

На правах рукописи



**БЕКБАЕВ АРСТАН АБАЕВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЦЕПТУР ОБЛЕГЧЕННЫХ  
РАСШИРЯЮЩИХСЯ ТАМПОНАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Специальность 25.00.15 – «Технология бурения и освоения скважин»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Уфа 2019**

Работа выполнена на кафедре «Бурение нефтяных и газовых скважин»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Агзамов Фарит Акрамович**

Официальные оппоненты: **Овчинников Василий Павлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный  
университет» / Институт геологии и  
нефтегазодобычи, руководитель  
образовательной программы  
**Чернышов Сергей Евгеньевич**  
Кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»/ кафедра нефтегазовых  
технологий, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»

Защита диссертации состоится «13» февраля 2020 года в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.04 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, 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](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Султанов Шамиль Ханифович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Актуальной задачей последних трех десятилетий является повышение качества крепления скважин, герметизация крепи скважин на месторождениях с низкими градиентами гидроразрыва, требующих применения облегченных тампонажных растворов.

Наиболее эффективным методом решения этих проблем является применение специальных облегченных расширяющихся тампонажных материалов. В задачи работы входило выявление роли и механизма работы модифицирующих добавок (расширяющих, облегчающих, армирующих и др.) в тампонажных цементах, проведение комплекса исследований и совершенствование рецептур облегченных тампонажных материалов.

Облегченные тампонажные цементы, являющиеся одним из основных материалов при креплении скважин, всегда имеют худший контакт с обсадной колонной и горной породой, чем более тяжелые цементы. Поэтому необходима компенсация указанных недостатков, которые часто пытаются решить вводом в цемент расширяющих добавок, эффективность использования которых резко снижается из-за неизбежного увеличения водоцементного отношения в облегченных цементных растворах и увеличения расстояния между кристаллогидратами продуктов твердения.

### **Степень разработанности темы исследования**

Исследованиями Данюшевского В.С., Агзамова Ф.А., Булатова А.И., Каримова Н.Х., Каримова И.Н., Кузнецовой Т.В., Овчинникова В.П., Рахимбаева Ш.М., Фролова А.А., Курбанова Я.М., Орешкина Д.В., Катеева Р.И., Тихонова М.А., Екшибарова В.С., Новохатского Д.Ф. и др. разработано большое количество разновидностей специальных составов тампонажных материалов. Однако усложнение горно-геологических условий бурения и повышение требований к качеству крепи, предопределяет необходимость дальнейшего совершенствования свойств тампонажного цемента, особенно это касается облегченных цементов.

**Цель работы** – улучшение качества крепления скважин путем совершенствования рецептур облегченных тампонажных растворов увеличением расширения камня за счет создания дополнительных структурных элементов в твердеющем цементном растворе.

## **Основные задачи исследований**

1 Анализ применения облегченных цементов и способов их получения.

2 Анализ способов получения расширения облегченных цементов и проблем, связанных с этим процессом в период твердения облегченных тампонажных цементов.

3 Постановка и обоснование рабочей гипотезы, основанной на получении эффекта расширения облегченного тампонажного раствора при твердении, путем использования расширяющих добавок совместно с различными типами волокон.

4 Комплексный анализ свойств облегченного тампонажного раствора и камня.

5 Совершенствование тампонажных композиций и разработка новых методик исследования тампонажного раствора (камня).

6 Выпуск облегченных расширяющихся армированных тампонажных материалов и их применение при креплении скважин.

## **Научная новизна**

1 Показано, что эффект расширения при твердении растворов из облегченных расширяющихся цементов существенно снижается по сравнению с растворами из тампонажных материалов нормальной и повышенной плотности из-за увеличения расстояния между структурными элементами продуктов твердения, вызванных повышением водоцементного отношения облегченных тампонажных растворов.

2 Установлено, что ввод фибры любых типов в облегченные цементы на 50-70 % повышает эффект их расширения при твердении за счет передачи напряжений от расширяющей добавки к продуктам твердения через пространственный каркас, образованный армирующими добавками.

3 Показано, что фибра, вводимая в состав цемента, выступает в роли газоблокирующих добавок и растворы из фиброармированных цементов обладают повышенной стойкостью к газопорыву в период ОЗЦ за счет увеличенной сопротивляемости миграции газа структурного каркаса, образованного армирующими добавками.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в решении поставленной задачи – повышение качества крепления скважин путем улучшения характеристик облегченных тампонажных материалов, используемых в сложных

геологических условиях. Методики используются в УГНТУ при изучении дисциплины «Регулирование свойств тампонажных материалов при цементировании скважин в осложненных условиях» магистрантами, обучающимися по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

Практическая значимость работы заключается в совершенствовании рецептур облегченных расширяющихся тампонажных материалов и разработки нормативной документации – ТУ, на базе лабораторных исследований, что стало основанием для изготовления в компании ООО «Цементные Технологии» опытной партии, которая использована для крепления скважин на месторождениях.

### **Методология и методы исследования**

Экспериментальные исследования параметров цементных растворов и полученного камня проводились согласно ГОСТ и стандарту Американского Нефтяного Института. Коэффициент линейного расширения изучался на приборе, имеющем кольцевую форму и моделирующем затрубное пространство скважины. Для определения давления расширения, возникающего при твердении расширяющихся цементов, был разработан специальный прибор. Взаимодействие цементной матрицы с расширяющимися, облегчающими добавками и фиброй оценивались электронной микроскопией. Для изучения фазового состава продуктов твердения использован рентгенофазовый метод. Исследовалось влияние водоцементного отношения на кинетику расширения тампонажных растворов при различных температурах твердения. Изучалась роль указанных выше модифицирующих добавок в механизме и кинетике процессов расширения. Основная часть экспериментов реализована на базе УГНТУ.

### **Положения, выносимые на защиту**

1 Результаты экспериментальных исследований рецептур облегченных тампонажных растворов с различными видами армирующих волокон с изменением водоцементного отношения.

2 Комплексный анализ свойств и параметров полученных составов цементного раствора и камня.

3 Методика и результаты исследований давления расширения цементного камня.

4 Технология получения, испытания и применения облегченных расширяющихся тампонажных материалов и растворов, а также результаты их испытаний.

#### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность результатов работы подтверждена данными экспериментальных исследований, полученными с использованием поверенных средств измерения и на аттестованном оборудовании по методикам, утвержденным в соответствующем порядке.

**Основные положения диссертационной работы** докладывались и обсуждались на: 67 и 68 - конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ в 2016 и 2017 - годах; V Международной научно-практической конференции «Экологические проблемы нефтедобычи», г. Уфа, 2015 г.; XVII Международной молодежной научной конференции «СЕВЕРГЕОЭКТЕХ-2016», г. Ухта, 2016 г.; XIII Международном Молодежном Нефтегазовом Форуме, организованным Обществом инженеров нефтегазовой промышленности (SPE), Республика Казахстан, г. Алматы, 2016 г.; Всероссийской научно-практической конференции, организованной Советом Федерации Федерального Собрания РФ «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности глазами молодежи», г. Уфа, 2016 г.; II Международном Молодежном Нефтегазовом Форуме, организованном Обществом инженеров нефтегазовой промышленности (SPE), КНР. Циндао, 2016; Ежегодном Международном Молодежном Нефтегазовом Форуме «Черное Золото», организованном Обществом инженеров нефтегазовой промышленности (SPE), г. Уфа, 2017 г.; Всероссийском этапе международного конкурса докладов молодых учёных, при участии профессоров Санкт-Петербургского Горного Университета и Института минералов, материалов и горного дела (Великобритания) «YPLC 2017», г. Санкт-Петербург, 2017 г.; Международной молодежной научно-практической конференции молодых ученых "Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии", г. Альметьевск, 2017 г.; IX Международной молодежной научной конференции «Нефтегазовые горизонты», организованной Обществом инженеров нефтегазовой промышленности (SPE), г. Москва, РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина, 2017г.; Международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле», г. Октябрьский, 2018 г.

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов докторских и кандидатских диссертаций, 12 материалов и тезисов конференций и 1 патент.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций; содержит 133 страницы машинописного текста, в том числе 19 таблиц, 46 рисунков и 4 приложения, библиографический список из 130 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы диссертационной работы и представлены ее основные положения.

**В первой главе** дан анализ состояния проблемы, рассмотрены факторы, приводящие к поглощению тампонажного раствора во время цементирования, проанализирован опыт получения и применения облегченных тампонажных цементов, рассмотрены способы расширения цементного камня.

При цементировании глубоких и сверхглубоких скважин в одну ступень, а также при цементировании скважин с низким градиентом гидроразрыва, для предупреждения поглощений тампонажных растворов необходимо снижать давление на продуктивные пласты. При этом целесообразно применение тампонажных растворов пониженной плотности с оптимальными физико-механическими свойствами. Как правило, облегченные тампонажные цементы, являющиеся основным материалом при креплении скважин в указанных условиях, получают путём увеличения водоцементного отношения и применением облегчающих добавок. Раньше это были различного вида глинопорошки с высокой водоудерживающей способностью, сейчас всё чаще, легкие наполнители: алюмосиликатные микросферы, пеностекло, стеклянные микросферы и др. Увеличение водоцементного отношения растворов приводит к образованию капиллярных и усадочных пор в цементном камне, вызывающих ухудшение контакта с обсадной колонной и горной породой. Компенсация указанных проблем в облегченном цементе решается вводом расширяющих добавок, эффективность работы которых необходимо улучшать, создавая дополнительную структуру в цементной матрице. Расширяющийся тампонажный

раствор должен быть технологичным в приготовлении, применении и недорогим. Проведенный анализ позволил сформулировать цель и задачи исследований.

**Во второй главе** сформулирована и обоснована рабочая гипотеза, рассмотрен процесс армирования тампонажного раствора как способа повышения эффективности расширяющей добавки, выбраны объекты исследования.

Увеличение водоцементного отношения в тампонажных растворах свыше 0,4 ведет к образованию большого количества капиллярных пор, способных пропускать через себя жидкости и газы. В таком случае отсутствует плотный контакт на границе порода - цементный камень, цементный камень – металл обсадной колонны. Использование расширяющих добавок в цементе можно частично решить эту проблему, однако, эффект расширения цементного камня сильно уменьшается при увеличении водоцементного отношения. Между продуктами твердения (кристаллогидратами), состоящими из цементных зерен и цементного геля, (Рисунок 1) находится расширяющая добавка (РД), которая раздвигает кристаллогидраты друг от друга, обеспечивая расширение цементного камня.

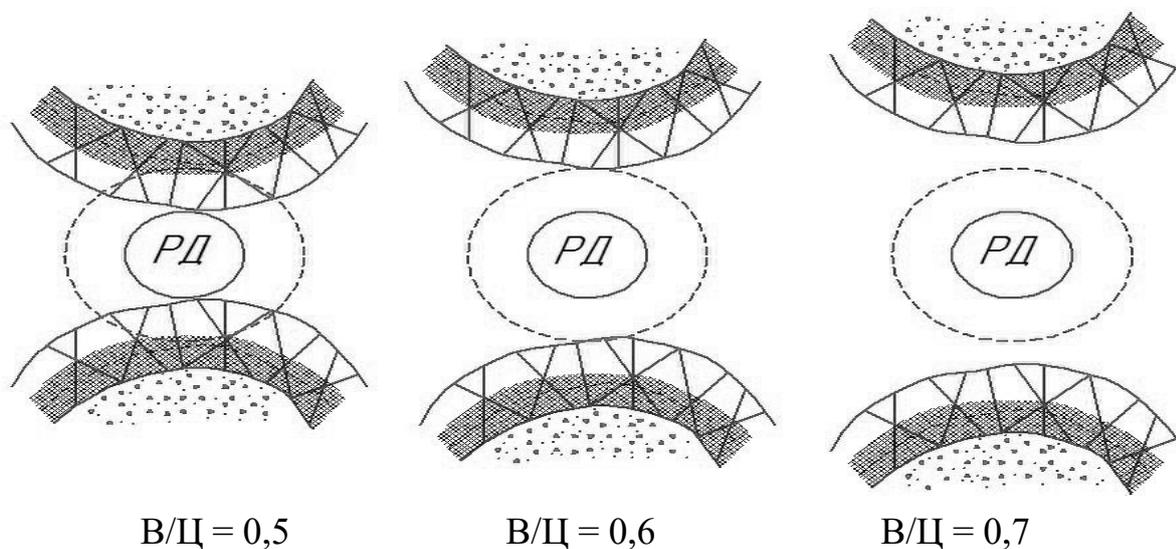


Рисунок 1 Схема, поясняющая механизм снижения эффекта расширения цементного камня при увеличении водоцементного отношения раствора

Повышение водоцементного отношения цементного раствора увеличивает расстояние между продуктами твердения цемента, приводя к тому, что расширяющая добавка после гидратации не касается кристаллогидратов, не приводя к увеличению объема цементного камня. При дальнейшем росте В/Ц расстояние еще больше увеличивается, прекращая расширение камня.

Для снижения опасных последствий увеличения В/Ц, неизбежных при получении облегченных тампонажных растворов, предлагается включить в состав цемента волокна (фибру), которая создаст каркас в цементном растворе (камне).

Использование расширяющих добавок одновременно с дисперсным армированием тампонажного материала фиброй предполагает, что расширение цементного камня должно быть выше за счет того, что кристаллизационное давление расширяющей добавки передается на камень через каркас, образованный фиброй.

Анализ промысловой информации показывает на ухудшение показателей качества цементирования после проведения внутрискважинных работ, что неоднократно отмечалось в печати.

Практика применения тампонажных растворов показывает, что внедрение технологии дисперсного армирования тампонажных растворов улучшает характеристики цементного камня по сопротивлению его динамическим нагрузкам.

Исследования проводились с портландцементом ПЦТ-I-G-СС-1 производства ОАО «Сухоложскцемент»). В качестве облегчающих добавок использованы: стеклянные микросферы (СМС), алюмосиликатные полые микросферы (АСПМ) и пеностекло (ПЕНО). В качестве расширяющей добавки использована добавка ДР-50, работающая на основе оксидного расширения.

Для армирования тампонажных материалов использовались различные виды фибр, в частности высокомодульные волокна на основе базальта и асбеста, а также низкомодульная фибра - полипропиленовое волокно.

**В третьей главе** описаны приборы, методы и средства, использованные для исследований.

Физико-механические свойства тампонажного цемента проверялись по ГОСТ 26798.2-96 «Цементы тампонажные типов I-G и I-H. Методы испытаний». Технические условия данных материалов регламентированы в ГОСТ 1581-96 «Портландцементы тампонажные. Технические условия».

Также использованы атмосферный консистометр OFITE модель 120-75-1 и тестер проницаемости цементного камня OFITE модель 360. Водоотдача определялись на фильтр – прессе и на приборе ВМ-6.

Для химического анализа использовались методы, описанные в стандартных методиках для силикатных материалов. Физические свойства,

плотность, удельные и объемные веса цементов, их удельная поверхность определялась по стандартным методам для вяжущих материалов по ГОСТ 310.1.76 «Цементы. Методы испытаний. Общие положения» и по стандарту АНИ.

Объемные деформации определялись в кольцевых формах. Для изучения контракции использован «Контрактометр ВМ-7.7». При проведении реологических исследований применялся вискозиметр OFITE Модель 900.

Для качественного и количественного анализа фазового состава материалов и продуктов твердения использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-7, а для получения изображений с пространственным разрешением 3нм растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV.

Для измерения предела прочности образцов при сжатии/изгибе использовалась универсальная испытательная машина Модель E160N. Стойкость цементного камня ударным нагрузкам оценивалась по удельной ударной вязкости разрушения, определяемой на вертикальном динамическом копре.

Для измерения давления расширения разработан, запатентован и изготовлен специальный прибор.

При проведении экспериментов использовалась методика их математического планирования. Анализ экспериментальных данных выполнялся с использованием пакета статистического анализа «STATGRAPHICS» с помощью процедур построения одно- и многофакторных моделей.

При разработке рецептур облегченных тампонажных растворов и обработке результатов экспериментальных исследований использованы методы математической статистики.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментальных работ по изучению механизма расширения облегченного цемента, реализован комплекс исследований полученных рецептур, где рассмотрены физико-механические свойства, фильтрационные свойства, структура, фазовый состав и др. Кроме этого в этой главе описываются технологии получения и применения фиброармированных расширяющихся тампонажных материалов. Приведены результаты испытаний.

Результаты исследования кинетики расширения облегченных цементов в зависимости от изменения водоцементного отношения при температуре 20 и 50 °С приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Влияние водоцементного отношения раствора (В/Ц) на коэффициент линейного расширения (КЛР) цементного камня

Массовая доля в сухой смеси, %	КЛР, %, при твердении цементов с различным В/Ц				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Температура 20 °С					
Рецептура №1 (ПЦТ+7% АСПМ+0,1% КССБ+ 2% Палыгорскит+0,15% Vinnapas+10 % РД)	1,47	1,04	0,95	0,83	0,70
Рецептура №2 (ПЦТ+ 7% ПЕНО+0,1% КССБ+ 2% Палыгорскит+0,15% Vinnapas+10 % РД)	1,35	1,16	0,91	0,78	0,63
Рецептура №3(ПЦТ+7% СМС+0,1% КССБ+ 2% Палыгорскит+0,15% Vinnapas+10 % РД)	1,54	1,14	0,74	0,61	0,52
Температура 50 °С					
Рецептура №1	0,82	0,60	0,48	0,37	0,36
Рецептура №2	0,83	0,65	0,43	0,32	0,30
Рецептура №3	0,79	0,52	0,48	0,40	0,37

Из таблицы видно, что при увеличении В/Ц коэффициент линейного расширения снижается, что подтверждает описанные выше процессы гидратации облученных цементов и кинетики их расширения.

Влияние дисперсного армирования тампонажного раствора на коэффициент линейного расширения (КЛР) цементного камня в бездобавочном цементе приведено в таблице 2.

Таблица 2 - Влияние армирования на коэффициент линейного расширения

Армирующая добавка	КЛР, %, при твердении цементов с различной концентрацией волокон				
	0	0,25	0,5	0,75	1,0
Базальтовая фибра 3 мм	0,12	0,102	0,118	0,084	0,065
Базальтовая фибра 6 мм	0,12	0,113	0,138	0,085	0,092
Полипропиленовое волокно	0,12	0,155	0,163	0,106	0,05
Асбест 6 сорт	0,12	0,099	0,115	0,106	0,092
Гранулированное волокно	0,12	0,127	0,134	0,085	0,074

При повышении концентрации фибры до 0,5 % наблюдается увеличение КЛР бездобавочного цемента. Наилучшие показатели получены при добавке полипропиленового волокна. Концентрация фибры более 0,5 % не только не

приводит к желаемому результату, но даже уменьшает значения коэффициента линейного расширения цементного камня. Полученные результаты позволили сделать вывод, о том, что для дальнейших исследований концентрация армирующей добавки 0,5 % будет наиболее оптимальной. Базальтовая фибра 3 мм и асбест 6 сорт показали наихудшие результаты, поэтому в последующих экспериментах они не применялись.

Результаты изучения влияния армирующих добавок на коэффициент линейного расширения в облегченных цементах представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Влияние армирующих добавок в составе цемента на коэффициент линейного расширения при твердении (В/Ц = 0,7, концентрация волокон - 0,5 %)

№	Состав	Т, °С	Коэффициент линейного расширения (КЛР), %, через	
			6 часов	24 часа
1	№1(ПЦТ+7% АСПМ+0,1% КССБ+ 2% Палыгорскит+0,15% Vinnapas+10 % РД)	22	0,05	1,04
		50	0,44	0,60
2	№2(ПЦТ+7% ПЕНО+0,1% КССБ+ 2% Палыгорскит+0,15% Vinnapas+10 % РД)	22	0,08	1,16
		50	0,38	0,65
3	№3(ПЦТ+7% СМС+0,1% КССБ+ 2% Палыгорскит+0,15% Vinnapas+10 % РД)	22	0,07	1,14
		50	0,42	0,52
4	№1+Базальтовое волокно 6 мм	22	0,08	1,60
		50	0,54	0,69
5	№1+Полипропиленовое волокно	22	0,13	1,75
		50	0,66	0,72
6	№1+Гранулированное волокно	22	0,11	1,55
		50	0,65	0,73
7	№2+Базальтовое волокно 6 мм	22	0,12	1,63
		50	0,35	0,44
8	№2+Полипропиленовое волокно	22	0,15	1,91
		50	0,85	0,95
9	№2+Гранулированное волокно	22	0,14	1,72
		50	0,43	0,67
10	№3+Базальтовое волокно 6 мм	22	0,09	1,51
		50	0,47	0,51
11	№3+Полипропиленовое волокно	22	0,04	1,85
		50	0,67	0,83
12	№3+Гранулированное волокно	22	0,14	1,54
		50	0,45	0,62

Исследования показали, что волокна оказывают существенное влияние на расширение цементных растворов при твердении. Наилучшие результаты получены при добавлении полипропиленового волокна независимо от вида облегчающей добавки. При применении пеностекла КЛР больше чем в

рецептурах с другими легкими наполнителями. Полученные составы расширяются в период от 6 до 24 часов при температуре 22 °С, основная часть расширения при температуре 50 °С происходила до 6 часов.

В общем случае, кинетика расширения регулируется видом расширяющих добавок. В экспериментах использовались расширяющие добавки на основе СаО, которые применяются при температурах до 50-75 °С, при температуре более 75 °С используется MgO.

В таблице 4 показано влияние фибры различных типов на предел прочности цементного камня. Время испытания 2, 7, 14 суток, температура твердения 50 °С. Ввод армирующих добавок позволяет частично компенсировать ухудшение прочностных свойств цементного камня от облегчения цементных растворов.

Таблица 4 – Прочность цементного камня (концентрация волокон - 0,5 %)

Состав	В/Ц	Предел прочности при изгибе, МПа			Предел прочности при сжатии, МПа		
		2 сут	7 сут	14 сут	2 сут	7 сут	14 сут
Бездобавочный ПЦ	0,5	2,9	3,8	4,2	10,8	15,4	27,8
Бездобавочный ПЦ	0,6	2,2	3,0	3,7	7,4	17,7	20,8
Бездобавочный ПЦ	0,7	1,5	2,6	3,1	4,5	13,8	17,5
№2	0,7	1,3	2,6	2,9	4,6	12,9	18,4
№2+Базальтовое 6 мм	0,7	2,5	3,1	3,8	10,5	17,4	24,4
№2+Полипропиленовое	0,7	1,7	2,8	3,0	5,7	16,9	19,6
№2+Гранулированное	0,7	2,3	2,9	3,9	11,5	18,1	25,6

Результаты экспериментов по определению ударной выносливости цементного камня при добавлении фибры приведены в таблице 5 и рисунке 2.

Ввод волокон положительно сказался на ударной выносливости цементного камня: наилучшие результаты получены с добавкой базальтовой фибры, при добавлении в тампонажный раствор базальтовой фибры 6 мм ударная выносливость повысилась в 2,9 раз. Полипропиленовое волокно показывает хорошие результаты, значение удельной ударной выносливости увеличилось в 2 раза. Как показывают эксперименты, добавление 0,5 % любого типа волокна не оказывает отрицательного влияния на подвижность цементных растворов. Дополнительные эксперименты показали, что концентрация алюмосиликатных

полых микросфер (АСПМ) более 10 % приводит к ухудшению показателей ударной выносливости цементного камня.

Таблица 5 – Ударная выносливость тампонажного камня

Тампонажный материал	Свойства цементного раствора			Ударная выносливость, Дж/см <sup>3</sup>		
	В/Ц	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	2R, см	2 сут	7 сут	14 сут
Бездобавочный ПЦ	0,5	1820	24	0,061	0,094	0,108
Бездобавочный ПЦ	0,6	1730	26	0,049	0,082	0,94
Бездобавочный ПЦ	0,7	1650	27	0,035	0,044	0,051
Рецептура №1	0,7	1510	24	0,038	0,050	0,062
№1+Базальтовое 6 мм (0,5%)	0,7	1500	22	0,125	0,161	0,177
№1+Полипропиленовое (0,5%)	0,7	1510	24	0,111	0,114	0,125
№1+Гранулированное (0,5%)	0,7	1500	23	0,087	0,103	0,114

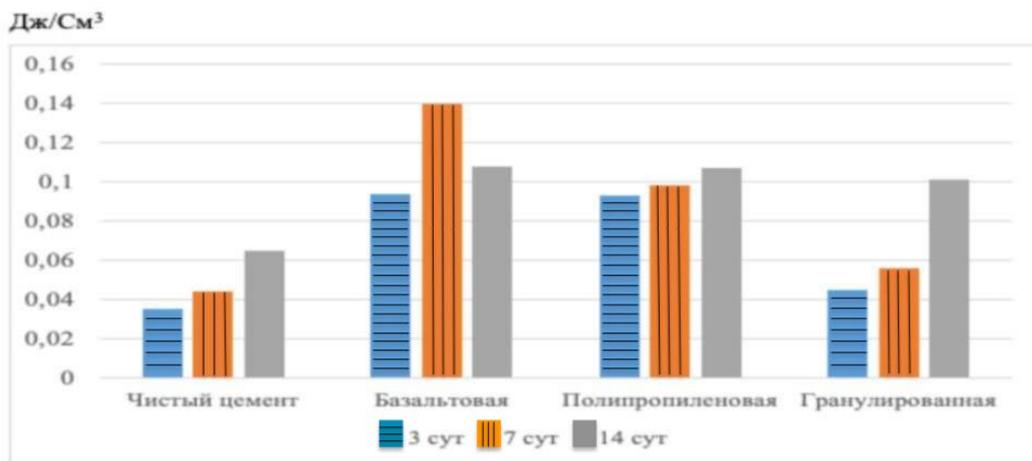


Рисунок 2 – Влияние армирования на удельную ударную вязкость разрушения цементного камня

Поскольку процессом, противоположным расширению цементного камня, является контракция, то было исследовано влияние расширяющих добавок и фиброармирования на данный показатель (Таблица 6).

Проведенные эксперименты показывают незначительное уменьшение контракции цемента при добавлении волокна в составы облегченного цементного раствора. Уменьшение контракции цемента при увеличении водоцементного отношения можно объяснить уменьшением количества твердой фазы в

тампонажном растворе. Полностью избежать контракции не представляется возможным.

Таблица 6 – Контракция при твердении цементных растворов

Состав	В/Ц	Контракция, % после твердения		
		3 час	7 час	12 час
Бездобавочный ПЦ	0,5	0,58	0,94	1,06
Бездобавочный ПЦ	0,6	0,62	10,2	1,36
Бездобавочный ПЦ	0,7	0,42	0,74	1,14
№3	0,7	0,5	0,7	1,14
№3+Базальтовое 6 мм	0,7	0,46	0,61	0,82
№3+Полипропиленовое	0,7	0,43	0,54	0,79
№3+Гранулированное	0,7	0,44	0,63	0,77

Результаты исследования фильтрационных свойств тампонажного раствора (Таблица 7) показывают, что все типы волокон снижают водоотдачу, но не так существенно, как специальные добавки - регуляторы водоотдачи.

Таблица 7 – Фильтрационные свойства тампонажных растворов

Состав	В/Ц	Водоотделение, мл/2 часа		Водоотдача, см <sup>3</sup> /30 мин
		0 град	45 град	
Бездобавочный ПЦ	0,5	10	12	338
Бездобавочный ПЦ	0,6	9	10	350
Бездобавочный ПЦ	0,7	8	10	360
№1	0,7	8	9	90
№2	0,7	8	10	87
№3	0,7	7	8	70
№1+Базальтовое 6 мм	0,7	6	8	75
№1+Полипропиленовое	0,7	6	8	78
№1+Гранулированное	0,7	7	8	80
№2+Базальтовое 6 мм	0,7	5	8	69
№2+Полипропиленовое	0,7	5	7	73
№2+Гранулированное	0,7	5	8	75
№3+Базальтовое 6 мм	0,7	4	6	43
№3+Полипропиленовое	0,7	4	7	52
№3+Гранулированное	0,7	5	7	55

Это связано с тем, что армирующая добавка инертна и неспособна химически или физически связать свободную воду в отличие от добавок – регуляторов водоотдачи. Использование всех типов армирующих добавок снижает водоотделение растворов. Это связано с тем, что образованный волокнистый каркас позволяет удерживать воду в системе.

Также необходимо отметить положительное влияние на водоотделение стеклянных микросфер. Уже на этапе приготовления раствора можно было сделать вывод, что раствор со стеклянными микросферами имеет однородную структуру, что нельзя сказать об алюмосиликатных микросферах и пеностекле. Наблюдается всплытие частиц облегчающих реагентов.

Измерение реологических параметров тампонажного раствора имеет большое значение при строительстве скважин, как на этапе разработки гидравлической программы, так и на этапе процесса цементирования, поэтому изучение реологии полученных рецептур являлось следующим этапом работ (Таблица 8).

Таблица 8 –Реологические свойства тампонажного раствора

Состав	В/Ц	Реологические параметры			
		ПВ, мПа*с	ДНС, Па	СНС, 10 с, Па	СНС, 10 мин, Па
Бездобавочный ПЦ	0,5	14,11	1,40	1	4
Бездобавочный ПЦ	0,6	15,74	0,53	1	3
Бездобавочный ПЦ	0,7	2,23	6,88	1	3
№1	0,7	9,79	2,24	1	4
№2	0,7	14,05	0,75	1	3
№3	0,7	15,11	1,90	3	4
№1+Базальтовое 6 мм	0,7	25,13	0,22	7	10
№1+Полипропиленовое	0,7	42,31	4,33	6	10
№1+Гранулированное	0,7	15,17	3,82	4	5
№2+Базальтовое 6 мм	0,7	36,50	7,35	15	19
№2+Полипропиленовое	0,7	40,56	5,18	15	24
№2+Гранулированное	0,7	15,16	0,78	1	3
№3+Базальтовое 6 мм	0,7	38,17	9,84	6	9
№3+Полипропиленовое	0,7	44,21	7,74	9	12
№3+Гранулированное	0,7	17,78	10,70	6	10

Результаты экспериментов показывают относительно небольшие изменения реологических параметров тампонажного раствора. Наибольшие отклонения значений пластической вязкости (ПВ) и динамического напряжения сдвига (ДНС) наблюдаются при комбинации стеклянных микросфер и армирующих волокон различного типа.

Результаты оценки основных технологических свойств цементных растворов представлены в таблице 9. Исследования позволяют сделать вывод, что добавление волокон в цементный раствор не приведет к увеличению гидравлических сопротивлений и повышению давления на насосах цементировочных агрегатов в процессе цементирования скважины.

Таблица 9 – Технологические свойства цементных растворов

Состав	Растекаемость, см	Время загустевания, ч-мин	Начало схватывания, ч-мин	Конец схватывания, ч-мин
ПЦТ-I-50 В/Ц=0,5; $\rho=1850 \text{ кг/м}^3$	21	2-00	2-25	3-20
ПЦТ-I-G-CC-1 В/Ц=0,44; $\rho=1850 \text{ кг/м}^3$	21	5-30	7-30	11-55
ПЦТ-III-ОБ-5-50; В/Ц=0,8; $\rho=1520 \text{ кг/м}^3$	17	4-30	1-35	6-05
№1 + ВСМ; В/Ц=0,7; $\rho=1500 \text{ кг/м}^3$	20	4-40	4-30	7-20
№2 + ВСМ; В/Ц=0,7; $\rho=1500 \text{ кг/м}^3$	21	5-00	4-30	7-45
№3 + ВСМ; В/Ц=0,7; $\rho=1500 \text{ кг/м}^3$	18	4-00	3-30	6-30

Проведенные работы показали, что цементы с концентрацией волокна более 0,5 % нецелесообразно применять при цементировании хвостовиков совместно с технологией установки пакеров. Необходимо избегать применения таких цементов при прокачивании раствора через малые отверстия, потому что есть вероятность их забивания фиброй и повышение давления прокачки.

Армирующая добавка концентрацией 0,5 % практически не оказывает влияние на растекаемость тампонажного раствора, что нельзя сказать об облегчающих добавках. Сильное уменьшение растекаемости наблюдается при добавлении стеклянных микросфер. Это связано с тем, что данная модифицирующая добавка является тонкодисперсной и связывает большое количество свободной воды.

Время загустевания и сроки схватывания отвечают требованиям ГОСТ 1581–96 (время загустевания до консистенции 30 Вс должно составлять не менее 90 минут для тампонажных растворов ПЦТ-I-50 и ПЦТ-1-G-CC-1).

До настоящего времени отсутствовали методики измерения давления расширения твердеющего цемента. Для проведения данных экспериментов был применен специальный запатентованный и изготовленный прибор, в таблице 10 показаны результаты этих экспериментов.

Полученные результаты показывают, что используемые рецептуры облегченного тампонажного раствора позволяют получить цементный камень, который будет создавать плотный контакт между границами порода - цементный камень - металл обсадной колонны, повышая качество крепления скважин. Также можно исключить вероятность смятия обсадной колонны при твердении тампонажного раствора.

Таблица 10 – Давление расширения твердеющего тампонажного раствора

Состав	В/Ц	Давление расширения, МПа, через			
		6 час	18 час	24 час	48 час
№1+Полипропиленовое волокно	0,7	0,33	1,13	1,29	1,21
№2+Полипропиленовое волокно	0,7	0,46	1,07	1,39	1,37
№3+Полипропиленовое волокно	0,7	0,51	1,24	1,43	1,51

Исследование взаимодействия фибры с цементной матрицей, проведенное с помощью электронного микроскопа, показало (Рисунок 3), что базальтовая фибра образует плотный контакт между добавкой и матрицей, и демонстрирует отсутствие между ними зазоров и каких-либо трещин.

На рисунке 4 показана зона контакта между базальтовой фиброй, продуктами твердения и расширяющей добавкой. Наличие расширяющей добавки было доказано проведением элементного анализа ядра добавки. Из этого рисунка также можно сделать вывод о том, что все компоненты находятся в тесном контакте друг с другом, что в очередной раз подтверждает рабочую гипотезу.

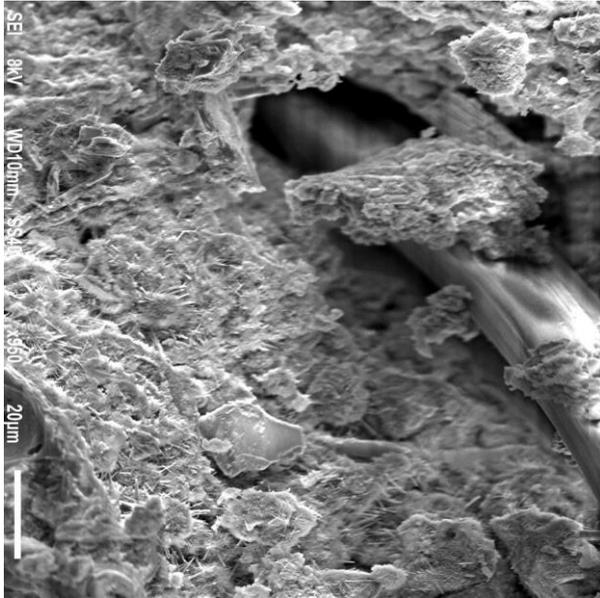


Рисунок 3 – Область контакта между фиброй и цементной матрицей (x950)

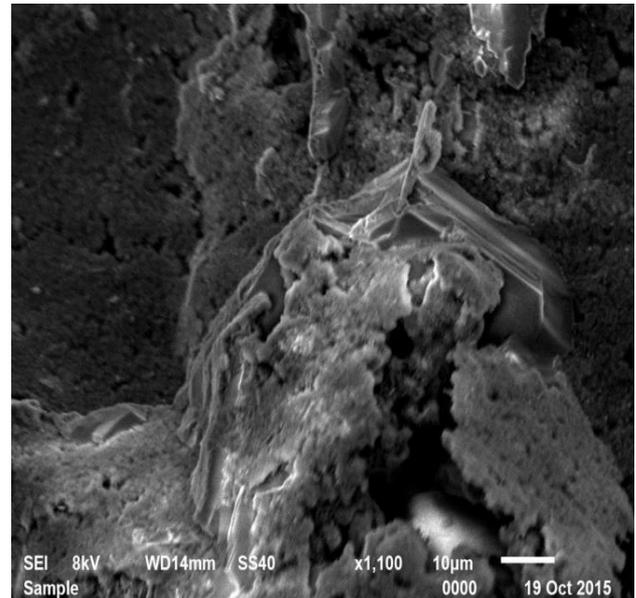


Рисунок 4 – Влияние базальтовой фибры на расширение (x1100)

Проницаемость цементного камня (таблица 11) с добавлением различных волокон незначительно снижается, уменьшая вероятность попадания в цементную матрицу опасных пластовых флюидов. Это говорит о multifunctionality армирующей добавки. Можно предполагать, что в некоторых случаях, кроме всего прочего, используемые волокна будут выступать в качестве кольтматирующего агента при поглощениях тампонажного раствора.

Таблица 11 – Проницаемость цементного камня

Состав	В/Ц	Проницаемость, мД после твердения		
		2 сут	7 сут	15 сут
Бездобавочный ПЦ	0,5	87,3	7,7	3,4
Бездобавочный ПЦ	0,6	154,3	15,5	4,7
Бездобавочный ПЦ	0,7	201,2	18,7	7,1
№3	0,7	184,4	16,8	6,8
№3+Базальтовое 6 мм	0,7	77,1	3,3	2,9
№3+Полипропиленовое	0,7	110,1	4,7	3,5
№3+Гранулированное	0,7	131,2	6,7	4,2

Снижение плотности облегченных цементных растворов всегда достигается либо увеличением В/Ц, либо снижением плотности твердой фазы, что сказывается на качестве цементирования обсадных колонн, в том числе и с точки зрения устойчивости к миграции газа. Поэтому было важно изучить снижение давления

тампонажного раствора и поведение облегченного цемента при движении через него газа.

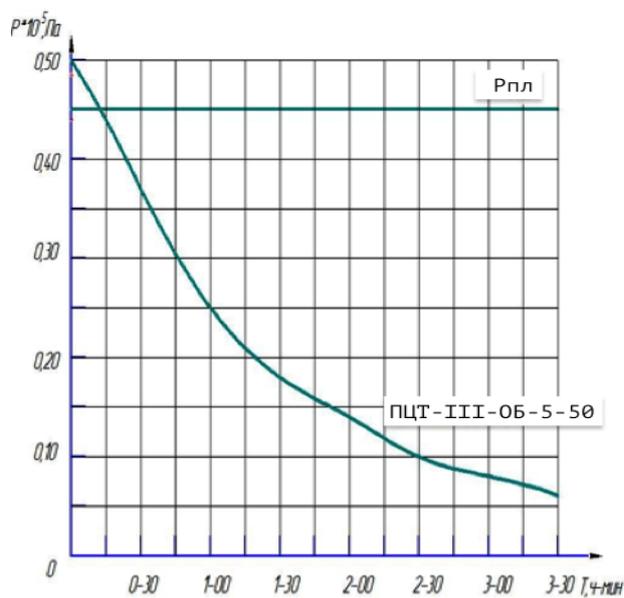


Рисунок 5 – Изменение гидростатического давления раствора на основе ПЦТ-III-ОБ-5-50

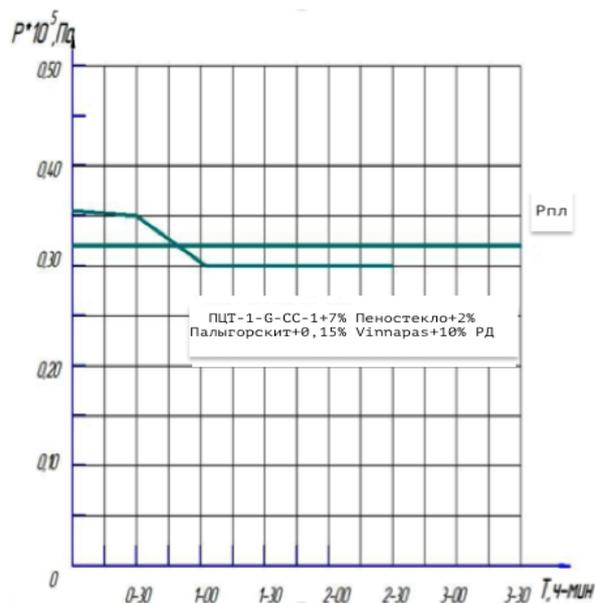


Рисунок 6 – Изменение гидростатического давления разработанного цементного раствора

Исследование гидростатического давления столба заводского облегченного тампонажного раствора показывают падение давления уже через 10 минут твердения (Рисунок 5).

Эксперименты на газовый прорыв показывают неспособность облегченных растворов удерживать мигрирующий газ, и уже через короткое время (10 минут) на устье модели скважины (длина 3 м) появились пузырьки газа. Далее изучался облегченный цементный раствор на основе ПЦТ-1-G-CC-1 (Рисунок 6) с  $V/C=0,7$ , обработанный добавкой КССБ, стабилизатором Vinoras 5010, с добавлением облегчающей добавки Пеностекло (0,25-0,50 мм), расширяющей добавкой ДР-50 и армирующей добавкой (ВСМ).

Во время первого этапа эксперимента состав показал хорошую динамику изменения давления для облегченного цемента. После 50 минут твердения установлено небольшое падение давления, но через некоторое время давление раствора перестало падать. Результаты экспериментов говорят о том, что полученные рецептуры с модифицирующими добавками существенно повышают сопротивляемость тампонажного раствора к газовому прорыву. Причём,

становится ясным, что основным компонентом, влияющим на сопротивляемость газопрорыву, является армирующая добавка.

Результаты исследований, приведенных в диссертационной работе, стали основой разработки нормативной документации (ТУ 5734-014-55839907-2017) на облегченные расширяющиеся тампонажные материалы и ТУ 23.64.10-022-55839907-2017 на выпуск опытных партий облегченных расширяющихся армированных тампонажных материалов. Данный этап работы выполнялся совместно со специалистами ООО «Цементные Технологии», на промышленном производстве которого проводится выпуск материалов. Особенностью технологической линии ООО «Цементные технологии» является возможность получения многокомпонентных смесей с любым их соотношением.

В соответствии с разработанной рецептурой облегченного армированного тампонажного материала в марте 2018 года на производственных мощностях ООО «Цементные технологии» была выпущена опытная партия в количестве 300т.

Согласно документам о внедрении разработанный на кафедре Бурения нефтяных и газовых скважин Уфимского Государственного Нефтяного Технического Университета и выпущенный ООО «Цементные технологии» облегченный армированный тампонажный материал использован при цементировании верхних участков промежуточной и эксплуатационной колонн на скважине №9670 (ГУ-52) пл. Узень, Республика Казахстан, товарищество с ограниченной ответственностью «BJ-URAL» и на скважине №105 месторождения Айрақты, Республика Казахстан, товарищество с ограниченной ответственностью «MCF Services» .

В результате применения разработанных тампонажных материалов в сочетании с инженерно-технологическим сопровождением работ по креплению скважин достигнуто повышение на 20-25 % доли сплошного контакта цементного камня с сопредельными средами. Проведенные испытания показали эффективность тампонажных материалов, технологичность их применения. Осложнений в процессе цементирования скважины не отмечено.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ**

1 Обоснованы принципы получения облегченных расширяющихся тампонажных растворов заключающиеся в направленном модифицировании

тампонажного материала путем введения в его состав легких наполнителей, расширяющей и армирующей добавки, обеспечивающей повышение эффекта расширения при твердении раствора за счет передачи кристаллизационного давления к матрице цементного камня через пространственный каркас образованный армирующей добавкой.

2 Показано, что кристаллизационное давление расширяющей добавки и коэффициент линейного расширения в облегченных цементах, получаемых за счет увеличения водоцементного отношения, снижается в результате увеличения расстояния между кристаллогидратами цементной матрицы.

3 Исследования взаимодействия фибры с цементной матрицей, проведенные с помощью электронного микроскопа и элементного анализа, показали взаимодействие между базальтовой фиброй, продуктами твердения и расширяющей добавкой, причем базальтовая фибра и легкие наполнители имеют высокую адгезию с цементной матрицей.

4 Анализ основных свойств облегченных тампонажных растворов и получаемого камня показал, что многие из них могут значительно улучшиться при фиброармировании. В частности:

- уменьшается водоотделение раствора, а также на 30-50% повышается седиментационная устойчивость, благодаря образованию армированной структуры в цементном растворе, удерживающей свободную воду;

- базальтовая фибра и другие виды волокон повышают прочность цементного камня: при сжатии на 11-12%, при изгибе на 15-18%;

- при добавлении базальтовой фибры длиной 6 мм ударная выносливость повысилась в 2,9 раз, а при применении полипропиленового волокна в 2 раза;

- снижается газопроницаемость цементного камня и повышается сопротивление крепи скважины газопрорыв в период ОЗЦ;

- проницаемость цементного камня с добавлением различных волокон снижается, уменьшая вероятность попадания в цементную матрицу опасных пластовых флюидов. Добавляемые в цемент фиброармирующие волокна будут выполнять роль кольматирующего агента при поглощениях тампонажного раствора.

6 Для определения давления расширения цементного камня обоснован, разработан, изготовлен и запатентован специальный прибор, с помощью которого определены значения давления расширения цементного камня при твердении.

7 На технологической линии ООО «Цементные Технологии» выпущена партия облегченных расширяющихся армированных цементов, которые были использованы при цементировании скважин на месторождениях Республики Казахстан. В результате применения разработанных тампонажных материалов в сочетании с инженерно-технологическим сопровождением работ по креплению скважин достигнуто повышение на 20-25 % доли сплошного контакта цементного камня с сопредельными средами.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих научных изданиях:**

**В ведущих рецензируемых научных журналах и печатных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Бекбаев А.А., Агзамов Ф.А., Хафизов А.Р., Лягов А.В. Исследование армированных облегченных тампонажных материалов. – Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2017. – Т. 9, №4. – С. 131-148.

2. Агзамов Ф.А., Бекбаев А.А. Исследование влияния армирующих добавок на расширение в облегченных цементах (на русском и английском языках). – Нефтегазовое дело. – 2016. – Т.14, №1. – С. 11-19.

3. Бекбаев А.А., Агзамов Ф.А., Комлева С.Ф. Дисперсное армирование облегченных цементов - Сетевое научное издание «Нефтяная провинция». № 3(15) 2018, С. 127-141.

4. Бекбаев А.А., Агзамов Ф.А. Дисперсное армирование, как фактор повышения качества облегченных цементных растворов - Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море № 8, 2018, С. 38-42

**В других изданиях:**

1. Бекбаев А.А., Мухаметзянов Н.З. Исследования коэффициента линейного расширения в облегченных цементах. - Материалы V Международной конф. «Экологические проблемы нефтедобычи» – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2015. – С. 188.

2. Бекбаев А.А. Влияние плотности тампонажного раствора на объемные изменения тампонажного камня в процессе твердения. - XVII Международная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2016». - Сборник докладов. Ухта, 2016, С. 28-31.

3. Бекбаев А.А., Султанов Т.М. Исследование эффекта расширения при дисперсном армировании облегченных тампонажных растворов. – Материалы XIII Международного Нефтегазового Форума, г.Алматы, Казахстан, 2016, С. 18-20.

4. Бекбаев А.А. Повышение герметичности крепи скважины на месторождениях с низким градиентом гидроразрыва. – Сборник проектов всероссийского форума «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности глазами молодежи» - Уфа, 2016, С. 68-69.

5. Нурғалиев М.Ф., Султанов Т.М., Бекбаев А.А. Измерение давления при расширении цементного камня. - 67-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов: Сборник материалов конференции/УГНТУ. - Уфа, 2016, С.70-71.

6. Бекбаев А.А. Исследование армированных облегченных тампонажных материалов. Материалы Международного Молодежного Нефтегазового Форума, г.Циндао, Китай: КНУ, 2016, С. 18-20.

7. Нгуен В.Т., Бекбаев А.А. Исследование изменения объема облегченного цемента в процессе твердения. - 68-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов: Сборник материалов конференции/УГНТУ. - Уфа, 2017, С.47-48.

8. Бекбаев А.А. Облегченные расширяющиеся армированные тампонажные материалы. - Международная научно-техническая конференция «Черное золото». Сборник научных трудов, БГУ, Уфа, 2017 г, С.66.

9. Бекбаев А.А. Новый подход к получению облегченного расширяющегося цемента при строительстве скважин в сложных геологических условиях. - Всероссийский этап международного конкурса докладов молодых учёных «YPLC 2017», г. Санкт – Петербург, Горный Университет, 2017, С. 21-23.

10. Бекбаев А.А. Композиционные материалы, их влияние на расширение цементного камня. - Международная конференция "Энергия молодёжи для нефтегазовой индустрии". Сборник материалов. г.Альметьевск, АГНИ, 2017, С. 244-249.

11. Бекбаев А.А. Применение облегченного тампонажного материала. Комплексный анализ. - IX Международная молодежная научная конференция «Нефтегазовые горизонты», г. Москва, РГУ им. Губкина, 2017, С. 48-51.

12. Бекбаев А.А., Султанов Т.М., Мухаметзянов Н.З. Реологические и фильтрационные параметры облегченных армированных цементов. - Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в нефтегазовом деле – 2018», Материалы конференции, г. Октябрьский, УГНТУ, 2018, С. 272-275.

**Патенты:**

1. Агзамов Ф.А., Бекбаев А.А., Нургалиев М.Ф., Султанов Т.М., Токунов Т.В. Установка для определения давления расширения тампонажных материалов. Патент РФ № 165375 опубл. 20.10.2016. Бюл. 29.