

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П.О. Сухого»

Кафедра «Нефтегазозаготовка и гидропневмоавтоматика»

**Курсовая работа**  
*по дисциплине «Буровые и тампонажные растворы»*  
Тема:  
**«Специальные тампонажные растворы»**

Выполнил студент  
группы ЗНР-31

Грибанов А.М.

Проверил преподаватель

Атвиновская Т.В.

Гомель 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	6
1.1. Качество цементирования .....	6
1.2. Коррозионно-стойкие тампонажные растворы.....	9
1.3. Гидрофобные цементы.....	15
1.4. Дисперсно - армированные тампонажные цементы.....	17
1.5. Расширяющиеся тампонажные цементы.....	21
1.6. Облегчённые и утяжелённые тампонажные растворы.....	30
ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СКВАЖИН.....	35
Заключение.....	44
Список литературы.....	46

## ВВЕДЕНИЕ

**Тампонажные растворы** применяются при креплении обсадных колонн к стенкам скважины, а также при ремонте скважин. В отличие от буровых растворов тампонажные способны превращаться в твердое тело. В подавляющем количестве случаев в качестве вяжущего вещества в тампонажных растворах используется портландцемент. Поэтому в учебных пособиях термин «крепление скважин» отождествляется с термином «цементирование скважин». Тампонажные растворы – это комбинации спецматериалов или составов, используемых для тампонирования. Тампонажные смеси с течением времени могут затвердевать с образованием тампонажного камня или загустевать, упрочняться, оставаясь вязкой или вязко-пластичной системой.

Цементирование скважин – наиболее ответственный этап их строительства. Недоброкачественное цементирование скважин нередко является единственной причиной газопроявлений, грифообразования и открытых нефтяных и газовых фонтанов. Оно приводит к перетокам нефти и газа в другие пласты, имеющие меньшее давление, обводнению продуктивных горизонтов.

### Материалы для приготовления тампонажных растворов:

- на неорганической основе: вяжущие – цементы, гипс, известь;
- на органической основе: синтетические смолы, битумы, латексы;
- жидкости затворения: пресная вода, минерализованная вода, углеводородные жидкости;
- добавки, регулирующие плотность растворов, придания им закупоривающих свойств (наполнители), снижения стоимости;
- материалы для регулирования сроков схватывания и реологических характеристик (реагенты).

### Тампонажный портландцемент

Тампонажный портландцемент представляет собой разновидность силикатного цемента. Основная часть – **клинкер**, который получают обжигом смеси известняка и глины до спекания при температуре  $1450^{\circ}\text{C}$ . Известь при обжиге дает окись кальция. Глина является источником окиси кремния (кремнезема), окиси алюминия (глинозема) и окиси железа. При помоле к клинкеру добавляют 3-6 % гипса и вводят 10-14 % минеральных добавок. Они улучшают некоторые свойства раствора и камня, а также экономят дорогостоящий клинкер. При обжиге клинкера окиси взаимодействуют друг с другом, образуя искусственные минералы.

#### **Основные минералы портландцемента:**

- алит – трехкальциевый силикат-  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ;
- белит – двухкальциевый силикат-  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ;

- трехкальциевый алюминат –  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- целит -четырекальциевый алюмоферрит-  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

К специальным цементам относятся следующие:

1. Облегченные тампонажные материалы, в частности, пуццолановый цемент (изготавливается путем совместного помола портландцементного клинкера и пуццолана), цементно-золяные смеси, пуццоланово-известковый и золяно-известковый цементы.

Существуют также сверхлегкие тампонажные растворы ( $\rho < 1250 \text{ кг/м}^3$ ). Такая низкая плотность тампонажного раствора достигается путем насыщения его пустотными микросферами или сжатым азотом при предварительной его обработке ПАВ, стабилизирующим пену.

2. Утяжеленные тампонажные материалы, получают:

- введением примеси утяжелителя, в частности, песка, барита, ильменита, гематитовой руды;
- снижением водоцементного отношения с сохранением подвижности тампонажного раствора за счет введения в него пластификаторов.

3. Расширяющиеся цементы.

Расширение в специальных цементах, которые изготавливаются в США, обусловлено образованием в процессе гидратации гидросульфаминов типа этtringита. Абсолютная величина расширения не должна превышать 0,5 %.

Существует три основных типа расширяющихся цементов:

- 1) тип К - смесь портландцемента с сульфаминатом кальция;
- 2) тип S - портландцемент (класс А) с повышенным содержанием  $\text{C}_3\text{A}$  и примесью  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ;
- 3) тип М - портландцемент (класс А) с незначительной примесью кислотостойкого цемента.

К специальным цементам также относят:

- цементы с примесью латекса (латекс-цементы); они отличаются низкой водоотдачей, улучшенными реологическими параметрами, а цементный камень приобретает высокую упругость;
- портландцемента с примесью бентонита (8-25 %) и пластификаторов (лигносульфоната). Такие составы имеют низкую водоотдачу и относятся к облегченным цементам;
- солевые гелцементы, которые изготавливаются из портландцемента, бентонита (12-16 %), соли (например,  $\text{NaCl}$ ), лигносульфоната кальция (0,1-1,5 %); они отличаются пониженной вязкостью и используются для цементирования солевых отложений [1].

Для регулирования свойств тампонажных растворов используются:

- ускорители твердения: хлористый кальций, хлористый натрий, кремнекислый натрий и другие неорганические ускорители;
- замедлители твердения: для низких температур; для высоких и сверхвысоких температур. Такие замедлители относятся к

лигносульфонатам, органическим кислотам, производным целлюлозы, боратам и др.;

- пластификаторы. Большинство пластификаторов представляют собой модифицированные лигносульфонаты и низкомолекулярные водорастворимые смолы;

- вещества понижающие водоотдачу. В основном это производные целлюлозы.

## ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1.1. КАЧЕСТВО ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ

Успех цементировочных работ определяется техникой и технологией проведения процессов цементирования, качеством подготовительных работ, тампонажного материала и полнотой замещения бурового раствора тампонажным.

Для выбора рецептуры тампонажного раствора при цементировании скважин не всегда можно по установленному геотермическому градиенту точно вычислить температуру забоя скважины.

При цементировании скважин необходимо знать статическую и динамическую температуры.

Статическая температура — это температура пород нетронутого массива. В скважинах температура забоя принимается близкой к статической, если буровой раствор в ней не циркулирует в течение 2 — 4 сут.

Под динамической температурой понимается установившаяся температура в скважине на некоторой глубине в процессе циркуляции в ней бурового раствора. Практически считается, что постоянная динамическая температура устанавливается в скважине после одного-двух циклов циркуляции бурового раствора. Динамическая температура на забое всегда ниже статической. Разность температур зависит от ряда геолого-технических и технологических условий и составляет для скважин глубиной до 6000 м десятки градусов. Однако в каждом конкретном случае ее следует проверять. Для первичного цементирования скважин рецептуру тампонажного раствора подбирают с учетом динамической температуры, для проведения повторных цементирований — исходя из статической температуры.

Требования к тампонажным материалам для цементирования нефтяных и газовых скважин в основном определяются геолого-техническими условиями в скважинах. Проблема выбора материалов сложна. Тампонажный раствор должен оставаться подвижным во время транспортирования в заколонное пространство и сразу же после прекращения процесса затвердеть в безусадочный камень с определенными физико-механическими свойствами. Указанные процессы происходят в стволе скважины сложной конфигурации, где температуры и давления изменяются с глубиной, имеются поглощающие и высоконапорные пласты, а также пласты с наличием минерализованных вод, нефти и газа. При таких изменяющихся условиях один тип цемента или одна и та же рецептура тампонажного раствора не могут быть одинаково приемлемы. Один тип цемента не может отвечать всем требованиям, связанным с разнообразием условий даже в одной скважине[7].

Для осуществления процесса цементирования с наибольшим вытеснением бурового раствора тампонажным следует выполнить ряд специальных мероприятий. Такие мероприятия могут и не обеспечить полного вытеснения бурового раствора тампонажным, однако в интервалах

обязательного заполнения тампонажным раствором этого добиться можно. Необходимо обеспечить контактирование тампонажного раствора со стенкой скважины и обсадной колонной. Применение комплекса технологических мероприятий с расхаживанием обсадных колонн при использовании скребков и других приспособлений изменит условия формирования тампонажного раствора.

Качественное цементирование скважин следует планировать на стадии бурения, обеспечивая форму ствола, приближающуюся по конфигурации к цилиндру.

Подвижность тампонажного раствора. Наиболее важное свойство тампонажного раствора — его подвижность, т.е. способность легко прокачиваться по трубам в течение необходимого для проведения процесса цементирования времени. Подвижность (растекаемость) раствора устанавливается при помощи конуса АзНИИ. Это свойство тампонажных материалов определяется природой вяжущего, тонкостью помола, водоцементным отношением, количеством, степенью загрязненности и удельной поверхностью наполнителя, добавок, а также условиями, в которых раствор пребывает в течение процесса цементирования, временем и способом перемешивания раствора. Требуемая подвижность раствора обусловлена техникой и технологией проведения тампонажных работ и может быть изменена в желаемую сторону.

Метод определения подвижности позволяет быстро подбирать количество воды при соответствующем составе смеси. Полученные при этом результаты могут рассматриваться как ориентировочные. Для глубоких скважин с малыми зазорами растекаемость тампонажных растворов рекомендуется повышать до 22 см. Раствор считается соответствующим ГОСТ 1581—91, если диаметр круга расплывшегося раствора не менее 180 мм при водоцементном отношении 0,5.

Плотность тампонажного раствора — одна из важнейших его характеристик. В процессе цементирования скважины плотность — практически пока единственный критерий для оценки качества тампонажного раствора.

Колебания плотности тампонажного раствора при цементировании указывает на изменения его водоцементного отношения. Такие колебания считаются нарушением технологического режима процесса и могут привести к осложнениям, в частности, к повышению давления при цементировании. Особенно трудно на практике придерживаться заданной рецептуры при затворении цементных смесей, дающих облегченные тампонажные растворы. Уменьшение плотности — это увеличение водоцементного отношения, что приводит к ухудшению свойств камня.

Учитывая, что водоцементное отношение определяет и другие физико-механические свойства, необходимо строго контролировать изменение плотности тампонажного раствора при цементировании и не допускать

отклонений от заданной величины. Процесс цементирования проходит обычно нормально, если колебания плотности не превышают 0,02 г/см<sup>3</sup>.

Сроки схватывания тампонажных растворов. Пригодность тампонажного раствора для транспортирования в заколонное пространство скважины оценивается сроками схватывания. Для определения этих сроков при температурах 22 и 75 °С применяют прибор, называемый иглой Вика.

Началом схватывания считается время от момента затворения цемента водой до момента, когда игла, погружаясь в раствор, не доходит до нижней пластины на 0,5—1,0 мм, а концом схватывания — время от момента затворения цемента водой до момента, когда игла, погружаясь в раствор, проникает в него не более, чем на 1 мм.

Для определения сроков схватывания тампонажных растворов при высоких температурах и давлениях применяют специальный прибор - автоклав, рассчитанный на рабочее давление до 100 МПа и высокую температуру.

Сроки схватывания тампонажных растворов подбирают исходя из конкретных условий.

Консистенция тампонажного раствора. Для цементирования глубоких высокотемпературных скважин кроме сроков схватывания в статических условиях необходимо устанавливать изменение загустевания (консистенции) тампонажных растворов во времени в процессе их перемешивания.



## 1.2. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ ТАМПОНАЖНЫЕ РАСТВОРЫ

К коррозионно-стойким тампонажным материалам относятся разновидности портландцементов, обладающих умеренной и повышенной сульфатостойкостью, в которых ограничено содержание трехкальциевого силиката и трехкальциевого алюмината. Такие цементы менее подвержены сульфатной коррозии, чем обычные.

### Пуццолановые цементы

Повышенной сульфатостойкостью обладают пуццолановые портландцементы, содержащие гидравлически активные кислые минеральные добавки. Эти добавки способны связывать гидроксид кальция, выделяющийся при гидролизе цементных минералов, понижать его равновесную концентрацию и препятствовать тем самым образованию гидросульфата алюмината кальция, вызывающего разрушение цементного камня.

К материалам, обладающим пуццоланирующим действием, относятся вулканические туфы, трассы и пемзы, кремнеземистые породы осадочного происхождения, прокаленные глинистые породы и др. В состав тампонажных цементов входят почти все известные пуццолановые добавки, однако лучшее и наиболее широко используемой является пылевидная зола. В отличие от других пуццолановых добавок она не требует повышения водосодержания из-за невысокой водопотребности округлых частиц золы. Это обстоятельство имеет большое значение в условиях опасности коррозии, так как повышение водосодержания раствора неизбежно приводит к повышению проницаемости образующегося камня для агрессивных сред.

Пуццолановые тампонажные цементы характеризуются повышенной стойкостью к сульфатной коррозии и коррозии выщелачивания. Оба эти вида коррозии более опасны в «холодных», чем в горячих скважинах. Пуццолановые цементы, особенно с кремнеземистыми добавками осадочного происхождения, обладают худшей стойкостью по отношению к магниевой коррозии, чем обыкновенный портландцемент. Несколько лучше в этих средах стойкость цементов с пылевидной золой.

### Глиноземистый цемент

Глиноземистый цемент получают обжигом до спекания или плавления смеси, состоящей из карбоната кальция. Смесь составляют с таким расчетом, чтобы полученный в результате обжига клинкер содержал в основном низкоосновные алюминаты кальция.

Основным минералом, обеспечивающим вяжущие свойства глиноземистого цемента, является однокальциевый алюминат  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , его содержится 40-50%. Другим алюминатным минералом является  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ , содержание которого составляет 5-15%. В малоизвестных глиноземистых цементах появляется алюминат  $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ . Присутствие в

сырьевых материалах кремнезема приводит к образованию галенита -  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , и двухкальциевого силиката -  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Оба эти соединения, особенно геленит, гидравлически малоактивны. Поэтому присутствие в глиноземистом цементе большого количества  $\text{SiO}_2$  нежелательно: его должно быть не более 13-14%.

При гидратации низкоосновных алюминатов кальция вначале образуется гидроалюминат  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , который затем переходит в  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . При этом выделяется -  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Гидратация  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  приводит к образованию гексагонального гидроалюмината  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Все эти гидраты метастабильны и постепенно переходят в кубический гидроалюминат  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  и гиббсит  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . В результате процесса перекристаллизации прочность постепенно снижается.

Глиноземистый цемент отличается быстрым твердением, особенно при низких температурах. Он значительно превосходит в этом отношении портландцемент. Глинистый, глиноземистый цемент выпускается в небольших количествах и значительно дороже портландцемента[2].

Одной из особенностей глиноземистого цемента является высокая стойкость в агрессивных средах. Помимо большей химической инертности низкоосновных гидроалюминатов кальция и гиббсита по сравнению с гидратными соединениями портландцемента, большую роль играет уплотняющее действие гидроксида алюминия, который делает камень из этого цемента менее проницаемым для агрессивной среды. Отсутствие свободного гидроксида кальция предохраняет глиноземистый цемент от сульфатной коррозии. В то же время весьма нестойк в растворах щелочей.

Применение глиноземистого цемента для цементирования скважин ограничена отрицательным действием на него высокой температуры. Он может применяться только в «холодных» скважинах, где статическая температура на забое не превышает 20-25 °С. При более высоких температурах значительно ускоряются процессы перекристаллизации гидроалюминатов и прочность камня резко снижается.

### **Карбонатный цемент**

Была установлена высокая стойкость в пластовых водах кислотнорастворимого карбонатного цемента, содержащего 40-50% измельченного карбоната кальция. Этот цемент применяется в тех случаях, когда нужно поставить временного моста или удалить часть цементного стакана. При обработке соляной кислоты этот цемент быстро растворяется.

### **Песчанистый портландцемент**

Была установлена более высокая стойкость в пластовых водах портландцемента с добавкой кварцевого песка в количестве до 30%. Образцы из песчанистого цемента при хранении на забое скважины показали лучшую стойкость, чем образцы обычного цемента.

Добавки песка оказались весьма эффективными при повышении температуры до 75 °С. Помимо повышения стойкости, добавки песка несколько уменьшают начальную прочность и замедляют схватывание.

### **Магнезиальный цемент**

Высокой стойкостью в контакте с кристаллическими слоями магнезия обладает магнезиальный цемент. Он представляет собой каустический магнезит или каустический доломит, затворенный концентрированными растворами хлористого магнезия или некоторых других солей.

Для получения каустического магнезита или доломит обладают при температурах 700-800 °С, продукт обжига измельчают до дисперсности порошка.

Магнезиальный цемент представляет собой воздушное вяжущее вещество; образуемый искусственный камень неводостоек, однако в контакте с содержащими магнезий солевыми породами и при отсутствии пластовых вод он обладает значительно большей стойкостью, чем другие минеральные цементы[5].

### **Шлакопортландцемент.**

Шлакопортландцемент обладает большей стойкостью против действия некоторых агрессивных сред, чем обычный портландцемент. В связи с этим в последние годы принимаются попытки повысить коррозионную стойкость тампонажных цементов добавкой к ним шлаков. Особенно заметно повышение стойкости в девонской пластовой воде, содержащей повышенное количество магнезия.

При твердении в условиях «холодных» скважин тампонажный цемент, содержащий значительную добавку шлака, показывает низкую раннюю прочность. Твердение может быть значительно ускорено добавкой небольшого количества (1-2% от массы цемента) хлорида кальция. С повышением температуры твердения шлакопортландцемента значительно ускоряется.

При температуре, соответствующей «холодным» скважинам, рекомендуется вводить в смесь 40% шлака (не более).

При температуре 70-75 °С содержание шлака может быть увеличено до 60-70%. При более высоких температурах (до 125 °С) хорошие результаты дает введение в шлакопортландцемент кварцевого песка.

### **Исследования влияния реагентов-замедлителей на коррозионную стойкость тампонажного камня спеццементов**

В большинстве случаев тампонажные материалы при работе в агрессивных средах разрушаются за счет выщелачивания и растворения при гидролизе твердой фазы. Поскольку растворение является самой медленной

стадией всего процесса, то скорость его определяет долговечность крепи скважин.

Установлено, что скорость растворения экспоненциально зависит от температуры и с ее ростом скорость разрушения камня возрастает.

В настоящее время спеццементы для крепления высокотемпературных скважин применяют обязательно с добавками реагентов-замедлителей схватывания, которые выбирают только с учетом температуры на забое, что обуславливает возможность протекания реакцией гидротермального синтеза.

Все пластовые флюиды встречающиеся в высокотемпературных скважинах, делятся на 3 группы: пресная и низкоминерализованная вода; раствор хлористого натрия; высокоминерализованная вода, содержащая хлористый магний и сернокислый натрий.

Чаще всего для крепления высокотемпературных скважин используются термостойкие тампонажные материалы на базе шлаков с различными добавками. Это серийно выпускаемые цементы марок ШПЦС-200, ШПЦС-120, УШЦ-200, УШЦ-120, ОШЦ. Их коррозионная стойкость исследовалась при  $t=120^{\circ}\text{C}$  и давлении  $P=30\text{ МПа}$ [3].

#### **Влияние реагентов-замедлителей схватывания на коррозионную стойкость камня из термосолестойкого цемента**

Лабораторией цементирования скважин ВНИИКРнефти для крепления скважин при забойной температуре  $100..250^{\circ}\text{C}$  и изоляции пластов с высокоминерализованными водами разработан термосолестойкий цемент (ТСЦ) на базе шлака, песка и барита. Сроки схватывания и время загустевания раствора из ТСЦ при высоких температурах наиболее эффективно регулируются такими замедлителями как ВКК (2%), гипан+хромпик (1,5+0,5; 0,2+0,1%) и СДБ + хромпик (по 0,6%).

Влияние этих реагентов на коррозионную стойкость образца термосолестойкого цемента, твердевшего в высокоминерализованной воде при температуре 120 и  $150^{\circ}\text{C}$  и давлении соответственно 30 и 50 МПа, исследовалось в течение 12 мес. При этом выявлено, что у образцов с комплексной добавкой хромпик + гипан прочность при сжатии после твердения в течение 200 сут в насыщенном растворе NaCl повышается. К сроку твердения 360 сут исследуемый цементный камень обладает примерно в 2 раза большей прочностью, чем камень того же состава без добавок.

Раствор из термосолестойкого цемента с добавками гипан +хромпик или ВКК, твердевший в минерализованной воде при  $t=120^{\circ}\text{C}$  и  $P=30\text{ МПа}$ , не затвердевает через 2 сут. Для данной агрессивной среды реагенты-замедлители схватывания не могут быть применены.

Добавка 0,2% гипана +0,1% хромпика к тампонажному вяжущему при твердении в минерализованной воденасолько замедляет структурообразования, что через 2 сут цементный камень не образуется.

У камня из ТСЦ без замедлителей, твердевшего в минерализованной воде на протяжении всего периода твердения снижается прочность при изгибе и непрерывно увеличивается прочность при сжатии.

С добавками СДБ + хромпик наблюдается рост прочности как при изгибе, так и при сжатии. Однако на протяжении всего срока твердения прочность при сжатии цементного камня с этими добавками ниже, чем без добавок.

Раствор из ТСЦ с добавками реагентов-замедлителей схватывания при твердении в пресной воде, насыщенном растворе хлористого натрия и минерализованной воде образует цементный камень с более низкими газопроницаемостью и пористостью, чем без добавок.

Исследовано также влияние добавок гипан + хромпик (1,5 + 0,5%) и ВКК (2%) на коррозионную стойкость камня из термосолестойкого цемента, формировавшегося в высокоминерализованной воде при  $t = 250^{\circ}\text{C}$  и  $P=50$  МПа. Образцы с добавкой гипан + хромпик, извлеченные из автоклавов после твердения в течение 360 сут, признаков коррозии не имели.

Образцы с добавками ВКК в отличие от первых подверглись значительной коррозии, имели слоистое строение, причем наружный слой отделялись самопроизвольно.

Результаты испытаний механической прочности образцов камня из термосолестойкого цемента с добавкой гипана с хромпиком показывают, что снижая прочность образцов при сжатии в начальный период твердения, данная добавка стабилизирует показатели прочности к сроку твердения 360 сут, причем прочность при сжатии незначительно выше, чем у камня без добавок. Прочность при изгибе в начальный период твердения выше у цементного камня.

Добавка 2% ВКК отрицательно влияет на стойкость камня из ТСЦ, формировавшегося в высокоминерализованной воде при высоких температуре и давлении. Показатели прочности цементного камня с этой добавкой снижались на протяжении всего срока твердения. К годовичному сроку твердения образцы подвергались значительной коррозии и разрушились.

Из сказанного следует, что комплексная добавка гипан + хромпик положительно влияет на свойства цементного камня, характеризующегося постоянством химического и минералогического состава после твердения при  $t=200...250^{\circ}\text{C}$ . Добавки ВКК в данных условиях изменяют структуру цементного камня с образованием нестойких фаз в минерализованной жидкой среде, поэтому данная добавка ускоряет разрушение цементного камня.

При использовании ТСЦ в условиях воздействия минерализованных вод при  $t=120^{\circ}\text{C}$  и  $P=230$  МПа добавки (гипан + хромпик) и ВКК не рекомендуются, так как прочный камень не образуется. Для этих условий рекомендована добавка СДБ + хромпик (по 6%).

Комплексная добавка гипан + хромпик (1,5 + 0,5%) к термосолестойкому цементу, твердевшему при  $t=250\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P=50\text{ МПа}$  в минерализованной воде, обеспечивает постоянство химического и минералогического составов. Формирующийся камень представлен в основном ксонотлитом, а следовательно, характеризуется коррозионной стойкостью. Добавки ВКК (2%) не рекомендуются, так как они снижают прочность камня[4].

### 1.3. ГИДРОФОБНЫЙ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

Одна из главных проблем, присущих обычному цементу – высокая гигроскопичность. В связи с этим срок хранения тарированного цемента в стандартных бумажных мешках не превышает нескольких месяцев. Дальше он начинает комковаться и терять марку, даже при хранении в сухом помещении.

Гидрофобный цемент – это обычный портландцемент, полученный путем помола цементного клинкера с введением гидрофобных добавок. В результате цемент приобретает почти нейтральную активность по отношению к атмосферной влаге. Если обычный цемент, впитывая влагу из воздуха, вступает с ней в химическую реакцию (внешний признак которой — комкование), то гидрофобный цемент можно складировать на срок более года без потери его свойств.

Свойство гидрофобности цементу придают поверхностно-активные добавки, которые обволакивают частицы цементного камня при совместном помоле. У гидрофобных добавок имеется и побочный эффект, который выражается в большей пластичности и подвижности приготавливаемой смеси, а также в увеличении водонепроницаемости и морозостойкости готовых изделий. Повышенная пластичность бетонной смеси на основе гидрофобного цемента позволяет уменьшать количество воды, требуемой для ее приготовления, и снижает расход цемента без уменьшения прочности.

Гидрофобный цемент является продуктом, изготавливаемым из традиционного портландцемента с использованием специальных гидрофобизирующих добавок. К последним относятся такие вещества, как олеиновая кислота, остатки всевозможных кислот синтетического происхождения, асидол, мылонафт и другие. Добавки должны составлять не менее 0,3% от общей массы. В итоге получается смесь из мелко измельченного клинкера портландцемента, гипса и добавок, которая является гидрофобным цементом.

Цемент данной категории помогает решить сразу несколько важных задач: улучшает характеристики портландцемента, увеличивает показатели сопротивляемости воздействию влаги, улучшает устойчивость при хранении.

Принцип действия состоит в соединении цементных зерен с молекулами добавки с образованием мономолекулярного воздушного слоя, который защищает поверхность зерен от контакта с влажной средой. Если в смеси содержится недостаточный объем добавок, то итоговый состав будет отличаться плохой устойчивостью к воде. Если же концентрация, наоборот, слишком велика, прочность бетона уменьшается вследствие активного взаимодействия добавок с воздухом.

Гидрофобный портландцемент отличается от обыкновенного портландцемента содержанием специальной гидрофобной добавки. Изготавливают его совместным помолом портландцементного клинкера, гипса и гидрофобной добавки. Портландцемент становится гидрофобным,

одновременно сохраняя все остальные присущие цементам свойства, если в его состав введено оптимальное количество гидрофобной добавки.

Следует иметь в виду, что при недостаточном количестве вводимой гидрофобной добавки цемент (качество которого практически не ухудшается) не будет обладать гидрофобностью. При введении же излишнего количества гидрофобной добавки растворы будут характеризоваться повышенной пористостью, так как в них вовлекается увеличенное количество воздуха. Как следствие этого — прочность их уменьшится.

Гидрофобный портландцемент применяют в первую очередь в тех случаях, когда приходится длительное время хранить цемент до его использования или перевозить его на дальние расстояния.



#### 1.4. ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЕ ТАМПОНАЖНЫЕ ЦЕМЕНТЫ

Тампонажный камень в скважине подвергается комплексу статических (давление в обсадной колонне) и динамических (перфорация, спуско-подъемные операции) нагрузок, переменных по величине и знаку. Он характеризуется значительной прочностью на изгиб и сжатие, малой проницаемостью, однако, обладая низкой деформационной способностью и трещиностойкостью, он не способен противостоять разовым и циклическим нагрузкам.

При разработке высокопрочных материалов применяют несколько компонентов, обладающих различными физико-механическими свойствами (особенно упругопластическими). На основании этого принципа во ВНИИКРнефти разработаны дисперсноармированные тампонажные (на базе портландцементов и шлаков) материалы, представляющие собой смесь вяжущего и коротких волокон, произвольно ориентированных и равномерно распределенных по всему объему, работающих совместно с матрицей за счет сил сцепления.

Дисперсная арматура отличается от обычной тем, что произвольно ориентированные по всему объему смеси отрезки волокон при достаточной равномерности распределения и определенном количестве более эффективно воспринимают и перераспределяют часть нагрузки практически любого направления. Если трещины все же образуются вследствие преодоления сопротивления дисперсноармирующей добавки или нарушения сцепления волокна в тампонажном камне, то начинает проявляться вторая, не менее важная функция волокон. Охватывая каждую из образовавшихся трещин со всех сторон, волокна препятствуют дальнейшему их росту и развитию, сохраняя целостность цементного камня.

В качестве армирующих добавок используют волокна трех типов: искусственные (нейлон, полипропилен, полиэтилен и др.), минеральные (шлаковые, кварцевые, асбестовые, базальтовые и др.) и органические (хлопок и др.). Характер работы дисперсноармирующей добавки в тампонажном материале, а следовательно, и физико-механические свойства камня во многом зависят от свойств самих волокон. Последние должны обладать достаточной стойкостью в продуктах твердения, высокой механической прочностью и хорошим сцеплением с цементным камнем (адгезией).

Так как волокна используют для дисперсного армирования тампонажных материалов в широком диапазоне температур (от  $-5$  до  $+250$  °C), они должны быть термостойкими. Исследования, проведенные с волокнами разных типов, дали положительные результаты. В качестве армирующей добавки наиболее целесообразно использовать минеральные волокна.

## **Приготовление дисперсно-армированных тампонажных цементов**

Для крепления нефтяных и газовых скважин в качестве вяжущего наиболее эффективным материалом является тампонажный портландцемент, образующий при смешении с водой тампонажный раствор, который закачивается в скважину и после твердения превращается в цементный камень.

Для получения тампонажных материалов вяжущие вещества модифицируют с целью придания им специальных свойств. В частности, используют облегчающие или утяжеляющие добавки и т.д. [13]

Наиболее существенным недостатком цемента как тампонажного материала является его низкая трещиностойкость, приводящая к нарушению целостности крепи скважин при работах внутри обсадной колонны. При этом возможно появление межколонных давлений, межпластовых перетоков и других осложнений.

Для повышения трещиностойкости материалов известно применение композитных тампонажных материалов, получаемых, в частности, применением добавок, имеющих волокнистое строение.

Дисперсная структура приводит к тому, что произвольно ориентированные по всему объему композита отрезки волокон при достаточной равномерности распределения и определенном количестве более эффективно воспринимают и перераспределяют часть нагрузки практически любого направления.

При получении дисперсно-армированных тампонажных материалов в качестве армирующих добавок используют волокна трех типов: искусственные (нейлон, полипропилен, полиэтилен и др.), минеральные (шлаковые, кварцевые, асбестовые, базальтовые и др.), а также органические (хлопок и др.) (патент РФ №2281309, С09К 8/467 «Дисперсно-армированный тампонажный материал», патент РФ №2337124, С09К 8/467 «Базовая основа тампонажного раствора для цементирования скважин», патент РФ №2270327, Е21В 33/13 «Способ изоляции зон катастрофических поглощений бурового раствора при бурении нефтяных и газовых скважин»).

Известно также получение дисперсно-армированных тампонажных материалов добавкой асбеста 7 сорта. Недостатком указанных тампонажных материалов является низкая прочность волокон, плохая адгезия или канцерогенность.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому дисперсно-армированному тампонажному материалу является тампонажный материал, включающий минеральное вяжущее, воду затворения и волокнистую модифицирующую добавку, смешиваемую с минеральным вяжущим в сухом виде, причем каждое волокно модифицирующей добавки свернуто в клубок, разворачивающийся при смешении тампонажного раствора с жидкостью затворения (патент РФ №2396300, С09К 8/467).

Недостатком указанных тампонажных материалов является низкая степень сцепления волокон с цементной матрицей, что не позволяет в полной мере использовать преимущества дисперсно-армированных композитов.

В известном способе получения тампонажного материала, содержащего минеральное вяжущее, воду затворения и волокнистую модифицирующую добавку, каждое волокно которой свернуто в клубок, и смешиваемую с минеральным вяжущим в сухом виде, включающем затворение водой полученной сухой смеси вяжущего и волокнистой добавки, согласно изобретению в качестве минерального вяжущего используют портландцемент, каждое волокно модифицирующей добавки имеет на концах утолщения гантельного типа, или к концам волокна под углом 30-90° присоединены волокна длиной до 1/3 длины основной добавки.

Сущность изобретения заключается в следующем. Волокнистая модифицирующая добавка специально изготавливается таким образом, чтобы ее концы имели утолщения или в процессе изготовления на концах добавки поперек ее оси прикрепляются волокна. Затем добавка подвергается специальной химической обработке или она имеет химико-минералогический состав, обеспечивающий ее сворачивание в клубок в сухом виде. При этом ее диаметр становится в 10-20 раз меньше линейных размеров добавки. Поэтому при приготовлении тампонажного раствора в любых смесителях не происходит забивания отверстий для подачи цемента, а также добавка не наматывается на лопасти мешалок и не комкуется. После смешения с жидкостью затворения под действием расклинивающего действия молекул воды силы адгезии, удерживающие волокнистую добавку в свернутом состоянии, ослабляются, и добавка, расправляясь, принимает форму нитей или волокон, имеющих на своих концах утолщения или поперечные волокна.

Поскольку расправление нитей происходит уже после приготовления тампонажного раствора, в период его закачки и продавки, то волокна добавки не будут мешать процессу приготовления раствора. В процессе закачки цементного раствора добавка равномерно распределяется по объему раствора.

После затвердевания цементного раствора утолщения или поперечные волокна прочно сцепляются с цементной матрицей. Обычные волокна при создании изгибающей или растягивающей нагрузки на цементный камень могут вырываться из цементной матрицы.

На фигуре показан образец цементного камня с вырванными из него волокнами при испытании на изгиб.

Поскольку цементный камень плохо сопротивляется изгибающим и растягивающим напряжениям, то дисперсно-армирующая добавка не увеличила сопротивляемость цементного камня рассматриваемым напряжениям.

Добавка согласно предлагаемому изобретению не будет вырываться из цементного камня, поскольку утолщения или поперечные волокна будут

играть роль анкеров, удерживающих волокнистую добавку в цементном камне. В конечном итоге, прочность цементного камня на изгиб, разрыв и удароустойчивость будет возрастать, поскольку разрушение камня будет происходить только после разрыва волокон.

Увеличение длины поперечных волокон более  $1/3$  длины основной добавки приводит к скручиванию поперечных и основных волокон, ухудшению их разворачивания при смешении с жидкостью затворения.

Уменьшение угла между основной добавкой и поперечной менее  $30^\circ$  приводит к тому, что поперечная добавка при растяжении скользит вслед за основной при ее вырывании из цементного камня.

Для проверки эффективности применения добавок с гантельными утолщениями и поперечными волокнами были проведены специальные эксперименты, моделирующие работу дисперсно-армированного тампонажного материала.

Для этого были приготовлены три пробы раствора из тампонажного материала из портландцемента ПЦТ-1-50 с водоцементным отношением 0,5, из которых изготавливались образцы-балочки размером  $4 \times 4 \times 16$  см, вместе твердевшие в течение 2 суток при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Первая проба цемента была без добавок.

Вторая проба цемента содержала 0,1% волокнистого наполнителя из кордового волокна длиной 15-20 мм, при этом на обоих концах волокон были завязаны узлы, моделирующие утолщения гантельного типа. Волокна были свернуты в клубки, в которых волокна закреплялись клеем.

Третья проба содержала 0,1% волокнистого наполнителя из кордового волокна длиной 15-20 мм, при этом на обоих концах волокон под углом  $30-90^\circ$  были привязаны проволоочки из кордового волокна длиной 5 мм, моделирующие поперечные волокна. Волокна были свернуты в клубки, в которых волокна закреплялись клеем.

Также были проведены эксперименты со специально изготовленной полиамидной фиброй длиной 8-10 мм, имеющей утолщения на концах диаметром 1,5-2,0 мм (проба 4), и полиамидной фиброй, имеющей на концах поперечные перекладины из полиамидной фибры длиной 2-3 мм (проба 5). Оба вида полиамидной фибры были свернуты в клубки, в которых волокна закреплялись клеем.

При испытании на изгиб были получены следующие результаты:

- проба 1-3,1 МПа;
- проба 2-5,3 МПа;
- проба 3-5,7 МПа;
- проба 4-4,8 МПа;
- проба 5-5,0 МПа.

Указанные примеры реализации способа показывают на соответствие предлагаемого изобретения критерию «промышленная применимость», кроме того, эксперименты показали, что вид волокна в данном случае не имеет принципиального значения для достижения результата.

## 1.5. РАСШИРЯЮЩИЕСЯ ТАМПОНАЖНЫЕ ЦЕМЕНТЫ

В буровой практике применяются различные виды расширяющихся цемента, главным образом на сульфоалюминатной основе. Известны водонепроницаемый расширяющийся цемент (ВРЦ) и напрягающий цемент (НЦ).

ВРЦ изготавливают путем тщательного смешения или совместного помола глиноземистого цемента (68-71 %), полуводного гипса (20-22 %) и высокоосновного гидроалюмината кальция  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$  (10-11 %). Высокоосновный гидроалюминат находится в продукте, особо получаемом из смеси глиноземистого цемента с гидратной известью. НЦ же изготавливают путем тонкого совместного помола портландцементного клинкера, глиноземистого шлама (или глиноземистого цемента) и гипсового камня, обычно в соотношении 70:15:15.

Расширение ВРЦ и НЦ происходит вследствие образования в них вначале моногидросульфоалюмината кальция, а затем высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31(32)\text{H}_2\text{O}$ . Последний, образующийся через 1-3 суток твердения расширяющегося цемента, т. е. когда камень еще не затвердел, способствует равномерному расширению всей цементной системы.

Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент медленнее схватывается, чем ВРЦ. Он получается в результате совместного помола природного двухводного гипса и продуктов обжига до плавления или спекания сырьевой смеси из боксита и известняка в соотношении 70:30. Для его изготовления применяют также высокоглиноземистые шлаки, содержащие не более 11 %  $\text{SiO}_2$  и 38-41 %  $\text{CaO}$ . В составе глиноземистой части вяжущего вещества должен преобладать моноалюминат кальция, а содержание высокоосновных алюминатов кальция должно быть минимальным. Относительная величина линейного расширения через 28 суток твердения в воде должна быть не менее 0,3 % и не более 1 %.

Известен расширяющийся цемент на основе портландцемента. Его состав 60-65 % портландцемента, 5-7 % глиноземистого цемента, 7-10 % двухводного гипса, 20-25 % гидравлической добавки. Расширение образцов при твердении в воде в течение суток составляет 0,15 %, а через 28 сут. - до 0,3-1 %. Начало схватывания без специальной корректировки наступает через 30 мин.

В гидротехническом и шахтном строительстве, в нефтегазовой промышленности используют несколько видов специальных расширяющихся тампонажных цемента. Расширение большинства таких цемента вызывается образованием и ростом при твердении кристаллов, гидросульфоалюмината кальция. В последние годы используется также расширение при гидратации оксидов кальция и магния.

Гипсоглиноземистый цемент представляет собой продукт совместного помола высокоглиноземистого шлака и двухводного гипса, взятых в соотношении 3:1.

**Оrientировочные параметры тампонажного раствора при затворении этого вида цемента на водопроводной воде) при 22 °С:**

Водоцементное отношение.....	0,5
Растекаемость по конусу АзНИИ, см.....	22
Начало схватывания, ч-мин.....	1-00
Конец схватывания, ч-мин.....	1-30
Прочность камня на сжатие, МПа, через 48 ч.....	18

При креплении нефтяных и газовых скважин чаще применяют смесь тампонажного портландцемента и гипсоглиноземистого в соотношениях (75-85 %) : (25-15 %). В таких случаях при водоцементном отношении 0,45 и температуре 22 °С начало схватывания задерживается до 2,5-4 ч, прочностные показатели аналогичны тампонажным цементам, а расширение образцов достигает 2 %. С повышением температуры до 40 °С сроки схватывания сокращаются. Камень из этих цементов отличается повышенной коррозионной устойчивостью.

Гипсоглиноземистый цемент выпускают в промышленном масштабе Пашийским цементным заводом.

Тампонажный цемент с добавками магнезита и доломита представляет собой смесь тампонажного портландцемента с магнезитом ( $MgCO_3$ ) или доломитом ( $CaCO_3-MgCO_3$ ), обожженными при температуре 700-900 °С. Добавки к цементам обожженных магнезита и доломита соответственно 5-10 и 10-20 % обеспечивают расширение цементного камня в течение 48 ч до 0,5 % за счет гидратации оксидов  $MgO$  и смеси  $MgO + CaO$  в цементном камне. Расширяющиеся тампонажные цементы (РТЦ) с большой величиной расширения получают введением добавок молотых негашеной извести и периклаза, обожженных при определенных температурах.

В составе цемента для низких и нормальных температур предпочтительно применять известь сорта «медленногасящаяся», измельченную до удельной поверхности  $S = 250-350 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

В зависимости от качества сырья, условий обжига и хранения негашеная известь может содержать различное количество активного  $CaO$ . При содержании его в цементе до 10 % и  $B/T = 0,4-0,5$  наблюдается линейная зависимость расширения и прочности от содержания  $CaO$ , переходящая затем в степенную. В области линейной зависимости (т. е. до 10 % активного  $CaO$ ), несмотря на большую величину расширения, сплошность структуры цементного камня не нарушается и сохраняется его высокая прочность. При больших добавках расширяющего компонента расширение настолько велико, что структура цементного камня даже на ранней стадии развития не может самозаращивать микроразрывы, и прочность камня резко снижается.

Поэтому состав расширяющегося цемента следует подбирать с учетом содержания активного СаО в негашеной извести.

Ранняя прочность цементного камня из расширяющегося цемента несколько ниже прочности камня из исходного тампонажного цемента. Однако с течением времени в ходе твердения разница в прочности камней из расширяющегося и исходного цементов сокращается. Повышение водо-содержания раствора уменьшает расширение.

Промышленная негашеная известь, которая представляет собой в основном мягкожженный оксид кальция, гидратируется с образованием тонкодисперсного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , имеющего достаточно высокую структурообразующую способность, что несколько ускоряет загустевание цементного раствора. Цементный раствор из расширяющегося цемента с негашеной известью имеет характерную форму кривой загустевания - участок низкой начальной консистенции быстро сменяется ростом консистенции, вызванным гидратацией оксида кальция. Вслед за этим наступает непродолжительный инкубационный период, в течение которого консистенция по абсолютному значению выше, чем у обычного тампонажного цемента. После инкубационного периода наступает процесс загустевания, вызываемый интенсивной гидратацией силикатных минералов и протекающий так же, как у обычных тампонажных портландцементов. Время загустевания у РТЦ несколько меньше, чем у исходного тампонажного цемента.

Для получения расширения в пределах 16-20 % от момента затворения (3-7 % от начала схватывания), что значительно больше, чем у других видов расширяющихся цементов, но безопасно для свойств цементного камня, необходимо на 100 массовых долей портландцемента ввести 10-20 массовых долей молотой негашеной извести. Количество введенной извести зависит от сроков схватывания исходного портландцемента, ее активности и скорости гашения, а также от условий применения цемента.

При умеренно высоких температурах проблема заключается в сохранении необходимой величины расширения и получении достаточного времени сохранения прокачиваемости раствора при повышенной температуре. С повышением температуры величина расширения, фиксируемого после начала схватывания, уменьшается, однако при 75 °С оксид кальция еще можно применять в качестве расширяющей добавки, особенно если выбирать известь с меньшей скоростью гашения. При получении больших партий извести, предназначенной для добавления в тампонажные цементы для умеренно высоких температур, можно ввести изменения в технологический процесс обжига специально с целью получения пережженной извести. В эти цементы целесообразно вводить измельченный кварцевый песок, добавка которого способствует замедлению загустевания и схватывания цементного раствора, а также повышению прочности в процессе твердения в результате реакции между СаО и  $\text{SiO}_2$ .

При температуре выше 75 °С процесс гидратации извести идет настолько быстро, что значительная часть оксида кальция превращается в гидроксид еще до появления структуры, не вызывая расширения. Однако если частицы свободного оксида кальция заключены внутри частиц клинкера или пылевидной золы, то он гидратируется значительно медленнее, чем оксид кальция, добавляемый в виде негашеной извести, полученной при той же температуре обжига.

Портландцементный клинкер, содержащий свободный оксид кальция, может быть получен двумя способами: кратковременным обжигом при температуре 1 100-1 350 °С сырьевой смеси, составленной с расчетом на получение не менее 60 % трехкальциевого силиката (остаток свободной извести в клинкере в пределах 3-15 %), и обычным обжигом сырьевой смеси с  $KH > 1$ .

На основе таких клинкеров могут быть получены расширяющиеся цементы для скважин с температурой от 50 до 120 °С. Клинкеры с  $KH > 1$  можно применять при температуре не менее 80 °С.

Преимущество расширяющихся тампонажных цементов на базе клинкера, содержащего свободный  $CaO$ , состоит в том, что наряду с обеспечением большой величины расширения при высоких температурах значительно упрощается технологический процесс изготовления такого цемента. Он может быть легко получен на любом из цементных заводов без существенных изменений технологических процессов. Такие цементы обладают лучшей сохранностью, чем с добавкой молотой негашеной извести. Следует добавить, что предпочтительно применять этот клинкер в составе термостойкого песчанистого цемента.

Экономически эффективный способ получения расширяющихся цементов на основе оксида кальция заключается во введении добавки пылевидных топливных зол, содержащих свободный оксид кальция. Такие золы остаются после сжигания некоторых видов углей и сланцев в пылеугольных топках на электростанциях, например, Украины и Прибалтики.

Для скважин с более высокими температурами целесообразно применять химически менее активную оксидную расширяющуюся добавку - оксид магния. Если оксид магния обжигать при 1 200-1 300 °С, то он может служить хорошей расширяющей добавкой в цементы для температур от 120 до 180 °С.

При температурах выше 160 °С расширяющей добавкой может служить оксид магния, обожженный при еще более высоких температурах. В металлургической промышленности для футеровки печей широко применяют металлургический магнезитовый порошок, полученный обжигом магнезита при 1 500-1 600 °С и содержащий более 50 %  $MgO$ .

Оксид магния в магнезитовом порошке находится в виде периклаза, высокая температура обжига которого обуславливает его низкую реакционную способность. Оксид магния, обожженный при 1 200 °С,



содержится, например, в количестве до 36 % в хроматном шламе - отходе от переработки хромитовых руд.

Свойства высокотемпературных расширяющихся цементов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

**Свойства высокотемпературных расширяющихся цементов**

В/Ц	Растекае- мость, см	о О	Время загус- тевания, ч- мин	Прочность при сжатии, МПа, через период			Расширение к, % V
				2	7	28	
Шлако-песчаный цемент с 20 % хроматного шлама 5-320 м <sup>2</sup> /кг							
0,5	18	120	3-30	5.0	19,8	28,0	7,2
0,5	18	120	2-20	18.0	24,5	33,0	7,6
у-БКЦ с 5 % магнезитового порошка, s = 380 м <sup>2</sup> /кг							
0,7	20	160	2-00	5,5	20,5	22.5	8,3
0,7	20	200	1-30	14,0	20,0	35.5	10,5

Естественно, что в качестве вяжущей основы для высокотемпературных расширяющихся тампонажных цементов необходимо применять температуростойкие медленносхватывающиеся цементы: шлакопесчаный цемент, БКЦ или цемент на основе саморассыпающегося шлака от производства рафинированного.

Помимо цементных расширяющихся тампонажных смесей в последнее время все шире внедряются и органические расширяющиеся/тампонажные смеси. Большой интерес представляют тампонажные смеси европейской фирмы БДС, такие как синтетический компаунд AQUA GROUT, который при взаимодействии с влагой способен увеличивать свой объем в 6-10 раз. Время затвердевания смеси регулируют жидким аминным ускорителем схватывания AQUA CAT.

**Механизм расширения цементного камня** — все расширяющиеся цементы являются смешанными и состоят из основного вяжущего вещества и расширяющейся добавки, в которую, в свою очередь, могут входить несколько компонентов. При твердении таких цементов вследствие взаимодействия компонентов расширяющей добавки или в результате взаимодействия их с основным вяжущим происходит расширение, которое на определенной стадии заканчивается или приостанавливается в результате твердения основного вяжущего. При этом полученная расширенная структура стабилизируется.

Известны два основных механизма расширения цементного камня, т. е. увеличения его линейных и объемных размеров: расширение оксидное в результате гидратации MgO и CaO до Mg(OH)<sub>2</sub> и Ca(OH)<sub>2</sub> и расширение

сульфоалюминатное

вследствие

образования гидросульфоалюминатов кальция.

Непосредственной причиной оксидного расширения является разрыхление при гидратации кристаллической решетки исходной фазы и увеличение ее объема. Гидроксиды магния и кальция занимают в два раза больший объем, чем исходные оксиды. Получение цементов с оксидным расширением возможно путем низкотемпературного обжига исходных карбонатов кальция и магния. Синтезируют также специальные клинкеры, состоящие из  $C_2S$ ,  $CaSO_4$ ,  $C_4AF$  и свободной  $CaO$ , выполняющей функции расширяющего компонента.

Применение оксидного расширения особенно целесообразно в тех случаях, когда желательно получить идентичные результаты в различных температурных условиях. Так, на базе магнезиального расширения создана гамма расширяющихся тампонажных цементов с температурами применения от 20 до 200°C., давлениями до 10 МПа и значениями расширения до 0,7 %. Однако практическое применение оксидного расширения в цементах ограничено вследствие значительных колебаний физико-химических свойств обожженных оксидов.

Основной причиной сульфатного расширения является образование этtringита — гидросульфоалюмината кальция. Его объем в 2,2 раза больше объема исходных компонентов. Необходимо направлять процесс так, чтобы образование гидросульфоалюмината кальция и вызываемое им расширение происходили в начальный период твердения в достаточно пластичном тесте, когда они не могут сказаться отрицательно на качестве бетона и вызвать появление трещин. Регулирование характера кристаллизации этtringита достигается изменением степени пересыщения водного раствора  $CaO$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Al_2O_3$  в твердеющем камне путем регулирования соотношения компонентов цемента. Твердение основного компонента расширяющегося цемента, как правило, глиноземистого, стабилизирует через определенный период (1—2 сут.) увеличение объема расширяющей добавки. Образуется плотный цементный камень. В результате сульфоалюминатного расширения можно достичь приращения линейных размеров цементного камня в пределах до 4—5 %. [18]

Надежность и долговечность скважины как технического сооружения закладывается на этапе ее строительства. Крепление — неотъемлемая часть цикла строительства скважины. Основным методом разобщения пластов на сегодняшний день является заполнение затрубного пространства тампонажным составом [1, 2]. Основные нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации скважины, испытывают обсадные колонны и цементное кольцо. Если качество обсадных труб напрямую зависит от завода-изготовителя, то ответственность за качество цементного кольца в затрубном пространстве лежит на буровом предприятии или тампонажной сервисной компании.

Состояние цементного кольца за обсадной колонной напрямую влияет на герметичность разобщения продуктивных и водоносных горизонтов между собой и изоляцию обсадных колонн от негативного влияния пластовых флюидов.

Низкое качество крепи скважины приводит к возникновению межколонных давлений, появлению грифонов, межпластовым перетокам и преждевременному обводнению пласта [3]. В свою очередь, эти проблемы вынуждают останавливать скважину на ремонт и проводить изоляционные работы по восстановлению герметичности крепи скважины [4–6]. Суммарные финансовые потери от затрат на ремонтные работы и недополученной добычи углеводородного сырья даже в масштабах одного добывающего предприятия являются весьма существенными.

Для исключения возникновения данных проблем к цементному камню предъявляется ряд требований. Тампонажный камень должен обладать, во-первых, низкой проницаемостью, во-вторых, хорошей адгезией к горным породам и обсадной колонне, в-третьих, высокими прочностными показателями [3]. Распределение степени влияния данных требований на герметичность крепи скважины неравнозначное. Имея высокие показатели адгезии и проницаемости, можно успешно эксплуатировать скважину длительное время, не имея при этом проблем с герметичностью заколонного пространства. Но даже при наличии достаточно высоких показателей прочности и низких показателей проницаемости отсутствие плотного контакта тампонажного камня с сопредельными средами не позволяет добиться создания герметичной крепи скважины. Одним из путей решения данной задачи является использование в тампонажных составах расширяющих добавок [7].

В последние годы для повышения качества крепления нефтяных и газовых скважин нефтяные компании стали широко практиковать применение расширяющихся тампонажных материалов.

Безусадочные и расширяющиеся цементы известны уже около 180 лет. Выделяются два основных способа получения расширяющегося цемента. По первому способу внутри образующейся структуры цементного камня возникает соединение, имеющее объем больше первоначального. В результате этого происходит раздвижка кристаллов твердеющего цемента, выражающаяся в увеличении его объема [8]. Для того чтобы собственные напряжения привели к значительному расширению без ухудшения свойств цементного камня, последний должен быть способен к своеобразной пластической деформации, при которой нарушенные смещением контакты между элементами структуры восстанавливались бы в ходе последующего твердения. При этом важно согласование кинетики гидратации базового цемента и кинетики гидратации расширяющей добавки. Быстрая гидратация расширяющей добавки (до образования структуры цементного камня) не приведет к расширению цементного камня, поскольку энергия расширения

уйдет на раздвижку зерен цемента или несвязанных продуктов твердения, находящихся еще в цементно-водной суспензии [9]. Поздняя гидратация расширяющей добавки может привести к разрушению цементного камня, поскольку в цементном камне возникает прочная кристаллизационная структура, которая может не выдержать внутренних напряжений при увеличении объема расширяющего компонента. Исходя из этого для тампонажных цементов считается оптимальным получать расширение в период 1–2 сут, когда структура базового вяжущего еще достаточно эластична [10].

Второй способ заключается в увеличении объема тампонажного цемента за счет газообразования. В тампонажном составе в результате химической реакции происходит выделение газа, пузырьки которого равномерно распределяются по объему цементного теста, вследствие чего общий объем тампонажного состава увеличивается на объем, занимаемый пузырьками газа.

Рассмотрим более подробно механизмы расширения тампонажных составов и условия их применения. Существует несколько механизмов расширения.

Первый тип расширения – сульфоалюминатный. Увеличение объема цементного камня обеспечивается образованием в твердеющем цементном камне избыточного количества трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция (трисульфата) [11]. В основе действия расширяющей добавки лежит взаимодействие между гидроалюминатами кальция и сульфатом кальция. Процесс протекает в еще не затвердевшей массе. Данный механизм расширения присутствует главным образом у глиноземистых типов цементов.

В большинстве своем это быстросхватывающиеся цементы. Введение в состав тампонажного раствора сульфоалюмината кальция сопровождается небольшим расширением. В основном добавка сульфоалюмината кальция оказывается эффективной при температуре твердения 80–100 °С. При больших температурах сульфоалюминаты разрушаются.

Второй тип расширения – оксидное. Основу расширяющей добавки составляют оксиды кальция и магния. Оксидное расширение обеспечивается за счет образования гидроксида кальция и гидроксида магния, имеющих больший объем по сравнению с первоначально взятыми оксидами. Кинетика гидратации оксидов кальция и магния регулируется температурой обжига, степенью дисперсности известняка и магнезита, вводом дополнительных химических веществ, служащих ингибиторами реакции гидратации.

Основным источником получения оксидов кальция и магния служит обжиг карбонатных горных пород. К таковым относятся доломит и известняк. В процессе обжига горной породы происходит выделение углекислого газа и образование оксидов. Добавка в тампонажный состав магнезита (5–10 %) и доломита (10–20 %), обожженного при температуре 700–900 °С, обеспечивает расширение цементного камня до 0,5 % в течение

48 ч. При обжиге доломита при температуре 1200–1300 °С зерна обожженной породы покрываются оболочкой, что замедляет гидратацию оксидов. Данный материал может служить расширяющей добавкой в тампонажные растворы для температур до 180 °С. Оксид магния в виде «мертворожденного» переклиза может использоваться в качестве расширяющей добавки для высокотемпературных тампонажных цементов ( $t > 180$  °С).

Третий тип расширения – применение газвыделяющих добавок. В практике строительства скважин данный механизм расширения применяется в ограниченном объеме ввиду того, что при высоких давлениях образующийся газ может растворяться в поровой жидкости цементного камня [12]. Негативным последствием газового расширения является формирование пористого цементного камня, что отрицательно сказывается на его прочностных характеристиках. Кроме того, наличие пористого цементного камня в затрубном пространстве затрудняет определение качества цементирования скважины акустическими методами каротажа. Также остро стоит проблема замедления реакции выделения газа, в противном случае можно получить пеноцемент. Необходимо, чтобы образование газа произошло, когда тампонажный раствор будет размещен в затрубном пространстве.

Основными газвыделяющими добавками для тампонажных растворов на основе портландцементов служат алюминий и цинк. Наиболее широко применяется алюминий. Ограничения по давлениям, сложность регулирования сроков газвыделения и пониженные прочностные характеристики цементного камня сужают диапазон условий применения данного механизма расширения в тампонажных растворах. В большинстве случаев применение алюминия в качестве расширяющей добавки используют для крепления верхних интервалов обсадных колонн.

Необходимо, чтобы расширение, обеспечивая герметичный контакт, создавало небольшие внутренние напряжения, которые не разрушат цементный камень, и образовавшиеся микротрещины могли быть «залечены» при продолжающейся гидратации цемента [13]. Исходя из этих целей величина линейного расширения должна составлять не более 5 %. Наиболее подходящим для скважинных условий является оксидный тип расширения тампонажного состава, так как он обеспечивает максимальную величину расширения при минимальной концентрации расширяющей добавки. В качестве основы расширяющей добавки выступает оксид кальция.

## 1.6. ОБЛЕГЧЁННЫЕ И УТЯЖЕЛЁННЫЕ ЦЕМЕНТНЫЕ РАСТВОРЫ

### Способы снижения плотности тампонажных растворов

Тампонажные растворы представляют собой многокомпонентные системы, плотность (объемная масса) которых зависит от плотности входящих в них компонентов и объемного (или массового) их соотношения. Уменьшить плотность тампонажного раствора можно увеличением содержания жидкости затворения по отношению к твердым фазам, если жидкость затворения имеет меньшую плотность, или путем замены:

- части или всей жидкости затворения жидкостью меньшей плотности;
- всего или части вяжущего вещества вяжущим веществом меньшей плотности;
- всей или части добавки добавкой меньшей плотности; части вяжущего вещества специальной добавкой, обладающей меньшей по сравнению с ним плотностью;
- части объема твердых и (или) жидких фаз газообразной фазой.

Выбор того или иного способа снижения плотности определяется условиями применения, технологическими возможностями, экономической целесообразностью. При использовании тампонажных материалов на основе минеральных вяжущих веществ возможности регулирования плотности выбором их вида ограничены, если ориентироваться только на величину их плотности.

#### Плотность важнейших вяжущих веществ [кг/м<sup>3</sup>]

Портландцементный клинкер.....	3 100-3 200
Доменный шлак.....	2 700-3 000
Гипс полуводный.....	2 200-2 400
Известково-кремнеземистое вяжущее.....	2 100-2 300
Гипсо-глиноземистый цемент.....	2 400-2 500
Шлако-песчаный цемент.....	2 700-2 800

#### Важнейшие минеральные добавки также незначительно отличаются по плотности (кг/м<sup>3</sup>):

Кварцевые пески.....	2 600-2 700
Известняки, мел.....	2 200-2 800
Диатомиты, трепелы, опоки.....	2 100-2 500
Золы топливные.....	2 000-2 400
Вулканические породы (пемза, туфы, трассы, перлиты).....	2 200-2 700

#### Меньшую плотность имеют твердые вещества органического происхождения (кг/м<sup>3</sup>):

Каменный уголь.....	1 200-1 500
Каменноугольный кокс.....	1 200-1 400

Каменноугольный пек.....	1 200-1 300
Битумы и твердые асфальты.....	1 000-1 300

Допустим, необходимо снизить плотность тампонажного раствора на основе портландцемента с  $1830 \text{ кг/м}^3$  при В/Ц-0,5 до  $1500 \text{ кг/м}^3$ . Этого можно добиться путем замены или 90 % портландцементного клинкера самой легкой из минеральных добавок - пылевидной золой, или 46 % клинкера порошкообразным каменным углем - самой доступной из органических добавок, или введением 20 % газовой фазы к первоначальному объему раствора, или увеличением водосодержания до В/Ц = 1,05.

Проанализируем ожидаемую прочность цементного камня - двухсуточную и конечную. Это можно сделать, приняв степень гидратации после 2 сут. равной 0,4 и к концу твердения 0,95.

Для получения плотности около  $1500 \text{ кг/м}^3$  нужно добавить настолько много золы, что тампонажный раствор практически не затвердевает. С помощью таких добавок можно снижать плотность только до  $1700 \text{ кг/м}^3$ , но и при этом получается цементный камень с низкой прочностью.

Если применять добавки органического происхождения плотностью 1 300-1 400  $\text{кг/м}^3$  (а твердые и тугоплавкие органические материалы меньшей плотности встречаются редко), то можно получать растворы плотностью  $1500 \text{ кг/м}^3$ , затвердевающие в цементный камень с низкой, но во многих случаях достаточной прочностью. Если в качестве добавок применять материалы плотностью 900-1 000  $\text{кг/м}^3$ , например полиэтиленовую крошку, то плотность раствора  $1500 \text{ кг/м}^3$  получается при замещении уже около 25 % клинкера, при этом прочность окажется близкой к прочности в случае увеличения водосодержания.

### **Расчётные прочность и водопроницаемость цементного камня из проектируемых тампонажных растворов пониженной плотности**

Более высокая прочность получается при снижении плотности путем введения воздуха. Существенный недостаток аэрированных тампонажных растворов - их сжимаемость. На большой глубине или при высоком гидростатическом давлении объем аэрированного тампонажного раствора существенно уменьшится, а плотность повысится. Этот недостаток можно устранить, заключив пузырьки воздуха в прочные оболочки.

В последнее время применяются пластмассовые, стеклянные, керамические, кварцевые микробаллоны (микрокапсулы). Для эффективного снижения плотности с сохранением высокой прочности необходимо, чтобы микробаллоны имели плотность не более  $600 \text{ кг/м}^3$ . Тогда для получения раствора плотностью  $1500 \text{ кг/м}^3$  достаточно заменить ими 14 % массы портландцементного клинкера. Прочность цементного камня при этом получается довольно высокой. Этот способ позволяет получать тампонажные растворы с очень низкой плотностью при сохранении удовлетворительных свойств цементного камня. Так, заменив микробаллонами только 25 % массы

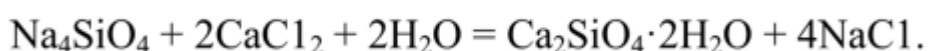
портланд-цементного клинкера, при неизменном водосодержании получаем плотность тампонажного раствора около  $1\,200\text{ кг/м}^3$ , прочность цементного камня будет близка к прочности камня из тампонажного раствора с полиэтиленовой крошкой при плотности  $1\,500\text{ кг/м}^3$ . Дальнейший резерв повышения прочности цементного камня заключается в применении микробаллонов с кавернозной (шероховатой) поверхностью. К сожалению, это невозможно сочетать с их низкой плотностью, так как требуется большая толщина оболочки. Однако такие частицы плотностью  $800\text{--}1\,000\text{ кг/м}^3$  образуют вспученные керамические материалы (керамзит, вспученный аргиллит) при размере зерен около  $1\text{ мм}$ . Для получения плотности раствора  $1\,500\text{ кг/м}^3$  достаточно заменить вспученным аргиллитовым песком  $25\%$  портландцементного клинкера. При этом сохраняется высокая прочность цементного камня.

Таким образом, для снижения плотности до  $1\,650\text{--}1\,700\text{ кг/м}^3$  можно использовать все известные способы; до  $1\,400\text{--}1\,500\text{ кг/м}^3$  можно применять облегчающие добавки плотностью менее  $2\,000\text{ кг/м}^3$ , повышать водосодержание, а на небольших глубинах также использовать аэрирование тампонажного раствора; ниже  $1\,400\text{ кг/м}^3$  желательно использовать полые или газонаполненные микробаллоны.

Повышение водосодержания обычной портландцементной суспензии неизбежно связано с ухудшением ее седиментационной устойчивости. При  $В/Ц > 0,55$  проявляется заметное водоотделение, которое при  $В/Ц = 0,6$  достигает недопустимых значений. Скорость фильтрации жидкости через суспензию можно уменьшить, повысив вязкость жидкости и степень дисперсности твердой фазы. Оба приема используются при приготовлении облегченных тампонажных растворов с высоким водосодержанием.

Для повышения вязкости жидкой фазы в воде растворяют эфиры целлюлозы, препараты на основе крахмала, акрила и др. Вводя достаточно большое количество таких добавок, можно получить  $В/Ц = 1$  при сохранении водоудерживающей способности тампонажного раствора. Недостаток этого метода - одновременное сильное замедление схватывания, которое трудно компенсировать ускорителями. Более эффективно введение в состав цементного раствора специального тонкодисперсного компонента, адсорбирующего на своей большой поверхности избыточное по сравнению с допустимым количеством воды.

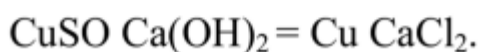
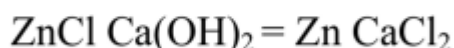
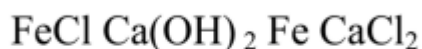
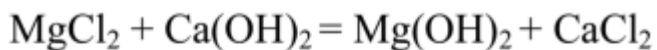
Такой тонкодисперсный компонент может быть получен непосредственно в жидкости затворения в результате химической реакции типа



В данном случае тонкодисперсный осадок гидросиликата кальция образуется из молекулярных растворов силиката натрия и хлорида кальция. Подобные тонко дисперсные осадки могут быть получены из алюмината натрия и других солей.



Другой способ заключается в образовании тонкодисперсных осадков при реакции солей, введенных в жидкость затворения, с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе минералов портландцемента. Из приведенных ниже реакций первые две сопровождаются ускорением схватывания, вторые две - замедлением схватывания портландцемента, однако другие цементы, например шлаковые, могут по-другому изменять скорость схватывания. Эти способы позволяют снизить плотность портландцементного раствора до 1 600 кг/м<sup>3</sup>.



Значительно чаще тонкодисперсные добавки, физически связывающие дополнительно введенное для снижения плотности раствора количество воды, используются в виде тонкодисперсных порошков - смешиваются с базовым тампонажным материалом или с водой затворения. Эти добавки главным образом препятствуют седиментационному и фильтрационному (под действием перепада давления) водоотделению. Однако надо выбирать такие тонкодисперсные порошки, которые имеют собственную плотность меньше плотности базового тампонажного материала. При этом достигается дополнительное снижение плотности тампонажного раствора.

Наиболее широко из числа таких облегчающих добавок применяются глины, тонкодисперсные кремнеземистые материалы природного (осадочные породы - опоки, трепелы, диатомиты) и искусственного (силикагели) происхождения, реже применяется мел.

Подбор рецептур тампонажных растворов для цементирования скважин с аномально высокими пластовыми давлениями связан с большими трудностями в результате отсутствия специальных утяжеленных цементов. Такие цементы готовят на буровом предприятии смешением тампонажного цемента и утяжеляющей добавки - кварцевого немолотого песка, магнетитового песка. Как правило, качество этих смесей неудовлетворительное, приготовление их связано с большими затратами. Кроме того, смеси на основе немолотых утяжеленных добавок дают нестабильный, седиментационно- неустойчивый раствор, что сказывается как на технологии затворения раствора, так и на качестве цементирования скважин.

В последнее время для цементирования скважин с аномально высокими давлениями разработаны и изготавливаются заводским способом утяжеленные цементы, представляющие собой тщательно приготовленную смесь вяжущего материала и утяжеляющей добавки.

## **Утяжеленный цемент для умеренно высоких температур**

Утяжеленный цемент (УЦГ) предназначен для цементирования скважин при температуре выше 100 °С. Вяжущей основой его служит портландцемент или тампонажный цемент по ГОСТ 1581-85, утяжелителем - измельченная железная руда.

Последняя выбирается в качестве утяжеляющей добавки вследствие ее относительно высокой плотности, а также способности  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  образовывать высокопрочные ферритные и алюмоферритные гидрогранаты, устойчивые в сульфатных водах.

Сроки схватывания растворов из цементно-рудной смеси (табл. 5.8) определяются схватыванием цемента и мало изменяются от добавки руды. Так, при температуре 20 °С начало схватывания раствора из чистого цемента 9 ч, а начало схватывания раствора из смесей цемент - руда 50:50 и 40:60 изменяется в пределах 8 ч 30 мин - 9 ч. При температуре 75 °С характер изменения сроков схватывания аналогичен.

С увеличением тонкости помола руды прямо пропорционально возрастает водосмесевое отношение и уменьшается плотность раствора. Приведенный график может служить для подбора рецептуры смеси при заданной плотности раствора.

Для изготовления УЦГ в качестве вяжущей составляющей пригодны тампонажные и строительные портландцемента, отвечающие требованиям ГОСТ 1581-85 по срокам схватывания и растекаемости раствора.

## **ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ ОТХОДОВ БУРЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СКВАЖИН**

### **Определения**

- амбарная технология строительства скважин – технология, при которой все отходы бурения (буровой шлам (БШ), отработанный буровой раствор (ОБР) и буровые сточные воды (БСВ)) захороняются на территории буровой в амбарах для пресных и соленых отходов;
- безамбарная технология строительства скважин – технология, заключающаяся в раздельном сборе отходов бурения и их вывозе с территории буровой для утилизации или захоронения;
- буровой шлам – смесь выбуренной породы и бурового раствора, удаляемых из циркуляционной системы буровой различными очистными устройствами;
- буровые сточные воды – водная суспензия, образованная при промывке бурового оборудования и инструмента, содержащая остатки бурового раствора;
- кек БСВ – осажденная центрифугой твердая часть буровых сточных вод;
- коэффициент кавернозности – отношение фактического объема скважины к объему, рассчитанному по значению диаметра долота (или возведенное в квадрат отношение значения фактического среднего диаметра скважины к значению диаметра долота);
- коэффициент разуплотнения – показатель увеличения объема выбуренной породы за счет измельчения породоразрушающим инструментом и системой очистки;
- малоамбарная технология строительства скважин – технология, при которой пресные отходы бурения захороняются на территории буровой в пресном амбаре, соленые отходы – вывозятся с территории буровой на утилизацию или захоронение;
- наработка раствора – увеличение объема бурового раствора за счет диспергирования частиц выбуренной глинистой породы в процессе бурения и циркуляции;
- отработанный буровой раствор – буровой раствор, исключаемый из технологического процесса бурения, который накапливается на территории буровой и подлежит утилизации (повторному использованию) или захоронению;
- рабочий раствор – объем раствора на поверхности в емкостях для создания необходимой циркуляции при бурении и восстановлении скважин;
- система циркуляции бурового раствора – это система, состоящая из надземной и подземной участков, по которым буровой раствор циркулирует по замкнутому циклу. Функции надземного участка: приготовление, обработка и очистка раствора, нагнетание его в скважину и поддержание режима промывки. Функции подземного участка: подведение

гидравлической энергии к долоту и транспортировка шлама на поверхность. Этот участок состоит из канала для нисходящего потока бурового раствора в бурильной колонне и канала для восходящего потока, образуемого внешней поверхностью бурильной колонны и стволом скважины (или обсадной колонной);

- суспензия – мутная жидкость с находящимися в ней во взвешенном состоянии частичками твердого вещества;
- утилизация отходов бурения – вывоз на растворный узел для регенерации и повторного использования.

### **Методика расчета объемов отходов бурения, образующихся при строительстве скважин**

Настоящая методика позволяет определить объемы отходов бурения, образующихся в процессе строительства скважин с использованием технологий: амбарной, малоамбарной и безамбарной.

Отходы бурения содержат в своем составе химические реагенты, минеральные примеси и нефтепродукты и, попадая в почву и водные объекты, загрязняют их. В целях предотвращения загрязнения объектов природной среды в рабочих проектах на строительство скважин предусматриваются утилизация (полезное повторное использование) и захоронение отходов бурения.

Настоящая методика позволяет обосновать в проектах на строительство скважин количество технических средств и сооружений, необходимых для сбора, хранения, транспортировки, утилизации или захоронения отходов бурения.

Основным принципом, которым необходимо руководствоваться при определении объемов ОБР, является принцип расчета ОБР по интервалам бурения, заданных конструкцией скважины. Объем ОБР, уходящего в отходы, складывается из избыточных объемов растворов, накапливаемых при поинтервальном бурении. При этом основными причинами образования и накопления избыточных объемов растворов являются:

- наработка раствора при бурении интервалов, сложенных глинистыми породами;
- замена одного типа бурового раствора на другой.

Количество отходов зависит:

- от эффективности очистки бурового раствора от выбуренной породы;
- от применения ресурсосберегающих технологий (оборотного водоснабжения, повторного использования бурового раствора, использования технологии отдельного сбора отходов бурения)

Для перевода объемного показателя отходов бурения в весовой принимать плотность бурового шлама  $1,7 \text{ г/см}^3$ .

## Общие формулы для расчетов объемов отходов бурения, образующихся при использовании разных технологий строительства скважин

Объем выбуренной породы или скважины в  $i$ -ом интервале определяется по формуле:

$$V_{\text{вн}i} = V_i = 0,785 \times D_i^2 \times H_i \times k_i, \quad (2.1)$$

где  $V_{\text{вн}i}$  – объем выбуренной породы в  $i$  – ом интервале,  $\text{м}^3$ ;  $V_i$  – объем скважины в  $i$ -ом интервале,  $\text{м}^3$ ;  $D_i$  – диаметр долота в  $i$ -ом интервале бурения, м;  $H_i$  – длина интервала ствола скважины, м;  $K_i$  – коэффициент кавернозности  $i$ -ом интервале бурения.

$$V_k = 0,785 \cdot 0.49^2 \cdot 160 \cdot 1.25 = 37.696 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{т}1} = 199.546 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{т}2} = 116.34 \text{ м}^3$$

$$V_x = 23.806 \text{ м}^3$$

$$V_3 = 24.043 \text{ м}^3$$

Исходный объем для бурения  $i$ -го интервала определяется по формуле:

$$V_{\text{исхБР}i} = 120 + V_{\text{БРскв}} = 120 + 0,785 D_K^2 \times L \quad (2.2)$$

где  $V_{\text{исхБР}i}$  – исходный раствор бурового раствора перед началом бурения  $i$  – го интервала, т.е. сумма объема рабочего бурового раствора на поверхности (согласно СТП 09100.17015.042-2006 –  $120 \text{ м}^3$ ) и объема бурового раствора в стволе или колонне в вышележащих интервалах,  $\text{м}^3$ ; 120 – объем рабочего бурового раствора на поверхности) 60 - при восстановлении скважин бурением боковых стволов),  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{БРскв}}$  - объем бурового раствора в скважине перед началом бурения  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ .

$$V_{\text{исхБРк}} = 120 + 0,785 \cdot 0^2 \cdot 0 = 120 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{исхБРт}1} = 120 + 0,785 \cdot 0.404^2 \cdot 160 = 140.5 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{исхБРт}2} = 225.943 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{исхБРх}} = 227.552 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{исхБРэ}} = 134.399 \text{ м}^3$$

Объем бурового раствора общий, необходимый для бурения  $i$ -го интервала, определяется по формуле:

$$V_{\text{БР}i} = 0,55 \times N_i \times H_i + V_{\text{исхБР}i}, \quad (2.3)$$

где  $V_{\text{БР}i}$  – объем раствора общий, необходимый для бурения  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ ; 0,55 – коэффициент, характеризующий применение ресурсосберегающих технологий;  $N_i$  – норма расхода бурового раствора для бурения  $i$ -го интервала согласно СНИП IV-2-82 [1] с учетом проектной коммерческой скорости бурения скважины.

$$V_{\text{БРК}} = 0,55 \cdot 0,92 \cdot 160 + 120 = 200.96 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРТ1}} = 572.8 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРТ2}} = 456.503 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРХ}} = 276.172 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРЭ}} = 179.774 \text{ м}^3$$

Объем бурового шлама, образующегося при бурении  $i$ -го интервала, определяется по формуле:

$$V_{\text{БШ}i} = 0,785 D_i^2 \times H_i \times k_i \times K_n \times 0,8, \quad (2.4)$$

где  $V_{\text{БШ}i}$  – объем бурового шлама, образующегося при бурении  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ ;  $K_n$  – коэффициент потери бурового раствора при очистке, учитывающий разуплотнение горной породы, численно равный: для бурения под кондуктор -2, под другие колонны – 1,5 (определены эмпирически); 0,8 – коэффициент ( $C_0$ ), характеризующий максимальную степень очистки бурового раствора от породы при использовании трех ступеней согласно РД 39-3-819-82 [2].

$$V_{\text{БШК}} = 0,785 \cdot 0,49^2 \cdot 160 \cdot 2 \cdot 0,8 = 60.313 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БШТ1}} = 0,785 \cdot 0,49^2 \cdot 160 \cdot 1,5 \cdot 0,8 = 239.455 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БШТ2}} = 139.608 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БШХ}} = 28.567 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БШЭ}} = 28.852 \text{ м}^3$$

Объем бурового раствора в буровом шламе при бурении  $i$ -го интервала, рассчитывается по формулам:

$$V_{\text{БРШ}i} = V_{\text{БШ}i} - 0,8 V_{\text{ВПи}}, \quad (2.5)$$

где  $V_{\text{БРШ}i}$  – объем бурового раствора в буровом шламе при бурении  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ .

$$V_{\text{БРШК}} = V_{\text{БШК}} - 0,8 V_{\text{ВПК}} = 60.313 - 0,8 \cdot 37.696 = 30.157 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРШТ1}} = 79.818 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРШТ2}} = 46.536 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРШХ}} = 9.522 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{БРШЭ}} = 9.617 \text{ м}^3$$

Объем ОБР после  $i$ -го интервала определяется по формуле:

$$V_{\text{ОБР}i} = V_{\text{БР}i} - V_{\text{исхБР}(i+1)} - V_{\text{БРШ}i}, \quad (2.6)$$

где  $V_{\text{ОБР}i}$  – объем ОБР после бурения  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{исхБР}(i+1)}$  – исходный объем бурового раствора перед началом бурения  $(i+1)$  интервала,  $\text{м}^3$ , не учитывается, если раствор полностью меняется.

Раствор не меняется:

$$\begin{aligned} V_{\text{обрк}} &= 200.96 - 140.5 - 30.157 = 30.304 \text{ м}^3 \\ V_{\text{обрт1}} &= 267.038 \text{ м}^3 \\ V_{\text{обрт2}} &= 182.415 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Раствор меняется:

$$\begin{aligned} V_{\text{обрх}} &= 276.172 - 9.522 = 266.65 \text{ м}^3 \\ V_{\text{обрэ}} &= 170.156 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Объем БСВ при бурении  $i$ -го интервала определяется по формуле:

$$V_{\text{БСВ}i} = 6V_{\text{ОБР}i} / 12 = 0,5V_{\text{ОБР}i}, \quad (2.7)$$

где  $V_{\text{БСВ}i}$  – объем БСВ, образующийся при бурении  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ ; 6 – средний коэффициент разбавления ОБР водой при осветлении, значение которого определено из опыта работы; 12 – средний коэффициент, определяющий долю бурового раствора в составе БСВ, значение которого определено из опыта работы.

$$\begin{aligned} V_{\text{бсвк}} &= 0,5 \cdot 30.304 = 15.152 \text{ м}^3 \\ V_{\text{бсвт1}} &= 133.519 \text{ м}^3 \\ V_{\text{бсвт2}} &= 91.207 \text{ м}^3 \\ V_{\text{бсвх}} &= 133.325 \text{ м}^3 \\ V_{\text{бсвэ}} &= 85.078 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

Объем воды после проведения АКЦ определяется по формуле:

$$V_{\text{В}} = 0,785d_{\text{к}}^2 \times L, \quad (2.8)$$

где  $V_{\text{В}}$  – объем воды после проведения ОКЦ и АКЦ,  $\text{м}^3$ ;  $d_{\text{к}}$  – внутренний диаметр колонны, м;  $L$  – длина колонны, м, заполненная водой при проведении АКЦ, численно равная: для кондуктора и технических колонн – 200м; для эксплуатационной колонны – всей ее длине; в колоннах-хвостовиках принимается по проекту.

Объем буферной жидкости с зонами смешения  $V_{\text{БЖ}}$  равен 12 м.

Объем кека, образующегося в результате осветления БСВ при бурении  $i$ -го интервала, определяется по формуле:

$$V_{\text{кеки}} = 0,2 \times V_{\text{БСВ}i}, \quad (2.9)$$

где  $V_{\text{кеки}}$  – объем кека,  $\text{м}^3$ ; 0,2 – коэффициент, определяющий долю объема кека в объеме БСВ $_i$  (определен из опыта работы).

$$\begin{aligned}
V_{\text{кекК}} &= 0,2 \cdot 15.152 = 3.03 \text{ м}^3 \\
V_{\text{кект1}} &= 26.704 \text{ м}^3 \\
V_{\text{кект2}} &= 18.241, \text{ м}^3 \\
V_{\text{кекх}} &= 26.665 \text{ м}^3 \\
V_{\text{кекээ}} &= 17.016 \text{ м}^3
\end{aligned}$$

### **Порядок проведения расчета объемов отходов бурения, образующихся при амбарной технологии строительства скважин**

Объем отходов бурения при амбарной технологии строительства скважины складывается из объемов образующегося бурового шлама, отработанного бурового раствора, буровых сточных вод и определяется по формуле:

$$V_{\text{ОБ}} = V_{\text{БШ}} + V_{\text{ОБР}} + V_{\text{БСВ}} + V_{\text{В}} + V_{\text{БЖ}}, \quad (2.10)$$

где  $V_{\text{ОБ}}$  – объем отходов бурения,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{БШ}}$  – объем бурового шлама,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{ОБР}}$  – объем отработанного бурового раствора,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{БСВ}}$  – объем буровых сточных вод,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{В}}$  – объем воды после проведения АКЦ,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{БЖ}}$  – объем буферной жидкости с зонами смешения,  $\text{м}^3$ .

$$V_{\text{обК}} = 60.313 + 30.304 + 15.152 + 12 = 117.768 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{обт1}} = 652.013 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{обт1}} = 425.23 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{х}} = 440.542 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{з}} = 296.086 \text{ м}^3$$

Рабочим проектом на строительство скважины должны предусматриваться пресный и соленый амбары для раздельного захоронения отходов бурения.

### **Порядок проведения расчета объемов отходов бурения, образующихся при безамбарной технологии строительства скважин**

При безамбарной технологии строительства скважины производится раздельный сбор отходов бурения, которые вывозятся с территории буровой для утилизации (повторного использования) или захоронения.

После прохождения БСВ через КФУ образуется осветленная вода и кек. Весь объем воды утилизируется на нужды буровой и не учитывается как отход бурения для сброса на рельеф местности или в водные объекты.

Объем отходов бурения (пресных и соленых) при безамбарной технологии, который необходимо вывезти с территории буровой, рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{ОБ}} = V_{\text{БШ}} + V_{\text{ОБР}} + V_{\text{кекБСВ}} + V_{\text{В}} + V_{\text{БЖ}}, \quad (2.11)$$

где  $V_{\text{кекБСВ}}$  – объем кек, образующегося при осветлении БСВ в результате осаждения твердой фазы центрифугой КФУ (МКФУ),  $\text{м}^3$ .

$$V_{\text{обК}} = 60.313 + 30.304 + 3.03 + 12 = 105.647 \text{ м}^3$$

$$V_{\text{обт1}} = 545.198 \text{ м}^3$$



$$\begin{aligned}
V_{\text{обт}2} &= 352.264 \text{ м}^3 \\
V_{\text{обх}} &= 333.882 \text{ м}^3 \\
V_{\text{обэ}} &= 228.024 \text{ м}^3
\end{aligned}$$

Объем бурового шлама (общий), образующийся при бурении  $i$ -го интервала и предназначенный для вывоза с территории буровой для захоронения, рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{БШ}io} = V_{\text{БШ}i} + V_{\text{кекБСВ}i}, \quad (2.12)$$

где  $V_{\text{БШ}io}$  – объем бурового шлама (общий), образующийся при бурении  $i$ -го интервала,  $\text{м}^3$ .

$$\begin{aligned}
V_{\text{бшoK}} &= 60.313 + 3.03 = 63.343 \text{ м}^3 \\
V_{\text{бшoт1}} &= 266.159 \text{ м}^3 \\
V_{\text{бшoт2}} &= 157.849 \text{ м}^3 \\
V_{\text{бшoX}} &= 55.232 \text{ м}^3 \\
V_{\text{бшoЭ}} &= 45.867 \text{ м}^3
\end{aligned}$$

#### **Порядок проведения расчета объемов отходов бурения, образующихся при малоамбарной технологии строительства скважин**

При малоамбарной технологии строительства скважины в процессе бурения надсолевого комплекса осветление БСВ с помощью КФУ не производится, поэтому кек не образуется.

Объемы пресных ОБ рассчитываются по амбарной технологии строительства скважины. Объемы соленых ОБ рассчитываются по безамбарной технологии строительства скважины.

Рабочим проектом на строительство скважины должен предусматриваться пресный амбар для захоронения пресных отходов бурения объемом, включающим расчетное количество пресных БШ, ОБР, БСВ, БЖ и воды для проведения АКЦ.

Соленый буровой шлам (общий, т.е. с кеком) хоронится в ОППХ.

Соленые ОБР и БСВ утилизируются, т.е. вывозятся на растворный узел для регенерации и повторного использования.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Итоговая таблица расчета объемов отходов бурения

Параметры	Бурение под колонну					Итого	Приложения
	кондуктор	1 технич.	2 технич.	хвостовик	эксплуат.		
Интервал бурения, м	0-160	160-1470	1470-2780	2780-3300	3300-4050		
Проходка в интервале, $H_i$ , м	160	1310	1310	520	750		
Диаметр долота, $D_i$ , м	0,490	0,394	0,295	0,216	0,165		
Внутр. диам. предыдущ. колонны, $D_K$ , м	0	0,404	0,303	0,222	0,172		
Длина предыдущей колонны, $L$ , м	0	160	1470	2780	620		$H_i$ хвостовика + 100м на перекрытие колонны хвостовиком
Коэффициент кавернозности, $k_i$	1,25	1,25	1,3	1,25	1,15		
Коэффициент разуплотнения, $k_n$	2	1,5	1,5	1,5	1,5		
Норма расхода бурового раствора на 1 м бурения (СНИП, $m^3/m$ ), $N_i$	0.92	0.6	0.32	0.17	0.11		
Степень очистки, $C_0$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8		
Объем выбуренной породы, $m^3$ $V_{BПi} = V_i = 0,785 \times D_i^2 \times H_i \times k_i$	37.696	199.546	116.34	23.806	24.043	401.431	
Исходный объем для бурения интервала, $m^3$ , 2 $V_{исхБПi} = 120 + V_{БРсв} = 120 + 0,785 D_K^2 \times L$	120,0	140.5	225.943	227.552	134.399		$H_i$ хвостовика + 100м на перекрытие колонны хвостовиком
Объем бурового раствора на бурение интервала общий, $m^3$ , $V_{БРi} = 0,55 \times N_i \times H_i + V_{исхБПi}$	200.96	572.8	456.503	276.172	179.774		
Объем бурового шлама, $m^3$ , $V_{БШi} = 0,785 D_i^2 \times H_i \times k_i \times K_n \times C_0$	60.313	239.455	139.608	28.567	28.852	496.795	
Объем бурового раствора в шламе, $m^3$ , $V_{БРШi} = V_{БШi} - 0,8 V_{BПi}$	30.157	79.818	46.536	9.522	9.617	175.651	

Объем ОБР, м <sup>3</sup> , $V_{ОБРi} = V_{БРi} - V_{исхБР(i+1)} - V_{БРШi}$ (если раствор не меняется) $V_{ОБРi} = V_{БРi} - V_{БРШi}$ (если раствор полностью меняется)	30.304	267.038	182.415	266.65	170.156	916.563	Тип раствора поменяли при бурении под хвостовик и эксплуатационную колонну
Объем БСВ, м <sup>3</sup> , $V_{БСВi} = 6V_{ОБРi} / 12 = 0,5V_{ОБРi}$	15.152	133.519	91.207	133.325	85.078	458.281	
Объем буферной жидкости с зонами смешения, м <sup>3</sup> , $V_{БЖ}$	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	60,0	
Объем кека, м <sup>3</sup> , $V_{КЕКi} = 0,2 \times V_{БСВi}$	3.03	26.704	18.241	26.665	17.016	91.656	
Объем отходов бурения всего по амбарному способу бурения, м <sup>3</sup> , $V_{ОБ} = V_{БШ} + V_{ОБР} + V_{БСВ} + V_{БЖ}$	117.768	652.013	425.23	440.542	296.086	1932	
Объем отходов бурения всего по безамбарному способу бурения, м <sup>3</sup> , $V_{ОБ} = V_{БШ} + V_{ОБР} + V_{кекБСВ} + V_{БЖ}$	105.647	545.198	352.264	333.882	228.024	1565	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с темой моей курсовой работы «Специальные тампонажные растворы» я выполнил поставленные задачи: ознакомиться с процессом цементирования скважин, их рецептурами и добавками для получения определённых свойств. Изучить методы профилактики коррозионного разрушения цементного камня.

До последнего времени проблема качественного цементирования скважин, сооруженных для добычи нефти и газа, сводилась к предотвращению потерь добываемого топлива, а также обводнения месторождений и добываемой нефти. Значительное расширение географии глубокого бурения, глубины и числа бурящихся скважин, расширение области использования глубоких скважин и буровой технологии (как для добычи полезных ископаемых — в том числе минеральных солей, элементарной серы, тепла недр, — так и для сооружения подземных хранилищ, газификации углей, захоронения вредных и опасных промышленных отходов) заставляет взглянуть на проблему цементирования скважин с несколько иной стороны.

Цементирование представляет собой технологическую операцию в процессе строительства скважин, вызванную необходимостью закрепить обсадную колонну в стволе скважины, изолировать различные горизонты друг от друга и от дневной поверхности, в определенных случаях создавать искусственный забой или разделительную пробку в стволе скважины.

Цементирование играет решающую роль в создании изоляционного комплекса скважин. Еще совсем недавно нормой его долговечности служил предполагаемый срок разработки нефтяного или газового месторождения. Теперь же становится все более очевидной недостаточность такого подхода.

Изоляционный комплекс глубокой скважины должен обладать абсолютной долговечностью. Только в этом случае может быть обеспечена защита природной среды от непредвиденных последствий в отдаленном (а в некоторых случаях и в ближайшем) будущем. К таким непредвиденным последствиям может привести попадание в недра биологически зараженных сред с поверхности, проникновение в гидродинамически открытые горизонты, а затем и на поверхность захороненных в недрах промышленных отходов, горючих или ядовитых природных газов, радиоактивных продуктов подземных ядерных взрывов; изменение напряженного состояния горных массивов с вытекающими из этого сейсмическими последствиями, а также многое другое, о чем мы **еще** не знаем.

Под коррозией понимается разрушение цементного или бетонного изделия в результате действия на него физических либо химических факторов как извне (внешние причины коррозии), так и изнутри (внутренние причины коррозии).

В условиях эксплуатации на цементный камень действуют: природные воды (речные и морские) под давлением или просто омывающие сооружения;

промышленные и бытовые воды (стоки); периодически и многократно повторяющиеся теплосмены (сезонные и дневные колебания температур); процессы увлажнения и высыхания (колебания атмосферной влажности, специфические условия службы). Кроме того, влияют механические воздействия — удары волн, выветривание, истирание, а также биологические — вредные воздействия бактерий. Все это внешние причины коррозии и разрушения цементного камня.

К разрушению цементного камня (бетона) приводят и внутренние факторы — его высокая водопроницаемость, взаимодействие щелочей цемента с кремнеземом заполнителя, изменение объема из-за различия температурного расширения цемента и заполнителя.

В настоящее время спеццементы для крепления высокотемпературных скважин применяют обязательно с добавками реагентов-замедлителей схватывания, которые выбирают только с учетом температуры на забое, что обуславливает возможность протекания реакцией гидротермального синтеза.

К коррозионно-стойким тампонажным материалам относятся разновидности портландцементов, обладающих умеренной и повышенной сульфатостойкостью, в которых ограничено содержание трехкальциевого силиката и трехкальциевого алюмината. Такие цементы менее подвержены сульфатной коррозии, чем обычные. Это пуццолановые цементы, глиноземистый цемент, карбонатный цемент, песчанистый портландцемент, магнезиальный цемент и шлакопортландцемент.

Дальнейшее проведение научно-исследовательских работ делает целесообразным в теоретическом и практическом плане изучения составов цементных растворов и служит стимулом для создания оптимального тампонажного цемента для каждой агрессивной среды и условий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данюшевский В.С «Проектирование оптимальных составов тампонажных цемента» - М., Недра, 1978, 293 с.
2. Коррозия цементного камня и способы защиты [Электронный ресурс] - <http://mirznaniy.com/a/190985/korroziya-tsementnogo-kamnya-i-sposoby-zashchity>
3. Данюшевский В.С. «Справочное руководство по тампонажным материалам».- М. Недра, 1973, 312 с.
4. Булатов А.И. «Технология цементирования нефтяных и газовых скважин» - М., Недра, 1983, 255 с.
5. Мариампольский Н.А. «Регулирование технологических показателей тампонажных растворов» - М.Недра, 1988 г., 224 стр.
6. Мильштейн В.М. «Цементирование буровых скважин» - Краснодар, 2003 г., 375 стр.
7. Будников В.Ф., Булатов А.И., Петерсон А.Я., Шаманов С.А. «Контроль и пути улучшения технического состояния скважин», - М., ООО "Недра-Бизнесцентр", 2001 г., 301 стр.
8. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цемента. М.: Недра, 1978.
9. Губкин Н.А. Исследование объемных изменений твердеющего цементного камня в связи с их влиянием на качество крепления скважин. Автореферат кандидатской диссертации. М.: МИНХ и ГП, 1978. С. 18.
10. Каримов Н.Х. Разработка составов и технология применения расширяющихся тампонажных материалов для цементирования глубоких скважин в сложных геологических условиях. Автореферат докторской диссертации. Уфа: УНИ, 1986. С. 10 – 11.
11. Белов В. В. Конспект лекций по курсу «Вяжущие вещества » Тверь, 2006г.
12. Данюшевский В.С. и др. Справочное руководство по тампонажным материалам. - 2-е издание, М.: Недра, 1987. С.106-107, 122-123
13. Агзамов Ф.А. Способ получения дисперсно-армированного тампонажного материала, 2014 [Электронный ресурс] [https://yandex.ru/patents/doc/RU2515454C1\\_20140510](https://yandex.ru/patents/doc/RU2515454C1_20140510)
14. Вяхирев в. И. И др. Облегченные и сверхлегкие тампонажные растворы, М., Недра, 1999