

На правах рукописи



ИСМАГИЛОВА ЭЛЬВИРА РИМОВНА

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

Специальность 2.8.2. – «Технология бурения и освоения скважин»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Бурение нефтяных и газовых скважин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Агзамов Фарит Акрамович

Официальные оппоненты: **Савенок Ольга Вадимовна**
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра «Разработка и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений» / профессор

Уляшева Надежда Михайловна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин» / профессор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится «30» июня 2022 года в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.03, созданного при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Султанов Шамиль Ханифович

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 вследствие заколонной циркуляции воды (ЗКЦ).

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, 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, В.Н. Поляков, Л.И. Рябова, В.П. Овчинников, З.З. Шарафутдинов, А.М. Яковлев, и др. Благодаря их трудам разработаны и широко используются эффективные тампонажные материалы для первичного и ремонтного цементирования. 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.

Цель работы - повышение герметичности крепи скважин путем восстановления целостности цементного кольца, полученного из специального тампонажного материала, обладающего «самозалечивающимися» 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

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 водопогложительного 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 Web of Science, 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.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, представлены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе дан анализ состояния проблемы, охватывающий факторы, способствующие образованию водопродящих каналов в цементном камне, а также виды потерь герметичности крепи скважины, способы восстановления и сохранения герметичности крепи скважины, проанализирован спектр современных водоизоляционных материалов и технологий, направленных на ограничение водопритоков.

В зависимости от насыщающих пласт флюидов на практике используют множество современных водоизоляционных материалов и технологий, направленных на ограничение водопритоков, благодаря которым возможно обеспечить качественное дополнительное фильтрационное сопротивление в водонасыщенной части пласта. Однако все известные водоизоляционные технологии имеют низкую продолжительность технологического эффекта (в среднем 3 года), в результате чего возникает необходимость в очередных остановках скважин, проведении повторных операций ремонтно-изоляционных работ с применением дорогостоящих водоизоляционных реагентов.

В связи с этим предлагается применение специальных «самозалечивающихся» цементов или, согласно зарубежным литературным источникам, «самовосстанавливающимся» цементов, с помощью которых можно ликвидировать заколонную циркуляцию и восстановить целостность цементного кольца без остановок скважины на ремонты.

Проблему восстановления герметичности крепи скважины предполагается решить модифицированием тампонажного цемента, причем принцип работы добавки будет заключаться в ее активации при взаимодействии с посторонней водой.

Во второй главе рассмотрен феномен самовосстановления различных структур, показаны история развития, применения самовосстанавливающихся материалов в различных областях. Сформулирована и обоснована рабочая гипотеза, дано определение тампонажному материалу, который в исследовательской работе называется «самозалечивающимся» цементом для первичного цементирования скважин с целью восстановления и сохранения

герметичности крепи скважины в случае ее разгерметизации, сопровождающейся заколонными циркуляциями воды.

Выбран принцип «самозалечивания» пораженных цементов, заключающийся в герметизации водопроводящих каналов предварительно интегрированными в тампонажный цемент модифицирующими добавками, которые, активируясь при вторичном взаимодействии с водой, набухают, блокируя образованные в цементном камне трещины, тем самым восстанавливая герметичность крепи скважины.

Определены требования к свойствам добавок, используемых для модификации цементов, основными из которых являются:

- наличие прочной многослойной оболочки, которая должна предотвратить преждевременное набухание добавки на этапе приготовления и закачки цементных растворов;

- задержка активации ядра, что обеспечивает химическую инертность добавки при гидратации цемента в период его схватывания и начале твердения;

- длительность эффекта самозалечивания, для обеспечения полного и долгосрочного блокирования водопроводящего канала;

- способность перекрывать трещины размером от 50 до 150 мкм, что гарантирует эффективную блокировку водопроводящего канала;

- многократность активации добавки в случае периодического действия триггера;

- отсутствие влияния на технологические свойства тампонажного раствора и цементного камня для обеспечения прокачиваемости цементного раствора и достижения стандартных показателей механической прочности и проницаемости цементного камня.

В третьей главе описаны приборы, методы и средства, использованные для исследований. Изложена методика математического планирования экспериментов.

На первоначальном этапе ставилась задача связывания посторонней воды, фильтрующейся через цементную крепь. В качестве критериев оценки

определены степень связывания воды и последовательное перекрытие водопроводящего канала. При этом был сформулирован общий признак для модифицирующей добавки – достижение объемного увеличения за счет водопоглощительного механизма.

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

Далее рассматривался процесс оболочивания добавки в зависимости от ее дисперсности и их интегрируемость в цементный раствор. Анализ ко-факторов общего признака позволили выявить наиболее предпочтительный материал, в качестве которого использован сшитый сополимер акриламида.

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.

При этом были приняты следующие допущения: жидкость затворения – ньютоновская; получаемый цементный раствор - вязкопластичная жидкость; гигрометрические процессы при переходе вязкопластического цементного геля в камневидное состояние не учитываются; учитывается распределение частиц добавки в цементном камне. За основу взяты реальные результаты, полученные при замере проницаемости камня и градиент давления водопрорыва по заколонному пространству. При этом получены уравнения, описывающие влияние добавки на степень блокирования водопроводящих каналов и показано, что частицы добавки оптимально распределенные (главное условие), как в вязкопластичном цементном растворе, так и в цементном камне, могут дать сокращение фильтрации на 99,82% путем блокирования водопроводящих каналов.

Далее производилась экспериментальная проверка фильтрационных и прочностных характеристик цементного камня.

Изготовлены образцы и часть из них испытана сразу после срока ОЗЦ, другая - погружена на 3 суток в воду. Тест на изгиб продемонстрировал прочность трехсуточной балки 8,042 МПа, против 2,350 МПа сухой балки. Результаты фильтрационных испытаний (Рисунок 1) показали, что при 1% содержании МД проницаемость трехсуточного образца цементного камня снизилась многократно. Также выяснилось, что увеличение концентрации модифицирующих добавок более 1% сопровождается значительным сокращением водопроводимости камня, однако показатели прочности при этом не достигают регламентированных. При уменьшении количества МД менее 0,5% залечивания пор не происходит.



Рисунок 1 – Исследование образца цементного камня на проницаемость

На графике Рисунок 1 ось ординат отражает давление, 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, формула б:

$$k = Q_o \times \left[\left(\frac{2uL}{A} \right) \times \left(\frac{P_o}{P_i^2 - P_o^2} \right) \right] \quad (6),$$

где Q - объемный расход газа (см³/с); u - вязкость (сП); L - длина (см); A - площадь поперечного сечения (см²) образца; P_o - начальное давление при запуске системы (атм); P_i - конечное давление нагнетания (атм).

Тем самым доказано – МД в количестве 1% оптимально распределенная, как в вязкопластичном цементном растворе, так и в цементном камне, после активации, способна полностью исключить фильтрацию воды через цементный камень. За оптимальное распределение принято условие матричной системы, в которой частицы полимера располагаются в узлах регулярной решетки, достигаемое при формировании цементного камня. Таким образом, пренебрегая хаотичностью движения частиц при вязкопластичном течении, полагается, что при указанной плотности и концентрации добавки, она займет оптимальные позиции при переходе в камневидное состояние. Данное предположение основывается на теории гидратации цемента, когда при условии обеспечения постоянного перемешивания раствора в нем образуется больше продуктов гидратации и формируются пространственные связи, удерживающие добавку во взвешенном состоянии.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных работ по изучению механизма самозалечивания водопроводящих каналов в цементном камне, показан реализованный комплекс исследований рецептуры «самозалечивающегося» цемента, где рассмотрены физико-механические свойства, фильтрационные свойства, структура, гранулометрический состав и др. Кроме того в данной главе описывается технология получения «самозалечивающегося» цемента. Приведены результаты стендовых и промысловых испытаний.

«Самозалечивающийся» цемент представляет собой тампонажный материал, включающий вяжущее вещество и модифицирующие добавки (патент РФ № 2760860).

В качестве вяжущего использовался портландцемент тампонажный ПЦТ-I-G-CC-1, а в качестве МД использовался водонабухающий полимерный материал, изготовленный из гранул суперабсорбента на основе анионного поликриламида, 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. При взятом критерии оптимальности 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, приняли за факт интерполимерное взаимодействие в растворах и пленках полисахаридов и полимеров виниловых мономеров. Доказательством возможного интерполимерного взаимодействия, 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%.

После обоснования состава и проведения базовых исследований раствора «самозалечивающегося» цемента была изготовлена опытная партия МД. Методика изготовления настроечных испытательных образцов МД включала предварительную механоактивацию активного водонабухающего ядра и его оболачивание – нанесение пленочного покрытия методом структурной грануляции в аппаратах псевдооживленного слоя. Вязкость раствора полимерного комплекса была близка к пределу распыляемости и эмпирически подобрана для обеспечения равномерного слоя при диспергировании раствора, а толщина наносимой оболочки на ядро добавки выверена в соответствии со скоростью и

степенью ее растворимости в зависимости от температуры, минерализации пластовой воды и времени контакта.

Комплекс контрольных исследований раствора и камня из «самозалечивающегося» цемента, включающий изучение основных показателей реологических, прочностных и фильтрационных свойств, производился в аккредитованной лаборатории крепления скважин. 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).

Проведенные исследования показали полное отсутствие влияния набухающих добавок на реологические свойства цементного раствора во время затворения, загустевания и схватывания раствора. Испытания также показали, что набухающие добавки не ухудшают механические свойства цементного камня. Отмечено, что введение набухающей добавки значительно снижает фильтрационные свойства цементного камня, вплоть до полной остановки фильтрации. Согласно протоколу проведенных испытаний, соответствующих ТУ 5734-014-55839907-2017, получены результаты испытаний двух тампонажных материалов (Таблица 1), отличающихся наличием модифицирующей добавки.

Таблица 1 – Результаты испытаний тампонажных материалов

Наименование показателя	Фактическое значение	
	ПЦТ-1-50	Исследуемый материал
1. Плотность, г/см ³	1,84	1,86
2. Водоцементное 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. Предел прочности 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

С целью проведения эксперимента, наиболее приближенного к скважинным условиям, было разработано специальное стендовое оборудование, позволяющее исследовать фильтрационные свойства модифицированного добавками цементного камня, состоящее из циркуляционной системы и рабочего цилиндра.

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 раствором из «самозалечивающегося» цемента и выдержавшим ОЗЦ, при этом фиксировался объем вошедшей и профильтрованной через камень жидкости.

В целях 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 чего, его обвязали с циркуляционной системой, с постепенным доведением давления нагнетания воды до 405300 Па. Согласно расчетам, данная цифра соответствует давлению водопрорыва через цементный камень.

Исследование пропускной способности цементного камня, модифицированного добавками, производилось пропусканием под давлением разнотипной пластовой воды, попутно добытой с месторождений Республики Башкортостан. При этом тестировались три образца цементного камня: первый, модифицированный «самозалечивающимися» добавками, фильтровал воду гидрокарбонатного типа; второй, модифицированный «самозалечивающимися» добавками, пропускал воду хлоркальциевого типа; третий – цементный камень из бездобавочного цемента - пресную воду.

При фильтрации пластовой воды при температуре 60°C происходило максимально быстрое растворение превентивной оболочки и максимальная активация водонабухающего ядра. Режим фильтрации установился за 6 часов,

еще спустя 9 часов произошло полное прекращение фильтрации жидкости (Рисунок 2).

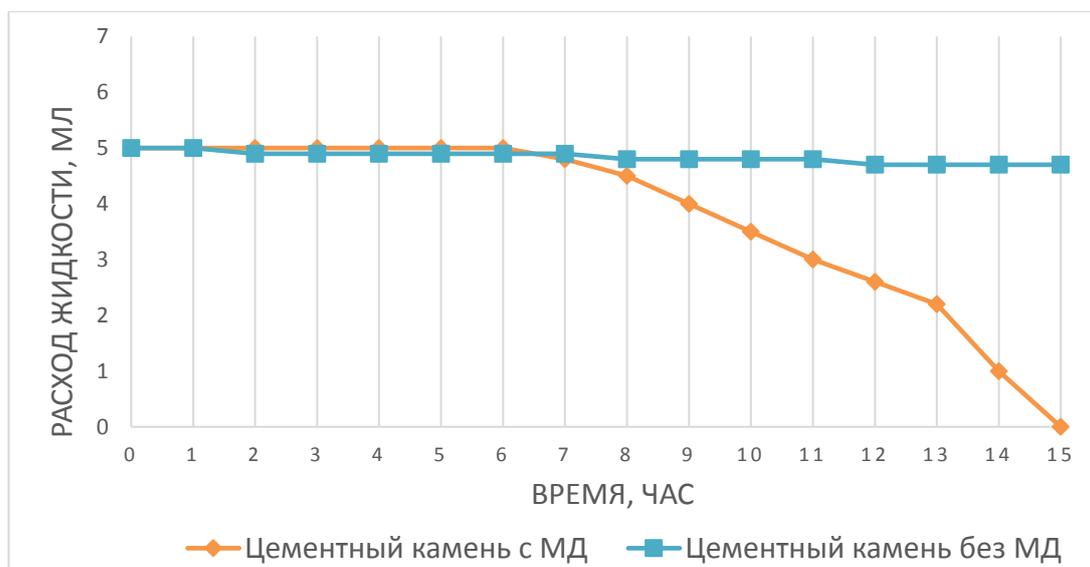


Рисунок 2 – Результаты фильтрации пластовой воды через образцы цементного камня при температуре 60 °C

При фильтрации пластовой воды при температуре 20°C через образец из «самозалечивающегося» цемента растворение превентивной оболочки происходило с минимальной скоростью. Время установления режима фильтрации жидкости составило 10 часов. Полное прекращение фильтрации произошло спустя еще 12 часов (Рисунок 3).

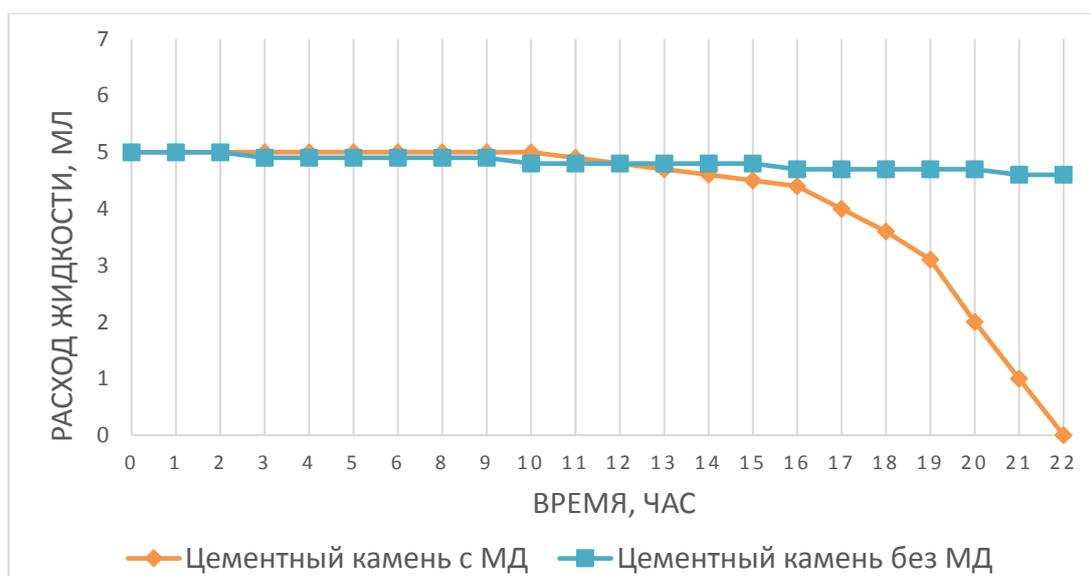


Рисунок 3 – Результаты фильтрации пластовой воды через образцы цементного камня при температуре 20 °C

В третьем образце, изготовленном из бездобавочного цемента, при установившемся режиме фильтрации изменения в характере фильтрации не произошло.

В цементном камне, модифицированном добавками, за 8 часов (12 часов) установившейся фильтрации было связано 75% воды, при этом 25% воды камень пропускал последующие 7 часов (10 часов) 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 после указанного времени в свободной циркуляции оказалось 92,5% воды, и только 7,5% воды было связано ранее непрогидратировавшим цементом.

Из исследований влияния температуры раствора и степени минерализации на активаторные механизмы модифицирующей добавки выявлено, что в горячей (от 60 °С) пресной воде в течение 1 часа наблюдается максимально быстрое водопоглощение с увеличением гранулы на 550% от первоначального объема, в горячей (от 60 °С) минерализованной воде в течение 1 часа наблюдается максимальное водопоглощение с увеличением гранулы на 490% от первоначального объема.

Для оценки состоятельности добавки в перекрытии каналов различной величины и вариативности ее расположения в камне, были определены модели каналов, для которых применение «самозалечивающихся» добавок будет наиболее уместным и благоприятным. Наиболее предпочтительными каналами для локального размещения модифицирующей добавки и последующего блокирования пор этой добавкой являются сквозные открытые трещины.

На Рисунке 4 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.



Рисунок 4 – Компьютерная томография цементного камня, модифицированного «самозалечивающими» добавками

При помощи спектрального анализа, выполненного на оборудовании неразрушающего контроля CTScanner, получен снимок (Рисунок 5) 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. 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.

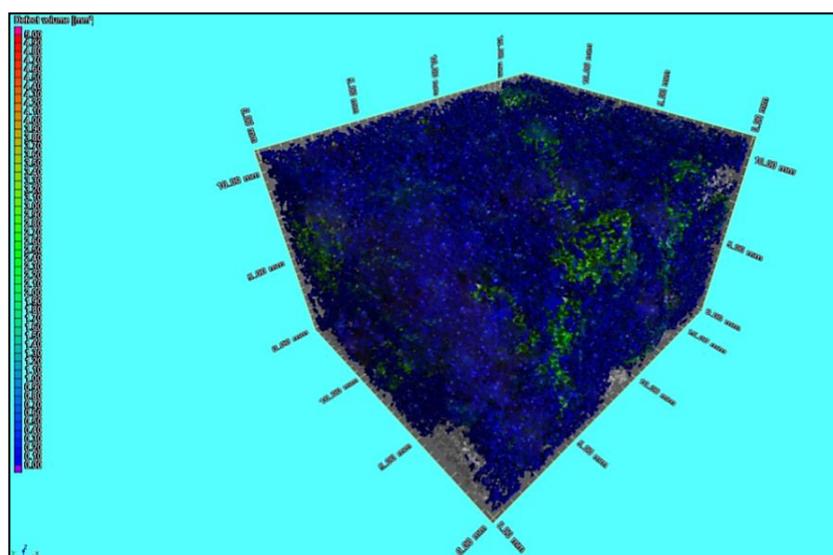


Рисунок 5 – Спектральный анализ модифицированного цементного камня

Результаты последующего сканирования образцов цементного камня с добавками продемонстрировали равномерность распределения мелкодисперсных частиц, что позволило говорить об оптимальности подобранного количества и плотности добавки, которая удерживалась во взвешенном состоянии до затвердевания цементного раствора (Рисунок 6).

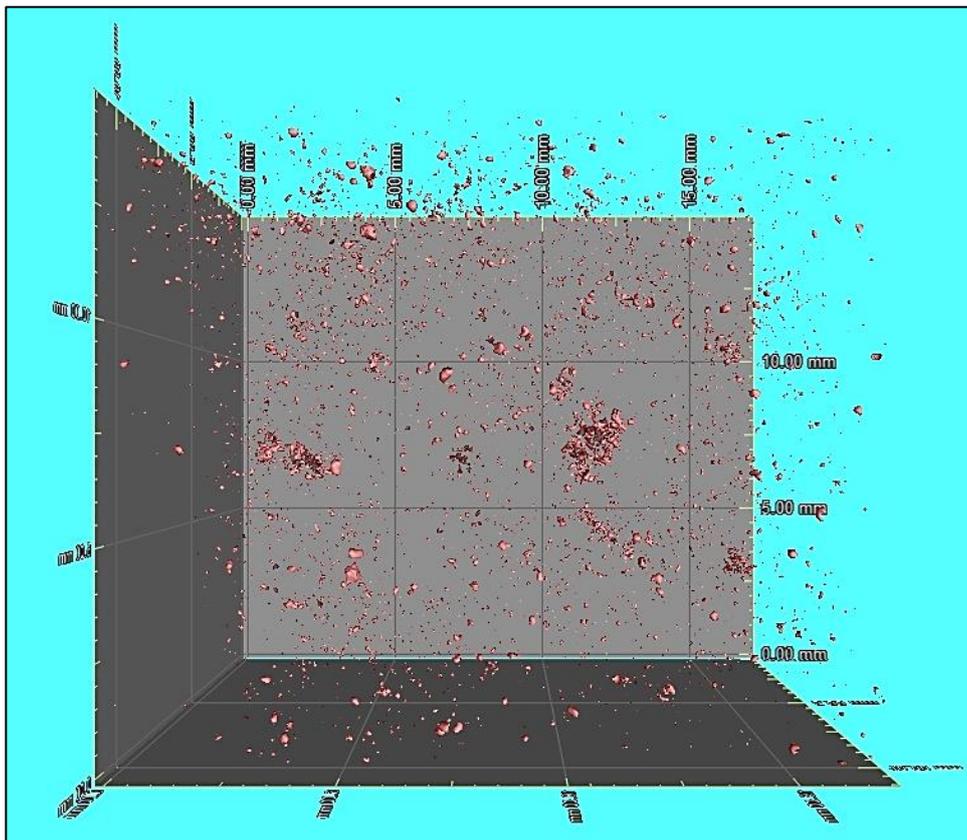


Рисунок 6 – Распределение МД в объеме цементного камня

Моделирование касательных напряжений на крепь скважины при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в прикладной программе ANSYS (Рисунок 7) показало, что скорость и величина деформации в цементном камне зависят (прямо пропорционально) не только от зоны, вида и объема прилагаемой динамической нагрузки, но также от дисперсности и характера распределения добавки в объеме цементного камня. Данная картина полностью синхронизируется с тестом на прочность, при котором образцы со сгустившимися при осаждении МД показали самые низкие результаты прочности на изгиб.

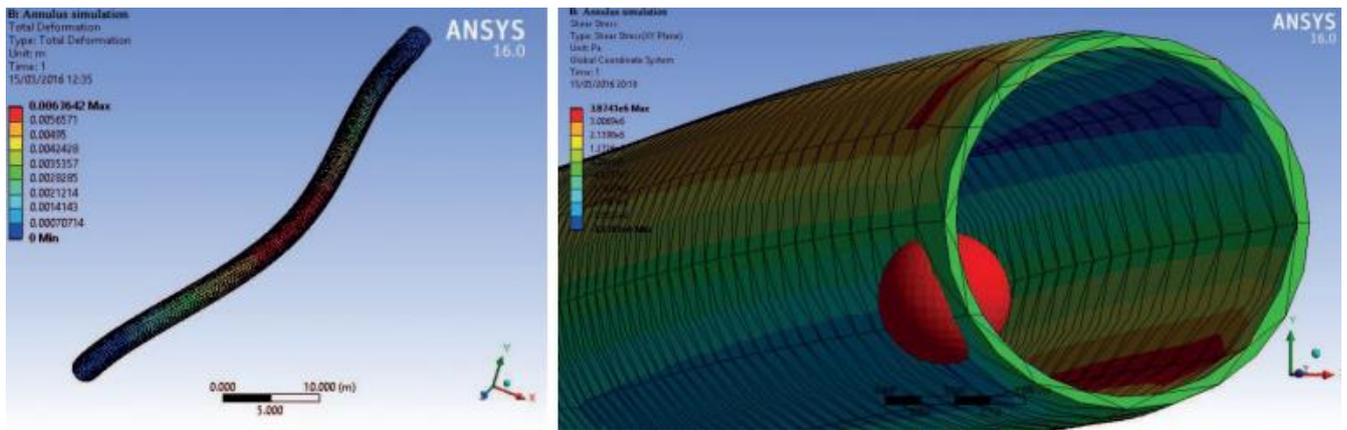


Рисунок 7 - Моделирование касательных напряжений на крепь скважины.

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

Результаты физических экспериментов и вспомогательных методов показывают состоятельность подхода в достижении цели восстановления целостности крепи скважины при помощи «самозалечивающегося цемента».

С целью финального тестирования «самозалечивающегося» был смоделирован и проведен промысловый эксперимент. На земельном участке, отведенном под испытательный полигон была пробурена водозаборная скважина на глубину 300 м для эксплуатации вод атлымского водоносного комплекса. Конструкция скважины и порядок работ в процессе ее строительства, включавший бурение под кондуктор, бурение под эксплуатационную колонну, вскрытие и испытания водоносного горизонта осуществлялись соответственно заявленным в Паспорте Акта № 1 «Выполненных работ по бурению водозаборной скважины». 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. Интервал вскрытого на всю мощность водоносного горизонта цементировался «самозалечивающимся» цементом с перекрытием кровли водоносного горизонта на 6 м. После ОЗЦ фильтровой колонны скважина углублялась для сооружения отстойника. Интервал скважины, расположенный напротив водоносного горизонта перфорировался гидроперфоратором АП-6М на

колонне труб, и после этого проводилось опробование скважины. Интервал вскрытого водоносного горизонта был перекрыт пакером и проведены термометрические исследования малогабаритным глубинным расходомером (МГР-2) для установления затрубной циркуляции жидкости, негерметичности крепи, мест нарушения обсадной колонны и межпластового перетока. Термометрия скважины выполнялась в обсаженном невскрытом стволе, затем на 1-е сутки, на 3-е сутки и на 7-е сутки после перфорации (Рисунок 8).

В результате проведения термометрических исследований в обсаженном стволе наблюдалось закономерное повышение температуры до 15 °С 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.

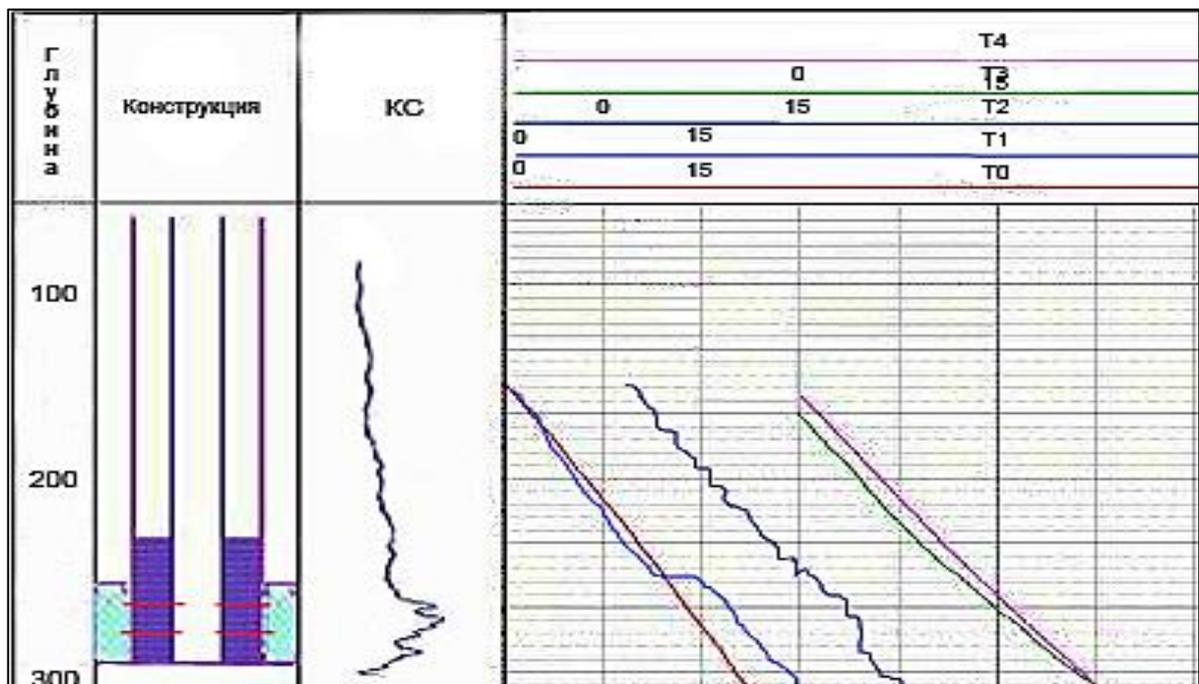


Рисунок 8 - Термограмма водозаборной скважины

На 7-й день термометрия показала 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. Промысловый эксперимент продемонстрировал фактическую ликвидацию водоперетоков и свидетельствует о восстановлении герметичности цементного камня во времени.

В этой связи «самозалечивающимся» цементом предлагается цементировать обсадную колонну не на всю длину, а лишь интервалы, перекрывающие область контакта нефтеносного и водоносного пластов.

«Самозалечивающийся» цемент также рекомендуется для восстановления герметичности затрубного пространства путем установки цементных мостов с помощью пакера-ретейнера.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обоснованы требования и принципы 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. 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, 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 ядра добавки 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 интегрируются в сухой порошок тампонажного цемента. Далее для получения

самозалечивающегося цемента производится смешение сухого порошка портландцемента и равномерное распределение в нем модифицирующих добавок.

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.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. *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.

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

Публикации, цитируемые в библиографической и реферативной базе Web of Science:

3. *Ismagilova E.R., Agzamov F.A., Abbas A.J.* Optimization of self-healing additives dispersity in cement Georesursy = Georesources. 2017. V. 19. No. 2. Pp. 129-134

4. *Agzamov F.A., Ismagilova E.R.* Self-healing cements – the key to maintaining the integrity of cement sheath. Part 1. // Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 5, pp. 577–586. DOI: 10.15828/2075-8545- 2019-11-5-577-586

5. *Agzamov F.A., Ismagilova E.R.* Self-healing cements – the key to maintaining the integrity of cement sheath. Part 2. // Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 6, pp. 730–742. DOI: 10.15828/2075-8545- 2019-11-6-730-742.

Патенты

6. *Агзамов Ф.А., Нгуен Чи Конг, Исмагилова Э.Р.* Установка для исследования фильтрационных свойств тампонажного раствора и цементного камня. Патент на полезную модель № 154661 Оpubл. 27.08.2015 бюл № 24

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

Кроме этого, опубликовано 8 материалов и тезисов конференций.