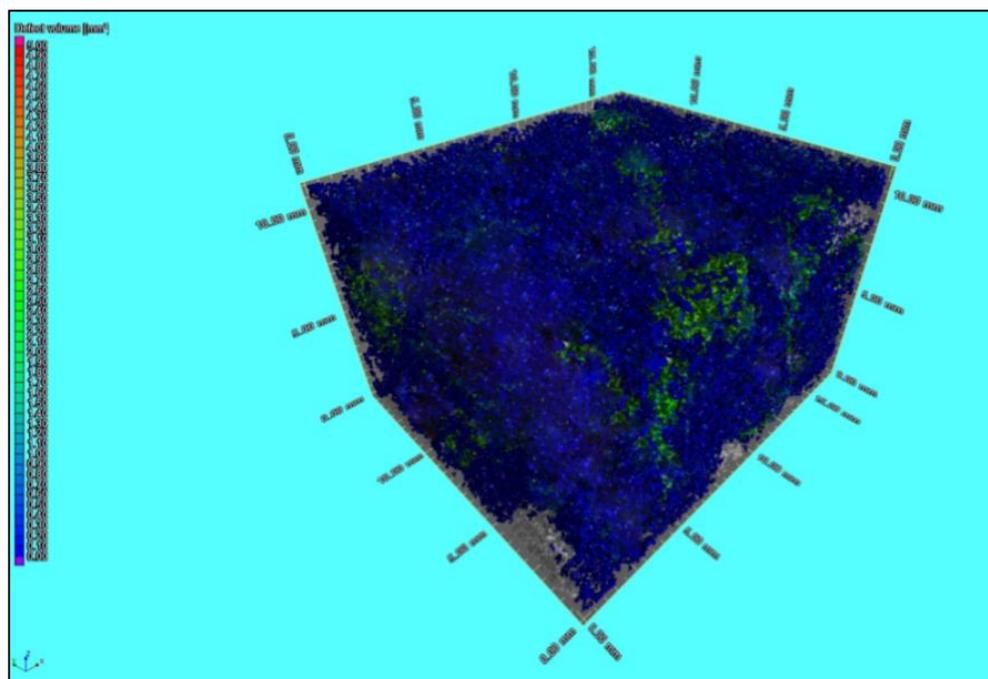


Рис. 4.26 – Спектральный анализ цементного камня, модифицированного «самозалечивающими» добавками

4.6 Модельный промышленный эксперимент

С целью тестирования «самозалечивающегося» цемента в полевых условиях был смоделирован и проведен мелкомасштабный промышленный эксперимент, позволивший досконально исследовать функциональную активность нетрадиционной тампонажной системы и пронаблюдать ее поведение в реальных пластовых условиях. Так, на земельном участке, отведенном под испытательный полигон, с местоположением в ХМАО-Югра согласно Договору №01-В с ООО «Геосфера» была пробурена водозаборная скважина на глубину 300 м для эксплуатации вод атлымского водоносного

комплекса. Конструкция скважины и нижеописанный порядок работ в процессе ее строительства, включавший бурение под кондуктор, бурение под эксплуатационную колонну, вскрытие водоносного горизонта осуществлялись соответственно заявленным в Паспорте Акта №1 выполненным работ по бурению водозаборной скважины [102]. Кондуктор и эксплуатационная колонна цементировались в одну ступень по технологии прямого цементирования с подъемом тампонажного раствора плотностью $1,83 \text{ г/см}^3$ на основе цемента ПЦТ1-50 (ГОСТ 1581-96) до устья. Согласно техническому заданию интервал вскрытого на всю мощность водоносного горизонта цементировался «самозалечивающимся» цементом [98] с перекрытием кровли водоносного горизонта на 6 м.

После ОЗЦ фильтровой колонны скважина углублялась при помощи желонки ударно-канатным способом для сооружения отстойника. Для создания фильтрующей части в интервал скважины, расположенный напротив водоносного горизонта, спускался гидроперфоратор АП-6М на колонне труб, снабженный гидромониторными насадками. Производилась перфорация стенок скважины путем подачи насосным агрегатом через колонну труб и гидромониторные насадки гидроперфоратора абразивной жидкости под давлением. После завершения перфорационных работ проводилось опробование скважины. Для вызова притока пластовой воды и промывки фильтров от вымытого и осевшего шлама был смонтирован ходовой эрлифт. В роли водоподъемных труб использовались буровые штанги. В скважину непрерывно заливалась чистая вода, одновременно подавался воздух на эрлифт. После подъема уровня воды в скважине ходовой эрлифт извлекался, вода в скважине откачивалась. Далее интервал вскрытого водоносного горизонта на 7 суток перекрывался пакером.

Геофизические исследования проводились сразу после проходки и промывки разведочного ствола скважины и кавернометрии. Целью проведения геофизических исследований являлось детальное расчленение геологического разреза, и выбор интервала установки рабочей части

фильтровой колонны. Они включали в себя комплекс методов стандартного каротажа и радиоактивный каротаж.

Для проведения геофизических исследований использовался автомобиль-геофизическая лаборатория с электроприводом лебедки ЛГ-500 с каротажным одножильным либо трехжильным кабелем КГЛ 1-3. Для выявления водяных пропластков выполнялся стандартный электрокаротаж методом КС.

Согласно техническому заданию интервал вскрытия водоносного горизонта +50 м исследовался при помощи малогабаритного глубинного расходомера (МГР-2) с целью установления затрубной циркуляции жидкости, негерметичности и мест нарушения обсадной колонны, межпластового перетока жидкости. Так, термометрия скважины выполнялась в обсаженном невскрытом стволе, на 1-е сутки, на 3-е сутки и на 7-е сутки после перфорации (рисунок 4.27).

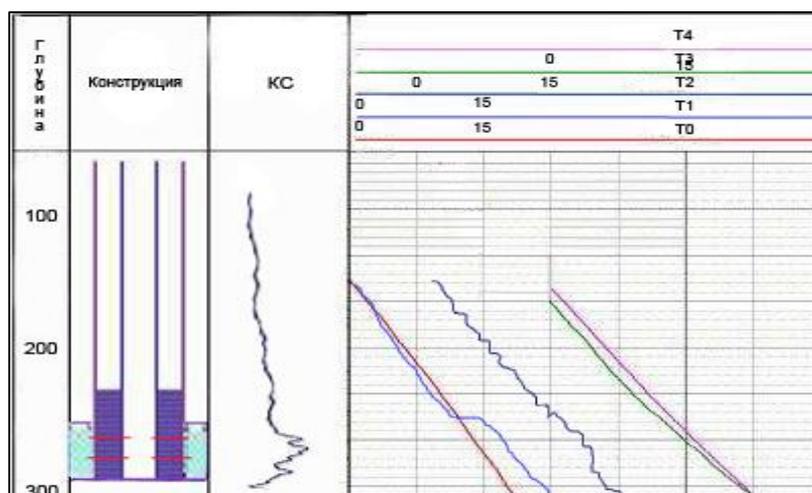


Рис. 4.27 – Термограмма водозаборной скважины

В результате проведения термометрических исследований в обсаженном стволе наблюдалось закономерное повышение температуры до 15°C к отметке забоя. После проведения перфорации в 1-й день зафиксировано отклонение термограммы в зоне вскрытого водоносного пласта, что отражает тепловое возмущение, вызванное притоком воды из горизонта. Проведение термокаротажа на 3-й день и получение извилистой кривой отражает наличие

и интенсивность циркуляции воды в заколонном пространстве, по всей видимости, нашедшей негерметичность в результате сооружения отстойника. На 7-й день термометрия показывает значительное снижение интенсивности, а затем выполаживание значений тепловых колебаний, что связано с отсутствием притока воды на расстоянии фиксированного замера от изначальной термограммы, принятой за нулевую. Данные особенности поведения кривых термографического анализа связываются с применением «самозалечивающегося» цемента, использованного в качестве тампонажного материала для перекрытия интервала залегания водоносного горизонта.

Отсюда следует, что натурный эксперимент с применением стендового оборудования, а также модельный промышленный эксперимент продемонстрировали фактическую ликвидацию водоперетоков и свидетельствуют о восстановлении герметичности цементного камня, исследованного во времени.

4.7 Перспективы применения «самозалечивающегося» цемента

Основной целью исследований была разработка тампонажной системы, способной автономно изолировать водопроводящие каналы и восстанавливать герметичность заколонного пространства. Проведенные исследования доказали, что предложенные модифицирующие добавки, способные поглощать воду, кратно увеличивают свой объем, тем самым блокируя водопроводящий канал.

Разработанный тампонажный материал для повышения качества крепления скважин на основе портландцемента и внедренных в его состав модифицирующих добавок, перспективен в качестве технологии «самозалечивания» с целью селективного крепления наиболее опасных участков с точки зрения герметичности крепи скважины, которыми являются участки скважины, вскрывшие нефтеносные пласты, подстилаемые водоносными горизонтами (нижние воды), либо имеющие в наличии промежуточные воды, либо водоносные горизонты, залегающие выше

нефтеносного пласта (верхние воды). Таким образом, обеспечивая локальное размещение «самозалечивающегося цемента» в областях потенциально опасных с точки зрения образования сквозных открытых трещин, приводящих к заколонным циркуляциям, производится закладка специального тампонажного материала, готового при появлении свободной воды приступить к автономному восстановлению герметичности крепи скважины.

«Самозалечивающийся» цемент также рекомендуется для восстановления герметичности затрубного пространства путем установки цементных мостов с помощью пакера-ретенера (рисунок 4.28).

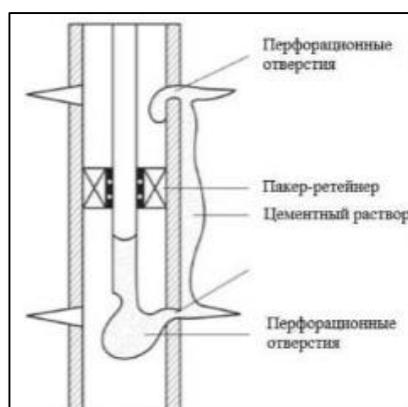


Рис. 4.28 – Схема установки цементного моста с помощью пакера-ретенера

4.8 Экологическая безопасность и экономическая эффективность

Эко-ориентированность данной технологии заключается в применении экологически безопасных материалов, а также в обеспечении технологического процесса, исключая какое-либо негативное воздействие на окружающую среду. Так, элиминация тяжелой ремонтной техники из ремонтного процесса позволяет предотвратить выбросы в атмосферу загрязняющих веществ - продуктов сгорания при сжигании горюче-смазочного топлива. Отсутствие рабочей бригады, исключение транспортировки оборудования и материалов не допускает риск спонтанного вредоносного воздействия на локальный ареал с характерными видами растений и животных. В том числе предупреждение шумового и

вибрационного загрязнения во время проведения внутрискважинных операций, несущих опасность отрицательного воздействия на биоту.

Экологическая безопасность применяемых материалов, в частности добавки, подтверждается ее, в первую очередь, регулируемой во времени химической инертностью за счет заточения в превентивную инактивную оболочку, исключаящую коррозионную активность добавки.

Проведены экспериментальные работы по выявлению деструктивных реакций полимеров, рассмотрены факторы, приводящие к нежелательным изменениям в структуре полимеров при их эксплуатации в скважинных условиях. Так, изучены влияния повышенных температур, давления, механической нагрузки, влажности, минерализации, а также возможные ионные реакции.

Касательно температурных ограничений, постепенное разрушение гранулы полимерного ядра происходит при температурах от 100°C, а также при прямом и длительном воздействии солнечных лучей, что не предусмотрено условиями ее эксплуатации.

Дискутируя на тему давления всестороннего обжатия, действующего на добавку и способного ее смять внутри камня, можно предположить, что оно будет минимальным, так как в процессе твердения цементного камня гидростатическое давление на пласт будет снижаться за счет зависания раствора и контракции объема активно гидратирующего цементного материала.

Эксперименты по определению кинетики набухания полимеров с предварительным погружением добавки в минерализованную среду с применением лопастной механической мешалки, работающей на максимальных скоростях, показали, что добавка, покрытая многослойной оболочкой, обладает высокой механической прочностью, достаточной для сдерживания механической нагрузки, возникающей в процессе затворения и закачивания цементного раствора в скважину.

Ухудшению абсорбирующих свойств добавки способствует повышенная минерализация воды, что приводит к невозможности достижения максимально возможного размера гранулой, однако это не влияет на срок службы материала. Говоря о синерезисе, то усыхание и водоотдача выбранного водонабухающего полимера возможна при условии повышения температуры, увеличения концентрации электролита в системе, введения в систему десольватирующих агентов и повышения подвижности элементов коагуляционной структуры. В связи с тем, что цементный камень работает в условиях замкнутости системы, то при сохранении условий гигрометрического равновесия явление синерезиса с последующим возобновлением водоперетока исключено.

Далее необходимо упомянуть наличие ионов солей, присутствующих в природных водах. Так, Cl^- является беспокоящим в данном случае анионом-активатором коррозии. Однако выбранный флокулянт не вступает в коррозионную реакцию, находясь в контакте с хлоркальциевыми водами, более того отлично абсорбирует органические примеси, в частности гуминовые вещества, при этом полимер не влияет на рН воды.

Высказываясь на тему экономических издержек, в целях рационального подхода «самозалечивающимся» цементом предлагается цементировать обсадную колонну не на всю длину, а лишь интервалы, перекрывающие область контакта нефтеносного и водоносного пластов. Так, приобретение материала для изготовления «самозалечивающегося» цемента с целью бандажирования 18 м интервала 146 мм фильтровой колонны над ПЗП обошлось в 40 тыс. руб. Основная же идея уменьшения издержек заключается в сокращении числа эпизодов РИР, количество которых при удачном стечении обстоятельств достигает как минимум пяти за период амортизации нефтяной скважины. Следует отметить, что за время эксплуатации водозаборной скважины, участвовавшей в модельном промышленном эксперименте, не возникло необходимости в проведении водоизоляционных работ по причине отсутствия заколонных перетоков.

Для однозначной констатации рентабельности представленной технологии необходимо проанализировать ее технологическую эффективность при работе на добывающей нефтяной скважине, включающую анализ данных по дополнительной добыче нефти за счет снижения обводненности.

Применение «самозалечивающихся» цементов даст увеличение прибыли благодаря исключению простоев скважины во время КРС и дополнительной добычи нефти посредством ограничения обводненности за счет устранения заколонных перетоков. Все перечисленные факторы в итоге позволят снизить себестоимость добываемой нефти и добиться значительного экономического эффекта.

4.9 Выводы к главе 4

1. Динамика набухания сшитого сополимера АА демонстрирует поглощение большей части влаги в течение первого часа, с увеличением начальных размеров до 3000% в течение 2 часов. Образцы цементного камня с добавкой сшитого сополимера АА (1%) показали проницаемость равную 0,0018 мкм², а предел прочности на изгиб, в возрасте 2-х суток составил 8,0 МПа.

2. Добавка, покрытая 2-х слойной оболочкой, обладает высокой механической прочностью, достаточной для сдерживания механической нагрузки, возникающей в процессе затворения и закачивания цементного раствора в скважину.

3. Управляемое высвобождение инкапсулированного агента внутри цементной матрицы достигается путем методичности приготовления и технологичности нанесения оболочного слоя, которые заключаются в модификации базового полимерного раствора, криоструктурировании полимерного комплекса, распылении в псевдоожигженном слое и стекловании.

4. Отсутствие влияния модифицирующей добавки на реологические свойства цементного раствора, механические и фильтрационные свойства

цементного камня в течение 6 часов от момента затворения реализуется за счет регулирования скорости растворения превентивной оболочки.

5. Ухудшению абсорбирующих свойств модифицирующей добавки способствует пониженная температура и повышенная минерализация воды, что приводит к невозможности достижения максимально возможного размера гранулы.

6. Разработанная модифицирующая добавка, имеющая размер в диапазоне размера частиц зерен клинкера, обладает необходимым потенциалом для перекрытия каналов в 500 мкм в условиях умеренных температур и высокой степени минерализации пластовой воды.

7. Увеличение количества водонабухающих гранул более 1% сильнее снижает проницаемость камня, однако негативно сказывается на его прочности. При уменьшении количества водонабухающих гранул менее 0,5 % залечивания пор не происходит.

8. Модифицированной добавкой в цементном камне за 8 часов (12 часов для холодной пластовой воды) установившейся фильтрации было связано 75% воды, остальные 25% воды связано за последующие 7 часов (10 часов для холодной пластовой воды) до полной остановки фильтрации воды.

9. Модифицирующая добавка в условиях умеренных температур и фильтрации высокоминерализованного раствора способна надежно удерживаться в порах цементного камня и перекрывать водопроводящие каналы с площадью сечения до 0,237 мм² и диаметром до 0,55 мм.

10. Исходя из вариативности расположения добавки, обоснована модель канала для наиболее предпочтительной локализации модифицирующей добавки с целью наиболее эффективной демонстрации «самозалечивающего» эффекта, это - сквозные открытые трещины.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснованы принципы и требования для получения «самозалечивающегося» тампонажного цемента, заключающиеся в модифицировании тампонажного цемента путем введения в его состав добавок, которые активируются и приобретают способность к перекрытию трещины в цементном камне после взаимодействия с посторонней водой. Ядро модифицирующей добавки представляет собой водонабухающий полимер, покрытый водорастворимой оболочкой, приготовленный по специальной технологии.

2. Разработан активный водонабухающий агент. Обоснованы размер, плотность и вес частиц добавки, которые после интеграции в цементную систему химически инертны к ней. Показано, что мелкодисперсная добавка, размер которой не превышает 40 мкм, плотность 1400 кг/м³, вес 0,0468 мкг улучшает седиментационную устойчивость раствора, повышает однородность структуры, способствует ее равномерному распределению в матрице цементного камня при условии соблюдения установленных параметров добавки (концентрация 1% при максимальном размере добавки в 40 мкм). При образовании системы трещин и поступлении пластовой воды, интегрированные водопоглощающие добавки при контакте с последней, входят в фазу растворения превентивной многослойной оболочки и начинают набухать, тем самым заполняя весь объем полости, после чего фильтрация воды через цементный камень прекращается.

3. Разработан водорастворимый оболочный комплекс для регулирования скорости гидратации добавки. Отсутствие влияния модифицирующей добавки на технологические свойства тампонажного раствора и цементного камня достигнуто покрытием активного водонабухающего ядра в многослойную оболочку, эффективность которой обеспечивается толщиной в 30 мкм и ее действием в течение 7 часов, что гарантирует химическую инертность добавки при гидратации цемента в период его загустевания. Управляемое высвобождение инкапсулированного

агента внутри цементной матрицы достигается за счет взаимодействия внешней щелочной воды с оболочкой водорастворимого полимера.

4. Разработан способ активации модифицирующих добавок и механизм изоляции водопроводящего канала, заключающиеся в запуске водопоглотительного механизма добавок, работающих по принципу осмоса, в результате контакта с посторонней водой существующего заколонного перетока. При этом производится изоляция водопроводящих каналов размерами от 50 до 150 мкм, которая обеспечивается очаговым блокированием водопроводящих путей разбухшими добавками, способными абсорбировать количество воды до 500 раз больше своей массы.

5. Получена рецептура «самозалечивающегося» цемента на основе разработанных модифицирующих добавок, представляющих собой водонабухающие гранулы, покрытые водорастворимой оболочкой полимерного комплекса, которые проходят предварительную механоактивацию и последующее нанесение пленочного покрытия аппаратным способом, после чего добавки интегрируются в сухой порошок портландцемента и равномерно распределяются в нем.

6. Разработана технология повышения качества крепления скважин на основе тампонажного цемента и внедренных в его состав модифицирующих добавок, заключающаяся в селективном креплении наиболее опасных с точки зрения герметичности участков крепи скважины, перекрывающих интервалы контакта нефтеносных и водоносных пластов. Обеспечивая локальное размещение «самозалечивающегося» цемента в областях вероятного образования сквозных открытых трещин, приводящих к заколонным циркуляциям, производится закладка специального тампонажного материала, готового при появлении свободной воды приступить к автономному восстановлению герметичности крепи скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Токунова Э.Ф. Химия тампонажных и промывочных растворов: учеб. пособие / – СПб.: ООО «Недра», 2011.-268 с.
2. Овчинников В.П., Аксенова Н.А., Агзамов Ф.А., Нагарев О.В. Заканчивание скважин, учебное пособие / Тюмень, 2011. – 452 с.
3. Агзамов Ф.А., Самсыкин А.В., Губайдуллин И.М., Тихонов М.А., Семенов С.Ю., Мулюков Р.А. Моделирование динамических воздействий на крепь скважины на основе метода конечных элементов // Нефтегазовое дел. научн. техн. журн. Том 9, № 4, 2011, С. 18-24.
4. Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Каримов Н.Х., Мавлютов М.Р. Повышение долговечности тампонажного камня в агрессивных флюидах нефтяных и газовых скважин. – Издание Самарского филиала секции «Строительство» РИА / Самара, 1998. - 272 с.
5. Агзамов Ф. А., Измухамбетов Б. С. Долговечность тампонажного камня в коррозионно-активных средах. СПб.: ООО «Недра», 2005. - 318с.
6. Поляков В.Н., Ишкаев Р.К., Лукманов Р.Р. Технология заканчивания нефтяных и газовых скважин. – Уфа: ТАУ, 1999. – 408 с.
7. Исмагилова Э.Р., Агзамов Ф.А. Разработка добавок в «самозалечивающиеся» цементы для восстановления герметичности цементного кольца нефтяных и газовых скважин// НТЖ «Бурение и Нефть». Москва, 05.2016 г., т. 5, №1. - С. 36-41. – 102 с.
8. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. Учебник. Изд. 3. — М.: Недра, 1982. — 311 с.
9. В.Г. Бедрин, В.А. Стрижнев, В.И. Никишов. Первые результаты работы Системы Новых Технологий в области ремонтно-изоляционных работ//Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть», 1-2007. С.14-17. 72 с.

10. Г.А. Ланчаков, Р.А. Ивакин, В.Г. Григулецкий. О материалах для ремонтно-изоляционных работ газовых и нефтяных скважин // Научно-технический сборник «Вести газовой науки», актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов. Часть II. 2011. - 52-68 р.

11. Boyun Guo, Xuehao Tan. Petroleum Production Engineering (Second Edition), 2017, p.503-511.

12. LeNeveu D.M., Walton F.B., Tait J.C., Sheppard M.I., Haug K. Роль верхнего слоя геосферы в смягчении поверхностных выбросов CO₂ в сценариях утечки из стволов скважины// NaturalResourcesCanada, CANMET EnergyTechnologyCentre – Devon, 2006

13. Клещенко И.И., Зозуля Г.П., Ягафаров А.К., Овчинников В.П. Теория и практика ремонтно-изоляционных работ в нефтяных и газовых скважинах. Учебное пособие. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. - 386 с

14. Зозуля Г.П. Теория и практика выбора технологий и материалов для ремонтно-изоляционных работ в нефтяных и газовых скважинах / Г.П. Зозуля, И.И. Клещенко, М.Г. Гейхман и др. – Тюмень: ТНГУ, 2002. – 123 с. 9.

15. Ланчаков Г.А. Повышение эффективности ремонтноизоляционных работ на скважинах Уренгойского месторождения / Г.А. Ланчаков, А.Н. Дудов, В.И. Маринин и др. – М.: ВНИИОЭНГ, 2005. – 104 с.

16. FUTUR – технология активного цементного камня, каталог Шлюмберже от 09.2008 г.

17. Р.Р. Кадыров. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: Методы ограничения водопритока при строительстве и эксплуатации скважин, Бугульма – 2009.

18. Н.Н. Ефимов. Технологии ОВП в нефтяных скважинах и пути повышения эффективности РИР // Инженерная практика. – 2011. № 7.

19. Девятов В.В., Алмаев Р.Х., Пастух П.И. и др. Применение водоизолирующих химреагентов на обводненных месторождениях Шаимского района. - М.:ВНИИОЭНГ, 1995. - 100 с.

20. Сафонов Е.Н., Алмаев Р.Х. Применение водоизолирующих химических реагентов // Нефтяное хозяйство. -1996. - №2. - С.44-46.

21. Байкова Е.Н., Муслимов Р.Х. Опыт применения технологий ограничения водопритока и ремонтно-изоляционных работ в трещиноватых карбонатных коллекторах. Георесурсы. 2016. Т. 18. № 3. Ч. 1. С. 175-185.

22. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Физико-химическое регулирование фильтрационных потоков в нефтяном пласте гелеобразующими системами / Материалы III Междунар. Конф. по химии нефти. Томск, 2-5.12.1997. Т.2. - С. 5-6.

23. Телин А.Г., Скороход А.Г., Зайнетдинов Т.И. Разработка новых гелеобразующих систем на основе хлористого алюминия /Нефтепромысловое дело. -1998. № 7-8. - С.11-14.

24. О.А. Тяпов, А.Г. Михайлов, А.В. Корнилов, О.А. Лознюк, В.И. Никишов, В.А. Стрижнев. Пути повышения эффективности ремонтно-изоляционных работ // НТЖ «Бурение и Нефть». Москва, 09.2008 г. С. 44-47.

25. Уметбаев В.Г., Мерзляков В.Ф., Волочков Н.С. Капитальный ремонт скважин. Изоляционные работы.-Уфа:РИЦ АНК «Башнефть», 2000.- 424 с.

26. Газизов А.Ш. Повышение нефтеотдачи пластов ограничением движения вод химическими реагентами // Нефтяное хозяйство, 1992.- №1.- с.20-22.

27. Газизов А.Ш., Газизов А.А. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений на основе ограничения движения вод в пластах. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 1999. – 285 с.: ил. – ISBN 5-8365-0022-3

28. Ибрагимов Х.М., Кязимов Ф.К., Исаев Р.Ж., Шафиев Т.Х. Экспериментальные исследования ограничения водопритока в добывающих скважинах с применением гидрофобизирующей композиции. - Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2015. № 1. С. 29-32.

29. Магадова Л.А., Шидгинов З.А., Куликов А.Н. Инновационные составы для ОВП и РИР в нефтяных скважинах, разработанные в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина совместно с ЗАО «Химеко-ГАНГ». Нефть. Газ. Новации. 2015 № 1. С. 77-81.

30. Ефимов Н.Н. Изоляция водопритоков в добывающих скважинах с применением тампонажных растворов на углеводородной основе. Инженерная практика. 2011. № 7. С. 56-61.

31. Гаевой Е.Г., Ефимов М.Н., Ефимов Н.Н., Магадов В.Р., Магадова Л.А., Силин М.А., Черыгова М.А. Безводный тампонажный раствор. Патент РФ № 2500710. 2012.

32. Кадыров Р.Р. и др. Новые технологии для водоизоляционных работ в карбонатных коллекторах. Тр. ин-та ТатНИПИнефть. 2008. С. 390-393.

33. Кандаурова Г.Ф., Хисамов Р.С., Нурмухаметов Р.С., Файзуллин И.Н., Чендарёв В.В., Кандауров С.В., Степанов А.В. Способ разработки нефтяной залежи. Патент РФ № 2344277. 2008.

34. Кадыров Р.Р., Патлай Д.А., Хасанова Д.К., Байбурдов Т.А., Ступенькова Л.Л. Ограничение водопритока в трещиновато-пористых карбонатных коллекторах с использованием водонабухающих эластомеров. Нефтяное хозяйство. 2014. № 4. С. 70-71.

35. Ибрагимов Н.Г., Исмагилов Ф.З., Азизова А.К., Любецкий С.В., Катеев Р.И., Исхаков А.Р. Применение водонабухающих пакеров для изоляции трещиноватых участков горизонтальных стволов скважин залежей 302-303. Нефтяное хозяйство. 2015. № 7. С. 48-50.

36. Медведева Н.А. Применение армированных полимерных систем для увеличения нефтеизвлечения и ограничения водопритока в добывающих скважинах. Доклады на конференции молодых ученых «ТатНИПИнефть». Секция «Геология, разработка нефтяных и нефтегазовых месторождений». 2014. http://www.tatnipi.ru/sms_2014_1.html

37. Бабенков Е.П. Синтетическое волокно, способ его изготовления, цементный продукт, содержащий указанное волокно, и способ изготовления указанного цементного продукта. Патент РФ № 2339748. 2007.

38. Никитин М.Н., Петухов А.В. Гелеобразующий состав на основе силиката натрия для ограничения водопритока в сложнопостроенных трещинных коллекторах. Нефтегазовое дело. 2011. № 5. С. 143-153.

39. Лымарь И.В. Обзор новых технологий изоляции водопритока, внедренных на нефтяных месторождениях Республики Беларусь. БелНИПИнефть. Нефтегазовое дело. 2011. № 5. С. 122-133. URL: http://ogbus.ru/authors/Lymar/Lymar_1.pdf

40. Лымарь И.В., Демяненко Н.А., Пысенков В.Г., Пирожков В.В. Проблемы и пути совершенствования технологий ремонтно-изоляционных работ на нефтяных месторождениях РУП «ПО «БЕЛОРУСНЕФТЬ». Интервал. 2006. № 6. С. 18-24.

41. Лымарь И.В., Гулевич В.В., Демяненко Н.А., Макаревич А.В., Пысенков В.Г. Современные технологии ограничения водопритока, применяемые в нефтяных залежах месторождений Республики Беларусь. Сборник трудов конференции Geopetrol-2008. Краков. 2008. С. 745-752.

42. Вахитов Т.М., Камалетдинова Р.М., Емалетдинова Л.Д., Каргапольцева Т.А. Совершенствование проведения ремонтно-изоляционных работ в скважинах с использованием синтетических смол // Нефтяное хозяйство. 2010. № 2. С. 84-86

43. Шайдуллин В.А. Технологии РИР для устранения заколонной циркуляции на месторождениях ОАО АНК «Башнефть» // Инженерная практика. – 2011. № 7.

44. РД 39-00147275-039-98 Регламент применения новых тампонажных составов при проведении ремонтно-изоляционных работ

45. Стрижнев К.В. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: Совершенствование технологий ремонтно-изоляционных работ для высокотемпературных пластов, Уфа – 2003

46. Фан Тиен Зунг. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: Борьба с межколонными давлениями в нефтяных скважинах, Уфа – 2006

47. Агзамов Ф.А., Аль-Сурури Я.М., Комлева С.Ф. Экспериментальная оценка герметичности межколонного пространства газовых скважин// Изв. вузов. Нефть и газ. 2000. - № 5. - С. 58-65.

48. Ф.А. Агзамов, М.А. Тихонов, Н.Х. Каримов. Влияние фиброармирования на свойства тампонажных материалов // Территория Нефтегаз. – 2013. – № 4. – С. 26-31.

49. Орешкин, Д.В. Разработка облегченных и сверхлегких тампонажных материалов с полыми стеклянными микросферами для цементирования нефтяных и газовых скважин: дис. д-ра техн. наук: 08.08.14 / Орешкин Дмитрий Владимирович. – Ухта, 2003. – 360 с.

50. Рабинович, Ф.Н. О некоторых особенностях работы композитов на основе дисперсно-армированных бетонов // Бетон и железобетон. – 1998. – № 6. – С. 19-23.

51. Тихонов, М. А. Совершенствование фиброармированных тампонажных материалов / М. А. Тихонов. – Уфа, 2013. – 174 с.

52. Бхавсар Р., Вайдья Н., Гангули П., Хамфрис А., Роббинсон А., Ту Х., Уикс Н. Новые интеллектуальные материалы // Нефтегазовое обозрение, Том 20, №1 (Весна 2008). С. 38-49.

53. FUTUR Self-Healing Cement System, каталог Шлюмберже от 22.07.2013

54. Donald Jud G. and James M. Watts. Land Economics, 1981, vol. 57, issue 3, pp.459-470.

55. Dry, C. and Sottos, N. R., 1993. Passive smart self-repair in polymer matrix composites. In Smart Structures 1993: Smart Materials, V. K. Varadan, ed., vol. SPIE 1916, pp.438-444.

56. White, S.R. et al., 2001. Autonomic healing of polymer composites. Nature, 409(6822), pp.794–797.

57. Kessler, M.R., Sottos, N.R. & White, S.R., 2003. Self-healing structural composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(8), pp.743–753.
58. Carlson, H.C. & Goretta, K.C., 2006. Basic materials research programs at the U.S. Air Force Office of Scientific Research. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 132(1-2), pp.2–7.
59. Semprimosching, C. 2006. “Enabling self-healing capabilities - a small step to bio-mimetic materials,” European Space Agency Materials Report Number 4476.
60. S. van der Zwaag, 2007, Springer. *Self-Healing Materials: an Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science.*, pp.161-195, p.387.
61. Rule, J.D., Sottos, N.R. & White, S.R., 2007. Effect of microcapsule size on the performance of self-healing polymers. *Polymer*, 48(12), pp.3520–3529.
62. Bergman, S.D. & Wudl, F., 2008. Mendable polymers. *Journal of Materials Chemistry*, 18(1), p.41.
63. Syrett, J. a., Becer, C.R. & Haddleton, D.M., 2010. Self-healing and self-mendable polymers, pp. 978–987.
64. Wool, R.P., 2008. Self-healing materials: a review. *Soft Matter*, 4(3), p.400.
65. Wu, D.Y., Meure, S. & Solomon, D., 2008. Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Progress in Polymer Science*, 33(5), pp.479–522.
66. Yuan, Y.C. et al., 2008. Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review. *Express Polymer Letters*, 2(4), pp.238–250.
67. Youngblood, J.P. & Sottos, N.R., 2008. Bioinspired Materials for Self-Cleaning and Self-Healing. *MRS Bulletin*, 33(08), pp.732–741.
68. Joseph, C. & Lark, R., 2009. Potential application of self-healing materials in the construction industry A report for the Institution of Civil Engineers Tony Jefferson and Diane Gardner. *Construction*, (June).

69. Nelson E., 2008. Cement Chemistry and Additives, Schlumberger OilField Review, pp.18-25.

70. Murphy, E.B. & Wudl, F., 2010. The world of smart healable materials. Progress in Polymer Science (Oxford), 35(1-2), pp.223–251.

71. Blaiszik, B. & Kramer, S., 2010. Self-healing polymers and composites: Supplemental. Annual Review of Materials Research, pp.1–4.

72. Szabó, T. et al., 2011. Self-healing microcapsules and slow release microspheres in paints. Progress in Organic Coatings, 72(1-2), pp.52–57.

73. Zhao, Y. et al., 2012. Self-healing coatings containing microcapsule. Applied Surface Science, 258(6), pp.1915–1918.

74. Blaiszik, B.J. et al., 2014. Microencapsulation of gallium-indium (Ga-In) liquid metal for self-healing applications. Journal of microencapsulation, 2048, pp.2013–2014.

75. Zhao, Y. et al., 2011. The self-healing composite anticorrosion coating. Physics Procedia, 18, pp.216–221.

76. Montemor, M.F., 2014. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. Surface and Coatings Technology, 258, pp.17–37.

77. Jonkers, H., 2015. Self-Healing Concrete by Bacterial Mineral Precipitation.

78. Tazarv M., Alam M.S. Shape memory alloy for Bridge columns // 11-th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute. – LA, 2018.

79. Victor C. Li, En-Hua Yang. Engineered Self-Healing Cementitious Composites // US 7,572, 501 B2. – Aug.11, 2009.

80. Э.Р. Исмагилова, З.И. Оздоев. Обзор материалов для залечивания водопроводящих каналов цементного камня. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «75 лет нефтяному образованию в Республике Башкортостан», Посвященной 70-летию Уфимского

государственного нефтяного технического университета. – Уфа: ООО «РН-БашНИПИнефть», 2018. – С. 48. -121 с.

81. Ф.А. Агзамов, Э.Р. Исмагилова, З.И. Оздоев. Анализ материалов для «залечивания» водопроводящих каналов цементного камня // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. № 5 (121). С. 11-27.

82. Т.А. Байбурдов, А.Б. Шиповская. Синтез, химические и физико-химические свойства полимеров акриламида. / Учебное пособие для бакалавров Института химии СГУ. – Саратов: изд. СГУ, 2014 – 67 с.

83. Водонабухающий полимер «Seurvey R2» – водонабухающий высокомолекулярный полимер, применяемый в технологиях ПНП и при проведении ремонтно-изоляционных работ в нефтяных и газовых скважинах// каталог компании «Миррико», 16 с.

84. Полиакрилат натрия // каталог Пермского завода «Химик», 7 с.

85. А. Г. Зоткин. Бетоны с эффективными добавками.-Уч. Пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 160 с.

86. Шахмин А.М. Набухающие эластомерные пакеры //Молодая нефть: сб. статей. Всерос. молодежной науч.-техн. конф. нефтегазовой отрасли / отв. за выпуск О.П. Калякина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014.

87. В.А. Дятлов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук: Акрилимидобразующие полимеры: синтез, свойства и применение, Москва – 2015.

88. Э.Р. Исмагилова, З.И. Оздоев. Регулирование свойств оболочки модифицирующих добавок, применяемых для изготовления «самозалечивающегося» цемента. Современные технологии в нефтегазовом деле – 2019: сборник трудов международной научно-технической конференции в 2-х т. / коллектив авторов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. – Т. 1. С. 359-361– 466 с.

89. Л.М. Труфакина, Т.В. Петренко. Влияние температуры и наполнителя на свойства полимерных композиций на водной основе. Химия. Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 3. С.131-133.

90. Ф.А. Агзамов, Э.Р. Исмагилова, К. Нгуен. Установка для исследования фильтрационных свойств пористых материалов//Патент на полезную модель РФ №154661, от 06.08.2015.

91. Thyssen Krupp Nederlands B. V., каталог от 2005 г.

92. Л.А. Максанова, О.Ж. Аюрова. Полимерные соединения и их применение/ Учебное пособие. – Улан-Удэ: изд. ВСГТУ, 2004 – 178 с.

93. Исмагилова Э.Р., Агзамов Ф.А., Аббас А.Д. Оптимизация дисперсности добавок в самозалечивающихся цементах. Георесурсы. 2017. Т. 19. № 2. С. 129-134.

94. Испытания тампонажных цементах в соответствии со стандартами API/ISO: аппаратная реализация методов. OFI Testing Equipment, Inc.

95. М. Беллабарба, Э. Бюльте-Лойе, Б. Фрелиш, С. ЛеРуа-Делаж, Р. Ван Кейк, С. Зиру. Обеспечение эффективного разобщения пластов послеокончания эксплуатации скважин// Нефтегазовое обозрение, Том 20, №1 (Весна 2008). С. 22-37.

96. G. Richhariya, D.T.K. Dora etc. Development of Self-Healing Cement Slurry through the Incorporation of Dual-Encapsulated Polyacrylamide for the Prevention of Water Ingress in Oil Well//Materials 2020, 13, 2921; doi:10.3390/ma13132921

97. Т.Е. Князева, И.Б. Мясникова, В.В. Медведева, Ю.Д. Семчиков. Свойства пленок, растворов и гелей, приготовленных из смесей Na-КМЦ с синтетическими полимерами// Высокомолекулярные соединения. Серия Б, 2008. Том 48, №5. – С.864-868.

98. Агзамов Ф.А., Исмагилова Э.Р. Тампонажный материал. Патент РФ №2760860. Оpubл. 01.12.2021 Бюл. № 34

99. Акт №1 сдачи-приемки выполненных работ по договору №НР-3/19-НИР от 1.03.2019 г.

100. Протокол испытаний тампонажных материалов, Акт 004/2-19

101. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.- 328 с.

102. Акт№1 выполненных работ по бурению водозаборной скважины по договору №1-В от 04.02.2022 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(рекомендуемое)

Патент на полезную модель «Установка для исследования
фильтрационных свойств пористых материалов»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 154661

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015107609

Приоритет полезной модели 04 марта 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 06 августа 2015 г.

Срок действия патента истекает 04 марта 2025 г.



*Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'А.Л. Кирий'.

А.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **154 661** (13) **U1**

(51) МПК
G01N 15/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2015107609/28, 04.03.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.03.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.03.2015

(45) Опубликовано: 27.08.2015 Бюл. № 24

Адрес для переписки:

450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, Уфимский
государственный нефтяной технический
университет, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Агзамов Фарит Акрамович (RU),
Нгуен Чи Конг (RU),
Исмагилова Эльвира Римовна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Уфимский
государственный нефтяной технический
университет" (RU)

(54) **УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

(57) Формула полезной модели

Установка для исследования фильтрационных свойств пористых материалов, включающая рабочий цилиндр, заполняемый испытуемым материалом, на концах которого установлены накидные гайки с резьбовыми штуцерами, соединенный с герметичной емкостью постоянного давления, заполненной рабочим агентом водой или воздухом, имеющей на верхней крышке патрубок для подачи воздуха или другого газа, дыхательный патрубок с перекрывающим краном, а на нижней крышке - патрубок для присоединения с помощью гибкой трубы к рабочему цилиндру.

RU 154661 U1

RU 154661 U1

Стр.: 1

Рисунок А.1 - Патент на полезную модель «Установка для исследования фильтрационных свойств пористых материалов»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(рекомендуемое)
Протокол испытаний

Лаборатория крепления скважин ООО НПП «БУРИНТЕХ»	ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 004/2-19	Страница	1
		Всего страниц	2

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 004/2-19

Образец тампонажного материала для реставрации цементной крепи, содержащий 1% модифицирующих добавок (согласно акта № 1 по договору № НР-3/19-НИР от 1.03.2019г.).
(наименование, тип, марка, характеристика, код ОКП, НД на продукцию)

Описание: порошок серого цвета

Полученный 21.06.2019 г. / б/а
(дата получения /№ акта отбора образца, метод отбора в соответствии с ГОСТ, НД)

В соответствии с устной договорённостью с Э.Р.Исмагиловой
(№ заявки, письма заявителя; наименование организации-заказчика; № договора)

Лаборатория крепления скважин
ООО НПП «БУРИНТЕХ» 450029, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Юбилейная, 4/1
(наименование испытательной лаборатории, адрес)

проводила с 21 июня по 19 июля 2019 г
испытания тампонажного раствора и камня:
- растекаемость (ГОСТ 26798.1 пункт 5);
- плотность (ГОСТ 26798.1 пункт 6);
- водоотделение (ГОСТ 26798.1 пункт 8);
- водоотдача (ISO 10426-2 пункт 10);
- проницаемость (ГОСТ 26450.2);
- прочность при изгибе (ГОСТ 26798.1 пункт 9);
- сроки схватывания (ГОСТ 310.3).
(наименование вида, категории испытаний)

Место проведения испытаний г. Уфа, ул. Юбилейная, 4/1
(по необходимости)

Данный протокол относится только к образцам, подвергнутым испытаниям.
Возможная частичная перепечатка протокола испытаний проводится только с разрешения ЛКС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ
Результаты испытаний внесены в таблицу №1

Таблица 1 – Параметры тампонажного раствора и камня.

Наименование показателя	Фактическое значение	
	ПЦТ-1-50 (ОАО Сухой Лог)	Исследуемый материал
1. Плотность, г/см ³	1,84	1,86
2. Водно-смесевое отношение	0,5	
3. Растекаемость тампонажного раствора, мм	210	197
4. Водоотделение тампонажного раствора, мл	2,8	1
5. Водоотдача при температуре 24°С, мл/30 мин	1150	50
6. Прочность цементного камня при изгибе, при температуре 24°С, МПа:		

Лаборатория крепления скважин ООО НПП «БУРИНТЕХ»	ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 004/2-19	Страница	2
		Всего страниц	2

- через 3 суток твердения	2,7	8,0
- через 7 суток твердения	3,8	6,8
- через 28 суток твердения	4,1	3,2
7. Проницаемость, мД	87,5	1,7
8. Сроки схватывания, ч-мин:		
- начало	4-10	4 - 40
- конец	5-10	5 - 50

Заключение: испытания образцов цементного раствора и камня, модифицированного 1% добавок, показали полное отсутствие влияния набухающих добавок на реологические свойства цементного раствора во время затворения, процессов загустевания и схватывания. Использование в составе цемента 1% набухающих добавок не ухудшает механических свойств цементного камня. Введение набухающей добавки значительно снижает фильтрационные свойства цементного камня, вплоть до полной остановки фильтрации.

Ответственный за проведение испытаний и подготовку протокола испытаний
вед. инженер-технолог ЛКС

Начальник Службы по разработке буровых и тампонажных растворов
ООО НПП «БУРИНТЕХ»



Е.Г. Гайнетдинова

С.С. Ложкин

Рисунок Б.1 - Протокол испытаний

ПРИЛОЖЕНИ В

(рекомендуемое)

Патент на изобретение «Тампоначный материал»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2760860

ТАМПОНАЖНЫЙ МАТЕРИАЛ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет" (RU)*

Авторы: *Агзамов Фарит Акрамович (RU), Исмагилова Эльвира Римовна (RU)*

Заявка № 2021102649

Приоритет изобретения **04 февраля 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **01 декабря 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **04 февраля 2041 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 760 860**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
E21B 33/138 (2006.01)
C09K 8/46 (2006.01)
C09K 8/467 (2006.01)
C09K 8/50 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК
E21B 33/138 (2021.08); C09K 8/46 (2021.08); C09K 8/467 (2021.08); C09K 8/50 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021102649, 04.02.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.02.2021

Дата регистрации:
01.12.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 04.02.2021

(45) Опубликовано: 01.12.2021 Бюл. № 34

Адрес для переписки:
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, Уфимский
государственный нефтяной технический
университет, патентный отдел

(72) Автор(ы):
Агзамов Фарит Акрамович (RU),
Исмагилова Эльвира Римовна (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Уфимский государственный
нефтяной технический университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 10457848 B2, 29.10.2019. RU
2280658 C2, 27.07.2006. RU 2495229 C1,
10.10.2013. RU 2701675 C2, 30.09.2019. RU
2467156 C2, 20.11.2012.

(54) **ТАМПОНАЖНЫЙ МАТЕРИАЛ**

(57) **Формула изобретения**

Тампонажный материал, включающий портландцемент, набухающий полимерный материал, отличающийся тем, что в качестве набухающего полимерного материала содержит водонабухающие гранулы в виде нерастворимых в воде сшитых сополимеров акриламида и акрилата калия, покрытых водорастворимой оболочкой из карбоксиметилцеллюлозы, модифицированной поливиниловым спиртом, при следующем соотношении компонентов, мас. %:

портландцемент	99,0-99,5
указанные водонабухающие гранулы	0,5-1,0

RU 2 760 860 C 1

RU 2 760 860 C 1

Рисунок В.1 - Патент на изобретение «Тампонажный материал»

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(рекомендуемое)

Акт №1 выполненных работ по бурению водозаборной скважины

АКТ №1

выполненных работ по бурению водозаборной скважины

составлен «27» февраля 2022

Исполнитель

Общество с ограниченной ответственностью «ГеоСфера» (ООО «ГеоСфера») Адрес (место нахождения): 628605, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, город Нижневартовск, улица Ханты-Мансийская, владение 2, строение 1, офис 322-323, 336-337 Почтовый адрес: 628624, Российская Федерация, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра, город Нижневартовск-24, а/я 343 ИНН: 8603198926, КПП: 860301001 Р/счет: № 40702810450080001914 К/с: 30101810400000000611 БИК: 047173611 Банк: Нефтеюганский филиал Банка «ВВРР» (АО)

Заказчик

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский и проектный институт Уфимского государственного нефтяного технического университета» (ООО «НИПИ УГНТУ») 450075, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, Проспект Октября, д.151 Тел. +7 (347) 246-31-80 ИНН 0277126003; КПП 027701001; р.с. 40702810306000010454 в Вашкирское отделение № 8598 ПАО «Сбербанк» г.Уфа; БИК 048073601; кор. счет 30101810300000000601

1. В соответствии с Договором на проведение работ по бурению водозаборной скважины N 01-В от "04" февраля 2022 г. Подрядчик выполнил следующие работы по бурению водозаборной скважины на земельном участке, отведенном под испытательный полигон, с местоположением в ХМАО-Югра:
 - подготовка участка к осуществлению бурения;
 - бурение водозаборной скважины в соответствии с Паспортом;
 - контроль за работой бурового оборудования;
 - контроль за соблюдением параметров бурового раствора и работой системы очистки бурового раствора в процессе бурения;
 - подготовка скважины к спуску труб и установке оборудования;
 - подготовка скважины к спуску испытателей пластов и участие в работах по испытанию пластов;
 - подготовка скважины к геофизическим исследованиям и участие в их выполнении;
 - восстановление (рекультивация) земельного участка.
2. Работы выполнены в соответствии с установленными Договором на проведение работ по бурению водозаборной скважины N 01-В от "04" февраля 2022 г. сроками.
3. Качество выполненных работ соответствует согласованным Сторонами требованиям.
4. В результате осмотра результата работ выявлены следующие недостатки: _____ . Сроки устранения - к "___" _____ г.
5. Стоимость выполненных работ прописывается в Договоре.
6. Стороны взаимных претензий не имеют.
7. Подписи Сторон:

Подрядчик
Генеральный директор
И.И. Ханов


Заказчик
Генеральный директор
Б.Х. Ишмухаметов


ПАСПОРТ

водозаборной скважины

1. Общие сведения

Местоположения: ХМАО-Югра

Дата бурения: 07.02.2022

2. Технические сведения

В соответствии с заданием по договору №01-В от "04" февраля 2022 источником производственно-технического водоснабжения являются подземные воды атлымского водоносного комплекса, залегающие в интервале глубин 235,0-305,0 м. В соответствии с чем проектная глубина водозаборной скважины принимается равной 298,0 м. Глубина пилотного ствола скважины – 300 м.

3. Бурение скважины производилось с буровой установки 1БА-15В

4. Конструкция водозаборной скважины

Наименование колонны	Интервал бурения, м		Диаметр бурения, мм	Интервал обсадки, м		Диаметр обсадных труб, мм
	от	до		от	до	
1 Разведочный ствол	0	300	190	-	-	-
2 Кондуктор	0	10,0	490	0,0	10,0	426
3 Эксплуатационная колонна	10,0	200,0	269	+0,5	200,0	245
4 Фильтровая колонна	200,0	298,0	190	190,0	298,0	146
фильтрующая часть				286,0	298,0	146

5. Порядок работ в процессе строительства скважин

1) Бурение под кондуктор

Компоновка бурильной колонны:

- переходник 3-171н x 3171н; 3-147н x 3-147н; 3-121н x 3-121н;

- УБТ Д-178 – 10 м; УБТ Д-146 – 10 м

- переходник 3-121н x 3-89в;

Осевая нагрузка на долото 5-7 тс, частота вращения 110-190 об/мин. Расход промывочной жидкости 250-300 л/мин.

Характеристики глинистого раствора:

- плотность, кг/м³1200-1300;

- водоотдача, см³/30мин17-19;
- толщина глинистой корки, мм.....1-3;
- условная вязкость, с.....13-15;
- содержание песка, % 3-4;
- отстой, % 5;
- статистическое напряжение сдвига, мгс/см²..... 20-60.

После проходки производится крепление скважины от поверхности земли до глубины 10 м обсадными трубами Ø426 мм с затрубной цементацией скважины с использованием заливочных труб прямого залива с устья скважины.

Перед креплением ствол скважины:

а) калибруется 3-х шарошечным долотом Ø-490 мм типа «МГ»;

Осевая нагрузка на шарошечное долото – 0 тс, частота вращения 80-110 об/мин.

Расход промывочной жидкости – 10-15 л/с.

б) промывается – 5 циклов.

Для цементирования применяется портландцемент для низких и нормальных температур. ОЗЦ выждан.

До начала разбуривания цементного стакана обсадная колонна испытывается на герметичность. Испытание проводится заполнением колонны раствором при наблюдении за ее уровнем на устье в течение 1 часа.

2) Бурение под эксплуатационную колонну

Компоновка бурильной колонны:

- переходник 3-171н x 3171н; 3-147н x 3-147н; 3-121н x 3-89н;

- УБТ Д-178 – 10м УБТ; Ø146 – 10 м; УБТ Д-146 – 10 м;

- переходник 3-121н x 3-89в;

Осевая нагрузка на долото 4-5 тс, частота вращения 110-190 об/мин. Расход промывочной жидкости 250-300 л/мин.

Характеристики глинистого раствора:

- плотность, кг/м³1200-1300;
- водоотдача, см³/30мин20-25;
- толщина глинистой корки, мм.....1-3;
- условная вязкость, с.....16-27;
- содержание песка, % 3-4;
- отстой, %5;
- статистическое напряжение сдвига, мгс/см².....20-60

Пройденный интервал крепится обсадными трубами Ø245 мм от поверхности земли до глубины 200,0 м с учетом гидрогеологических условий при отсутствии водоупорной породы. Определяется производителем буровых работ.

Перед креплением ствол скважины:

а) калибруется 3-х шарошечным долотом $\varnothing 269$ мм типа «МСГ»;

Осевая нагрузка на шарошечное долото – 0 тс, частота вращения 80-110 об/мин.
Расход промывочной жидкости – 10-15 л/с.

б) промывается – 10 циклов.

3) Вскрытие водоносного горизонта

Компоновка буровой колонны:

- 3-х шарошечное долото М-190 мм тип «ГН»;
- переходник 3-171н x 3171н; 3-147н x 3-147н; 3-121н x 3-121н;
- УБТ Д-146 – 10 м; УБТ-146 10 м;
- переходник 3-121н x 3-89в;

Осевая нагрузка на долото 4-5 тс, частота вращения 110-190 об/мин. Расход промывочной жидкости 250-300 л/мин.

Характеристики глинистого раствора:

- плотность, кг/м³1200-1300;
- водоотдача, см³/30мин20-25;
- толщина глинистой корки, мм.....1-2;
- условная вязкость, с.....16-18;
- содержание песка, % 3-5;
- отстой, % 5;
- статистическое напряжение сдвига, мгс/см²..... 20-60

Пройденный интервал крепится обсадными трубами $\varnothing 146$ мм от отметки 190,0 м до глубины 298,0 м.

Перед креплением ствол скважины калибруется 3-х шарошечным долотом М-190 мм тип «ГН», промывается – 10 циклов.

6. Тампонажные работы

Кондуктор и эксплуатационная колонна цементируются в одну ступень по технологии прямого цементирования с подъемом тампонажного раствора до устья. Для цементирования используется тампонажный раствор плотностью 1,83 г/см³ на основе цемента ПЦТ1-50 (ГОСТ 1581-96).

Объем цемента для кондуктора с наружным диаметром 426 мм:

$$V = 0,785 \cdot [(1,2 \cdot 0,490^2 - 0,426^2) \cdot 10 + 0,406^2 \cdot 1,0] = 0,96 \text{ м}^3;$$

Объем продавочной жидкости для кондуктора с наружным диаметром 426 мм:

$$V = 0,785 \cdot 0,406 \cdot 1,04 \cdot (10 - 1) = 2,98 \text{ м}^3,$$

Объем цемента для эксплуатационной колонны с наружным диаметром 244,5 мм:

$$V = 0,785 \cdot [(1,2 \cdot 0,269^2 - 0,2445^2) \cdot 200 + 0,2245^2 \cdot 1,0] = 4,28 \text{ м}^3;$$

Объем продавочной жидкости для эксплуатационной колонны с наружным диаметром 244,5 мм:

$$V = 0,785 \cdot 0,2245 \cdot 1,04 \cdot (200 - 1) = 36,47 \text{ м}^3$$

Согласно техническому заданию интервал вскрытого на всю мощность водоносного горизонта цементируется «Самозалечивающимся» цементом (Патент РФ №2760860. Опубл. 01.12.2021 Бюл. № 34) с перекрытием кровли водоносного горизонта на 6 м. Принимаем интервал для перекрытия равным $280,0 - 298,0 = 18 \text{ м}$.

Объем цемента для 18 м фильтровой колонны с наружным диаметром 146 мм:

$$V = 0,785 \cdot [(1,2 \cdot 0,19^2 - 0,1461^2) \cdot 18 + 0,130^2 \cdot 1,0] = 0,3237 \text{ м}^3$$

Оставшаяся часть фильтровой колонны, перекрывающая интервал 200 – 280 м, цементируется ПЦТ1-50 (ГОСТ 1581-96).

Объем цемента для 80 м фильтровой колонны с наружным диаметром 146 мм:

$$V = 0,785 \cdot [(1,2 \cdot 0,19^2 - 0,1461^2) \cdot 80 + 0,130^2 \cdot 1,0] = 1,393 \text{ м}^3$$

Объем продавочной жидкости для фильтровой колонны с наружным диаметром 146,1 мм:

$$V = 0,785 \cdot 0,130 \cdot 1,04 \cdot (98 - 1) = 10,29 \text{ м}^3$$

7. Устройство водоприемной части скважины

Согласно техническому заданию после ОЗЦ фильтровой колонны скважина углубляется при помощи желонки ударно-канатным способом до 300 м для сооружения отстойника. Для создания фильтрующей части в интервал скважины, расположенный напротив водоносного горизонта, спускается гидроперфоратор АП-6М на колонне труб, снабженный гидромониторными насадками. Производится перфорация стенок скважины путем подачи насосным агрегатом через колонну труб и гидромониторные насадки гидроперфоратора абразивной жидкости под давлением. После завершения перфорационных работ проводится опробование скважины. Для вызова притока пластовой воды и промывки фильтров от вымытого и осевшего шлама монтируется ходовой эрлифт. В роли водоподъемных труб используются буровые штанги. В скважину непрерывно заливается чистая вода, одновременно подается воздух на эрлифт. После подъема уровня воды в скважине ходовой эрлифт извлекается, вода в скважине откачивается. Далее интервал вскрытого водоносного горизонта на 7 суток перекрывается пакером.

8. Геофизические исследования

Геофизические исследования проводятся сразу после проходки и промывки разведочного ствола скважины и кавернометрии. Целью проведения геофизических

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(рекомендуемое)
Дипломы



University of
Salford

This is to certify that
Elvira Ismagilova
has been awarded the degree of
Master of Science
in
Petroleum & Gas Engineering

With Distinction

Richard Hetherington

Registrar
16 November 2015



21/36

Рисунок Д.1 – Диплом о присуждении степени магистра нефтегазового дела с отличием, г. Манчестер (Великобритания)

University of
Salford
MANCHESTER

This is given to

ELVIRA ISMAGILOVA

Course MSc in Petroleum and Gas Engineering, 2014-2015

to certify that she has conducted a research on the development
of self-healing properties of oil well cement stone.

The study is assessed as a solid contribution into the
investigation of new and advanced technologies
in petroleum engineering.

Elvira Ismagilova is a well-qualified engineer and a promising
scientist, she truly deserves to be given
"The best student research award".

The Petroleum and Gas
Engineering Division



A handwritten signature in black ink, appearing to be "Dr. Atombekov Abbas".

Dr. Atombekov Abbas

18/10/2015

Рисунок Д.2 – Диплом за лучшую научно-исследовательскую работу в области «самозалечивающихся» цементов, университет Сэлфорд (г. Манчестер, Великобритания)



Рисунок Д.3 – Диплом за высокий научный уровень и практическую значимость доклада (г. Уфа)



Рисунок Д.4 – Диплом за 1 место (г. Москва)