

622.24

186



н. а. луценко о. и. образцов

тампонажные растворы
пониженной плотности

62224 24458
 П 86 Луценко Н.
 Тимпсыяны
 раство...

осм.
 241
 38

Книга должна быть возвращена не
 позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач _____

3/XII 292
 14/XII 1225

2005
Н. А. ЛУЦЕНКО, О. И. ОБРАЗЦОВ

622.2У

186

ТАМПОНАЖНЫЕ РАСТВОРЫ
ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

24458



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1972

Тампонажные растворы пониженной плотности. *Н. А. Луценко, О. И. Образцов.* М., изд-во «Недра», 1972. Стр. 144.

Изложены основные свойства новых видов облегченных цементных растворов, даны рекомендации по их применению, приведены технологические особенности использования облегченных растворов в промышленных условиях.

Собран и критически обобщен обширный материал по этому вопросу, опубликованный в СССР и за рубежом.

Описаны промысловые испытания тампонажных растворов пониженной плотности при цементировании глубоких скважин.

Таблиц 38, иллюстраций 36, список литературы — 38 названий.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников буровых предприятий нефтяной и газовой промышленности.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом в СССР возрастает объем глубокого бурения на нефть и газ. Наряду с ростом объемов бурения постоянно увеличивается и глубина скважин. В ближайшие годы перед исследовательскими и производственными организациями Советского Союза стоит задача освоить глубины до 10 тыс. м. Успешное решение этой важной научно-технической проблемы невозможно без всестороннего развития техники и технологии бурения, а также совершенствования работ по креплению скважин и разобщению пластов.

Цементированию глубоких скважин придается исключительно важное значение, так как от его результатов зависят окончательные итоги строительства скважин. Необходимым условием высококачественного разобщения продуктивных горизонтов является правильно подобранный состав тампонажного раствора. Это особенно важно в связи с увеличением забойных температур, давлений и необходимостью подъема цементного раствора на большую высоту.

Стремление к упрощению конструкции глубоких скважин предопределяет выход обсадных труб из-под башмака до 2000—3000 м. Произвести одноступенчатый подъем тампонажного раствора плотностью 1,8—1,9 г/см³ на такую высоту чрезвычайно сложно. Существенная разница между плотностью тампонажного раствора и плотностью промывочной жидкости приводит к чрезмерно высоким давлениям в конце продавливания и создает благоприятные условия для возникновения гидроразрыва пластов и поглощения раствора в процессе цементирования. Случаи интенсивного поглощения цементного раствора и недоподъема его до расчетной

высоты наблюдались в различных районах страны. В связи с этим в последние годы как в СССР, так и за рубежом большое внимание уделяется исследованию и применению тампонажных растворов плотностью 1,4—1,7 г/см³. Такие растворы в отличие от обычных портландцементных, имеющих плотность 1,8—1,9 г/см³, получили наименование тампонажные растворы пониженной плотности, или облегченные цементные растворы. Эти растворы широко используются в США, где для их приготовления рекомендован целый ряд добавок и материалов. В нашей стране для снижения удельного веса тампонажных растворов чаще всего применяется глина. Однако диапазон использования глино-цементных растворов при цементировании глубоких скважин весьма ограничен. Объясняется это тем, что добавка глины к портландцементу ведет к резкому падению механической прочности цементного камня. Кроме того, глино-цементные смеси обладают слабой температуростойкостью и не всегда дают удовлетворительные результаты при разобщении трещиноватых и кавернозных пород с низкими пластовыми давлениями.

Таким образом, в целях широкого практического применения тампонажных растворов пониженной плотности необходимо расширить ассортимент облегченных цементных растворов, предназначенных для цементирования глубоких скважин в различных геологических условиях. Наиболее рациональным считается получение облегченных цементных растворов на основе портландцемента и добавок специального назначения. Эти добавки позволяют не только снизить плотность растворов, но и придать им температурную и коррозионную стойкость, повысить закупоривающую способность и улучшить ряд других свойств.

КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Вопрос о необходимости и целесообразности снижения удельного веса цементного раствора возник в связи с увеличением глубин скважин. Основной причиной использования растворов пониженного удельного веса является стремление осуществлять подъем тампонажного раствора на большую высоту в одну ступень. Однако возможность широкого применения таких растворов стала очевидной только после пересмотра требований, предъявляемых к механической прочности цементного камня.

Теоретические разработки, проведенные американскими и советскими учеными, показали, что цементный камень с прочностью на сжатие $35\text{--}50 \text{ кг/см}^2$ имеет достаточный запас прочности и может быть признан надежным тампонирующим материалом, предназначенным для разобщения пластов и горизонтов в нефтяных и газовых скважинах. Результаты этих исследований дали толчок к внедрению в практику цементированных работ многокомпонентных тампонажных смесей и в первую очередь растворов пониженного удельного веса. Впервые портландцементные смеси, предназначенные для цементирования скважин, готовились с добавками песка и глины. Эти добавки вводились в раствор, как правило, для сокращения расхода цемента.

В конце 30-х годов Н. А. Луценко были разработаны гельцементы и тампонажные цементы с гидравлическими добавками. На базе этих цементов готовились растворы, предназначенные для цементирования скважин в осложненных условиях.

В американской практике [12, 37] длительное время применялись растворы с добавкой 2—4% бентонита от веса цемента. Эти растворы по сравнению с обычными цементными имели лучшие структурно-механические характеристики и несколько заниженные удельные веса.

С начала 40-х годов в США [38] облегченные цементные растворы находят все более широкое применение в нефтепромысловой практике. Чаще всего в качестве облегчающей добавки используется бентонит с высокой водопотребностью. Такими растворами было зацементировано большое количество обсадных колонн. Гельцементные тампонажные растворы, применяемые в США, содержат от 2 до 25% бентонита от веса цемента. Однако оптимальной величиной добавки бентонита принято считать 4—16%. Помимо обычных гельцементных растворов применяются растворы, содержащие 5—25% бентонита и 0,5—1,5% лигносульфоната кальция. Они характеризуются замедленными сроками схватывания и сравнительно низкой водоотдачей. В тех случаях, когда требуется повышенная прочность бентонито-цементных камней, в раствор рекомендуется вводить от 1 до 8% хлористого натрия. По мнению Х. Дж. Бича [3], такие растворы имеют не только более высокую прочность, но и обладают улучшенной закупоривающей способностью.

В СССР исследованию свойств тампонажных растворов пониженного удельного веса посвящены работы А. И. Булатова [6, 7]. Им были разработаны рецептуры облегченных глино-цементных растворов, содержащих в своем составе до 100% глины от веса тампонажного портландцемента.

В последующие годы изучению свойств глино-цементных растворов уделяется внимание со стороны многочисленных исследовательских и производственных организаций. В ряде работ рассматривается широкий круг вопросов: от методики подбора состава раствора до детального изучения его физико-механических параметров. Когда разрез скважины представлен трещиноватыми и кавернозными породами, глино-цементные растворы пониженного удельного веса не всегда позволяют произвести подъем тампонажного раствора на заданную высоту. Это происходит вследствие нарушения гидродинамического режима ствола скважины в процессе цементирования и поглощения цементного раствора. При

этом в качестве облегчающих добавок рекомендуются зернисто-волокнистые материалы, характеризующиеся повышенной тампонирующей (закупоривающей) способностью.

В УкрНИИПНД были разработаны тампонажные растворы пониженного удельного веса, получаемые на базе цемента для «горячих» или «холодных» скважин и вспученного перлитового песка (ВПП). Перлито-цементные растворы были с успехом испытаны при цементировании промежуточных и эксплуатационных колонн в скважинах различного назначения.

УфНИИ эти же смеси, но с добавкой, гипсо-глиноземистого цемента рекомендованы для борьбы с поглощением растворов. Применение ВПП в качестве материала, повышающего тампонирующие способности цементных растворов, предложено и другими исследователями. Вследствие того, что зерна вспученного перлитового песка имеют высокий процент замкнутой пористости, растворы с добавкой ВПП характеризуются изменением подвижности и удельного веса под воздействием высокого давления. Отмечая эту особенность перлито-цементных растворов, Г. Н. Хангильдин делает вывод, что они не могут быть пригодны для цементирования эксплуатационных колонн. По его мнению, растворы с добавкой перлита следует использовать только для борьбы с поглощением.

С выводами Г. Н. Хангильдина о назначении перлито-цементных растворов нельзя согласиться. Дело в том, что влияние высокого давления на консистенцию растворов, содержащих ВПП, может быть учтено путем установления оптимальной величины водо-цементного отношения. Найденная нами зависимость [9] между водопотребностью перлита и его объемным весом позволяет определить расчетным путем оптимальные В:Ц для перлито-цементных смесей. Эта зависимость устраняет те недостатки, которые, по мнению Г. Н. Хангильдина, не позволяют использовать ВПП в качестве облегчающей добавки в тампонажные растворы, предназначенные для цементирования эксплуатационных колонн.

Перлито-цементные растворы достаточно широко представлены в нефтепромысловой практике США [37]. Так, только в 1960 г. для приготовления тампонажных растворов там было израсходовано около 9 тыс. т

перлита [30]. Наиболее высокими физико-механическими параметрами обладают растворы, в которых в качестве облегчающей добавки используется так называемый улучшенный перлит, представляющий собой смесь вспученного и невспученного перлитового песка состава 1:1.

Применение перлито-цементных растворов в США считается целесообразным в тех случаях, когда не удается достичь желаемых результатов с использованием чистых портландцементных или бентонито-цементных растворов. Это объясняется тем, что стоимость растворов с добавкой перлита значительно выше стоимости чистых или гелцементных растворов.

Анализ состояния скважин и условий их цементирования на таких площадях Украинской ССР, как Рудки, Октябрьская, Джанкойская и др., показал, что снижение удельного веса тампонажного раствора не всегда позволяет производить подъем цементного раствора на большую высоту. Причины недоподъема цементного раствора в затрубном пространстве объясняются наличием в разрезе ствола скважины трещиноватых и кавернозных пород, а также пород, предрасположенных к гидроразрыву пластов. Это обстоятельство и послужило основанием для изыскания новых видов зернисто-волоконистых материалов.

В результате лабораторных исследований нами были изучены облегченные цементные растворы, получаемые на базе тампонажного портландцемента и таких материалов, как асбозурит и обожженный диатомовый песок (ОДП). Промышленные испытания растворов с добавкой асбозурита и обожженного диатомового песка, проведенные на Октябрьской площади треста Крымнефтегазразведка, дали положительные результаты [21].

В ГрозНИИ разработаны составы легких тампонажных растворов для забойных температур 90—200°С. Вяжущими материалами для приготовления растворов малого удельного веса в зависимости от температурных условий в скважине являлись портландский или шлаковый цемент. В качестве облегчающего наполнителя использовались коксовая мелочь, раздробленный кокс и тонкомолотый обожженный диатомит.

О возможности приготовления облегченных цементных растворов на базе тампонажного цемента и нефтя-

ного кокса, выпускаемого Ново-Уфимским нефтеперерабатывающим заводом, говорится и в работах Г. Н. Хангильдина.

Поскольку цементные растворы пониженного удельного веса предназначены для цементирования глубоких скважин, то очевидно, что в качестве облегчающих материалов должны использоваться добавки, позволяющие получать цементный камень с достаточно высокой прочностью в условиях высоких температур и давлений. Для придания облегченным цементным растворам термостойчивости [21] были исследованы тампонажные смеси, получаемые на базе цемента для «горячих» скважин и инзенского диатомита. Разработанные диатомито-цементные растворы по своим физико-механическим свойствам выгодно отличаются от большинства видов облегченных растворов.

В МИНХ и ГП им. И. М. Губкина [20] были изучены свойства облегченного цементного раствора с добавкой диатомита Киссабитского месторождения. Смесь, содержащая 60% цемента и 40% диатомита, была приготовлена в заводских условиях совместным помолем клинкера, диатомита и гипса. Из такой смеси получается цементный раствор удельного веса до $1,3 \text{ г/см}^3$. Там же исследована смесь, состоящая из 47% клинкера, 50% трепела Вольского месторождения и 3% гипса. Путем затворения такой смеси при $B : Ц = 0,9$ можно получить облегченный цементный раствор удельного веса $1,5 \text{ г/см}^3$.

Трепело-цементная смесь, выпущенная цементным заводом «Комсомолец», в 1962 г. была успешно испытана на нескольких скважинах в восточных районах страны, в частности на сверхглубокой скв. I Арал-Сор.

Авторами была рассмотрена возможность применения пуццоланового портландцемента (ППЦ) марок 300, 400 и 500 Брянского завода для приготовления облегченных цементных растворов.

Для цементирования обсадных колонн в соленосных толщах рекомендованы тампонажные растворы, получаемые на базе портландцемента и диатомита Киргизского месторождения.

Облегченные цементные растворы на базе тампонажного цемента для «горячих» или «холодных» скважин и активных минеральных добавок изучались многими советскими исследователями. Так, А. И. Булатовым [7]

было установлено, что при введении в глино-цементные растворы до 30% тонкомолотой опоки прочность цементного камня в условиях высокотемпературного твердения не снижается. В Волгоградской области при креплении скважин используются цементные растворы, получаемые с добавлением к цементу 50% опоки.

Активные минеральные добавки широко применяются при цементировании глубоких скважин за рубежом. В США для приготовления тампонажных растворов, близких по удельному весу к промывочным жидкостям, используются смеси, состоящие из портландских цемента и диатомовой земли. Эти растворы с особым успехом применяются при цементировании глубоких и сверхглубоких скважин.

В УкрНИИгазе разработаны облегченные цементно-меловые растворы, применяемые для крепления газовых скважин. Такие тампонажные растворы, затвердевая, превращаются в цементный камень с низкой газопроницаемостью.

Для придания тампонажным растворам повышенной термо- и коррозионной устойчивости в США применяются пуццолановые цементы. В качестве пуццолановой добавки рекомендуются сланцы, диатомиты, топливные шлаки, зола-унос и др.

В ФРГ для цементирования обсадных колонн применяются специальные виды пуццолановых цемента, позволяющие получать цементные растворы удельного веса до $1,6 \text{ г/см}^3$.

Из приведенных выше данных видно, что использование в качестве облегчающих материалов активных минеральных добавок позволяет получать растворы пониженной плотности, которые при затвердении превращаются в цементный камень, пригодный для разобщения пластов и горизонтов в глубоких скважинах.

Одним из направлений в области создания новых видов облегченных цемента следует считать получение растворов из обычного тампонажного цемента, затворяемого на жидкости с повышенной структурообразующей способностью. В качестве таких структурообразователей используются жидкое стекло, смесь хлористого алюминия и хлористого кальция, КМЦ, мылонафт, КМГЭЦ и др. Снижение удельного веса раствора в этом случае происходит за счет повышения водо-цементного отноше-

ния до 0,7—0,9. Несмотря на повышенное содержание воды, растворы остаются стабильными.

Г. Н. Хангильдиным рассмотрена возможность применения 6—8%-ной соляной кислоты в качестве жидкости для затворения тампонажного цемента. В результате удается получать тампонажные растворы удельного веса до $1,64 \text{ Г/см}^3$ при достаточно высокой прочности камня.

Одним из наиболее перспективных направлений в области изыскания тампонажных растворов пониженного удельного веса следует признать получение растворов на базе гидратированной извести, смешиваемой с активными минеральными добавками [4]. В качестве таких добавок чаще всего используются летучая зола (зола-унос), тонкомолотые обжиговые материалы (кирпич, глиеж) и некоторые виды шлаков.

В Южгипроцементе и НИИцементе исследовались известково-песчаные тампонажные растворы, характеризующиеся пониженным удельным весом ($1,45—1,60 \text{ Г/см}^3$) и высокой механической прочностью при твердении в условиях высоких температур и давлений.

В КраснодарНИПИнефти были разработаны тампонажные растворы на базе извести и глины. Отличительной особенностью тампонажных смесей является то, что при затворении водой они дают растворы удельного веса ниже $1,30 \text{ Г/см}^3$.

Представляет интерес новое направление в разработке рецептуры тампонажных растворов пониженного удельного веса, основанное на использовании цемента очень тонкого помола. Большая удельная поверхность таких цемента (до $10\,000 \text{ см}^2/\text{г}$) позволяет получать стабильные цементные суспензии при $\text{В:Ц} = 1,0—1,3$. Из этих цемента можно приготовить растворы удельного веса до $1,3—1,4 \text{ Г/см}^3$ при хороших физико-механических характеристиках цементного камня. Растворы из цемента очень тонкого помола начали применяться в США. При удельном весе исходного раствора $1,49 \text{ Г/см}^3$ из него получают цементные камни с прочностью на сжатие 81 кг/см^2 после твердения в течение одних суток при температуре 49°C . Как правило, эти цементы используются в скважинах, глубина которых не превышает 3000 м.

Г. Н. Хангильдин указывал на возможность использования цементной пыли рукавных фильтров для приготовления легких тампонажных растворов.

Особое место при цементировании нефтяных и газовых скважин в США отводится растворам с добавкой гильсонита [24]. Эти растворы с успехом применяются при цементировании трещиноватых и кавернозных пород, где другие виды облегчителей не дают желаемых результатов.

Интересные исследования проведены рядом авторов [7] с использованием доменных шлаков для получения облегченных тампонажных растворов.

Сотрудниками лаборатории крепления скважин АзНИПИнефть в качестве тампонажного материала была рекомендована терморезактивная смола, позволяющая получать растворы плотностью менее $1,3 \text{ г/см}^3$.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что облегченные тампонажные растворы находят все более широкое применение при цементировании нефтяных и газовых скважин. По-видимому, при строительстве скважин глубиной 10—15 тыс. м их использование станет еще более необходимым. Об этом свидетельствуют первые опыты проходки сверхглубоких скважин как в СССР (Арал-Сор), так и в США. Значительная часть затрубного пространства в скважинах глубиной 6000—7700 м цементируется с использованием тампонажных растворов удельного веса $1,26—1,62 \text{ Г/см}^3$.

Таким образом, анализ исследований облегченных цементных растворов дает основание считать, что практическое применение могут иметь тампонажные растворы, получаемые следующим способом:

1) затворением тампонажной смеси, состоящей из цемента и материалов, способных связывать большое количество воды (бентонит, перлит и др.) или имеющих плотность ниже, чем стандартный портландцементный раствор (кокс, гильсонит и др.);

2) увеличением содержания воды в растворе благодаря использованию цементов очень тонкого помола или затворению обычного тампонажного цемента на жидкости с повышенной способностью к структурообразованию;

3) затворением тампонажной смеси, содержащей в своем составе известь, необходимое количество минераль-

ных добавок и реагентов для регулирования схватывания;

4) использованием в качестве тампонажных материалов специальных пластмасс.

Многообразие видов вяжущих и облегчающих материалов, их качественное различие в зависимости от сырьевых особенностей и условий производства предопределили необходимость проведения систематизированных исследований с целью разработки общих принципов оценки и способов подбора оптимального состава облегченного цемента.

Широкое практическое применение тампонажных растворов пониженной плотности потребовало расширения ассортимента облегчающих добавок, выдачи конкретных рекомендаций по составу растворов и области их применения.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

В нефтепромысловой практике наиболее широко применяются облегченные цементы, получаемые на базе стандартных тампонажных портландцементов и минеральных добавок, способных существенно увеличивать водосодержание раствора.

Теоретическое обоснование условий получения тампонажных растворов пониженной плотности

Теоретические аспекты получения облегченных цементных растворов рассмотрены на примере трехкомпонентной суспензии.

Удельный вес раствора γ , полученного из цемента, добавки и воды, в общем виде может быть записан так:

$$\gamma = \frac{Q_{\text{ц}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{в}}}{\frac{Q_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{Q_{\text{д}}}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{Q_{\text{в}}}{\gamma_{\text{в}}}}, \quad (1)$$

а в пересчете на единицу веса цемента

$$\gamma = \frac{1 + m_d + m_b}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{m_d}{\gamma_d} + \frac{m_b}{\gamma_b}}, \quad (2)$$

где Q_c, Q_d, Q_b — весовое количество цемента, добавки и воды в исходном растворе в T ; m_d, m_b — количество добавки и воды, приходящееся на единицу веса цемента, в M^3/T ; $\gamma_c, \gamma_d, \gamma_b$ — удельный вес цемента, добавки и воды в T/M^3 .

На основании анализа экспериментальных и литературных данных установлено, что зависимость между количеством воды, необходимой для получения раствора тампонажной консистенции, и сухими компонентами смеси может быть выражена следующими уравнениями:

$$Q_b = Q_c K_c + Q_d K_d; \quad (3)$$

$$m_b = K_c + m_d K_d, \quad (4)$$

где K_c — водопотребность цемента, или такое количество воды, которое связывается с единицей веса цемента для приготовления чистого портландцементного раствора заданной консистенции; K_d — водопотребность добавки, или такое количество воды, которое связывается с единицей веса добавки для приготовления облегченного цементного раствора заданной консистенции.

Зависимости (3) и (4) позволяют привести уравнения (1) и (2) к следующему виду:

$$\gamma = \frac{Q_c(1 + K_c) + Q_d(1 + K_d)}{Q_c \left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{K_c}{\gamma_b} \right) + Q_d \left(\frac{1}{\gamma_d} + \frac{K_d}{\gamma_b} \right)}; \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{(1 + K_c) + m_d(1 + K_d)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{K_c}{\gamma_b} \right) + m_d \left(\frac{1}{\gamma_d} + \frac{K_d}{\gamma_b} \right)}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что если $K_c, K_d, \gamma_c, \gamma_d, \gamma_b$ — постоянные величины, то значение γ зависит только от m_d . Уравнение (6) есть не что иное, как уравнение равносторонней гиперболы вида

$$y = \frac{a + bx}{c + dx},$$

где

$$a = (1 + K_{\text{ц}}); \quad b = (1 + K_{\text{д}}); \quad c = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right); \quad d = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right);$$

$$x = m_{\text{д}}.$$

При $m_{\text{д}} = 0$ $\gamma = \gamma_{\text{цр}}$, где $\gamma_{\text{цр}}$ — удельный вес чистого цементного раствора при $B : Ц = K_{\text{ц}}$.

Поскольку известно, что скорость изменения функции характеризуется величиной первой производной, применим это положение к рассмотренному случаю. Продифференцировав уравнение (6) относительно $m_{\text{д}}$, получим:

$$\frac{d\gamma}{dm} = \frac{(1 + K_{\text{д}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) - (1 + K_{\text{ц}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right)}{\left[\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) + m_{\text{д}} \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что облегчение тампонажного раствора отмечается, когда $\frac{d\gamma}{dm} < 0$, что возможно, если

$$(1 + K_{\text{д}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) < (1 + K_{\text{ц}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) \quad (8)$$

или когда $\gamma_{\text{ор}} < \gamma_{\text{цр}}$,
где

$$\gamma_{\text{ор}} = \frac{1 + K_{\text{д}}}{\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}} \text{ — удельный вес облегчающего раствора.}$$

Решая неравенство (8) относительно $K_{\text{д}}$, получаем минимальное значение водопотребности, при котором вводимая в раствор добавка может быть признана облегчителем:

$$K_{\text{д}} > \frac{(\gamma_{\text{д}} - \gamma_{\text{цр}}) \gamma_{\text{в}}}{(\gamma_{\text{цр}} - \gamma_{\text{в}}) \gamma_{\text{д}}} \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что при $\gamma_{\text{д}} < \gamma_{\text{цр}}$ водопотребность добавки $K_{\text{д}}$ может приобретать отрицательные значения. Знак минус перед $K_{\text{д}}$ указывает на возможность снижения $\gamma_{\text{цр}}$ даже при уменьшении на-

а в пересчете на единицу веса цемента

$$\gamma = \frac{1 + m_d + m_b}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{m_d}{\gamma_d} + \frac{m_b}{\gamma_b}}, \quad (2)$$

где Q_c, Q_d, Q_b — весовое количество цемента, добавки и воды в исходном растворе в т; m_d, m_b — количество добавки и воды, приходящееся на единицу веса цемента, в $\text{м}^3/\text{т}$; $\gamma_c, \gamma_d, \gamma_b$ — удельный вес цемента, добавки и воды в $\text{т}/\text{м}^3$.

На основании анализа экспериментальных и литературных данных установлено, что зависимость между количеством воды, необходимой для получения раствора тампонажной консистенции, и сухими компонентами смеси может быть выражена следующими уравнениями:

$$Q_b = Q_c K_c + Q_d K_d; \quad (3)$$

$$m_b = K_c + m_d K_d, \quad (4)$$

где K_c — водопотребность цемента, или такое количество воды, которое связывается с единицей веса цемента для приготовления чистого портландцементного раствора заданной консистенции; K_d — водопотребность добавки, или такое количество воды, которое связывается с единицей веса добавки для приготовления облегченного цементного раствора заданной консистенции.

Зависимости (3) и (4) позволяют привести уравнения (1) и (2) к следующему виду:

$$\gamma = \frac{Q_c(1 + K_c) + Q_d(1 + K_d)}{Q_c \left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{K_c}{\gamma_b} \right) + Q_d \left(\frac{1}{\gamma_d} + \frac{K_d}{\gamma_b} \right)}; \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{(1 + K_c) + m_d(1 + K_d)}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \frac{K_c}{\gamma_b} \right) + m_d \left(\frac{1}{\gamma_d} + \frac{K_d}{\gamma_b} \right)}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) следует, что если $K_c, K_d, \gamma_c, \gamma_d, \gamma_b$ — постоянные величины, то значение γ зависит только от m_d . Уравнение (6) есть не что иное, как уравнение равносторонней гиперболы вида

$$y = \frac{a + bx}{c + dx},$$

где

$$a = (1 + K_{\text{ц}}); \quad b = (1 + K_{\text{д}});$$

$$c = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right); \quad d = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right);$$

$$x = m_{\text{д}}.$$

При $m_{\text{д}} = 0$ $\gamma = \gamma_{\text{цр}}$, где $\gamma_{\text{цр}}$ — удельный вес чистого цементного раствора при $\text{В}:\text{Ц} = K_{\text{ц}}$.

Поскольку известно, что скорость изменения функции характеризуется величиной первой производной, применим это положение к рассмотренному случаю. Продифференцировав уравнение (6) относительно $m_{\text{д}}$, получим:

$$\frac{d\gamma}{dm} = \frac{(1 + K_{\text{д}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) - (1 + K_{\text{ц}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right)}{\left[\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) + m_{\text{д}} \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) \right]^2} \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что облегчение тампонажного раствора отмечается, когда $\frac{d\gamma}{dm} < 0$, что возможно, если

$$(1 + K_{\text{д}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) < (1 + K_{\text{ц}}) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) \quad (8)$$

или когда $\gamma_{\text{ор}} < \gamma_{\text{цр}}$,
где

$$\gamma_{\text{ор}} = \frac{1 + K_{\text{д}}}{\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}} \text{ — удельный вес облегчающего раствора.}$$

Решая неравенство (8) относительно $K_{\text{д}}$, получаем минимальное значение водопотребности, при котором вводимая в раствор добавка может быть признана облегчителем:

$$K_{\text{д}} > \frac{(\gamma_{\text{д}} - \gamma_{\text{цр}}) \gamma_{\text{в}}}{(\gamma_{\text{цр}} - \gamma_{\text{в}}) \gamma_{\text{д}}} \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что при $\gamma_{\text{д}} < \gamma_{\text{цр}}$ водопотребность добавки $K_{\text{д}}$ может приобретать отрицательные значения. Знак минус перед $K_{\text{д}}$ указывает на возможность снижения $\gamma_{\text{цр}}$ даже при уменьшении на-

чального значения водо-цементного отношения. Практически это возможно при одновременном введении в раствор материала с малым удельным весом и пластификатора. В частном случае таким материалом может быть воздух, а пластификатором — ССБ.

Для оценки облегчающей способности добавок рекомендуем пользоваться выражением (7) при $m_d \rightarrow 0$. В геометрическом отношении эта характеристика представляет собой тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной к кривой $\gamma = f(m_d)$ при $m_d \rightarrow 0$.

Абсолютное значение снижения $\gamma_{ц.р}$ определяется соотношением

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_{ц.р} - \gamma_{ор}}{1 + \frac{\frac{1}{\gamma_{ц}} + \frac{K_d}{\gamma_{в}}}{m_d \left(\frac{1}{\gamma_d} + \frac{K_d}{\gamma_{в}} \right)}} \quad (10)$$

Исходные материалы

При разработке рецептуры облегченных цемента в качестве исходного вяжущего должны использоваться портландцементы для «холодных» и «горячих» скважин, отвечающие требованиям ГОСТ 1581—63 на тампонажные цементы. Кроме того, в качестве вяжущего материала могут быть использованы шлаковые цементы, пуццолановые портландцементы и др.

Поскольку основным показателем облегчающей способности добавок является их водопотребность, при изыскании новых эффективных облегчителей особое внимание обращалось на материалы, имеющие высокую водоудерживающую способность, удельную поверхность и пористость.

В настоящей работе в качестве облегчающих добавок использовались следующие материалы.

Перлит представляет собой горную породу, состоящую из вулканического стекла с включениями отдельных кристаллов плагиоклаза, слюды и др. Перлитовая порода кажется состоящей из сцементированных чешуйчатых и луковичеподобных зерен, шариков. В процессе выветривания или раскалывания перлит распа-

дается на отдельные шарики с перламутровой поверхностью, напоминающей жемчуг.

Вспученный перлитовый песок (ВПП) получают путем быстрого нагревания при температуре 1000—1200°С раздробленной перлитовой породы. В зависимости от исходной породы и технологических особенностей производства объемный вес вспученного перлитового песка и щебня может колебаться от 50 до 600 кг/м³.

Механизм вспучивания перлитовых пород связан с наличием в перлите 6—8% цеолитовой воды, которая при определенной температуре выделяется, увеличивается в объеме и образует вспученную ячеистую массу.

В Советском Союзе разведаны большие запасы перлитовых пород в Украинской, Азербайджанской, Армянской ССР и РСФСР. В настоящее время производство вспученного перлитового песка налажено во многих районах страны.

Вспученный перлит должен отвечать требованиям ГОСТ 10832—64. Согласно этому ГОСТ в зависимости от размера зерен вспученный перлит делится на следующие фракции:

песок мелкий	до 1,2 мм
песок крупный	1,2—5,0 »
щебень мелкий	5—10 »
щебень крупный	10—20 »

Перлитовый песок в зависимости от объемного веса разделяется на четыре марки: 100, 150, 200, 250. Индекс марки означает, что объемный вес перлитового песка не превышает 100 кг/м³ и т. д.

Влажность вспученного перлитового песка согласно ГОСТ 10832—64 не должна превышать 2%. Вспученный перлитовый песок широко применяется в строительной практике как мелкий легкий заполнитель в растворах и бетонах, а также как теплоизоляционный материал.

Физико-механическая характеристика двух проб ВПП приведена в табл. 1, а химический состав перлита дан в табл. 2.

Обожженный диатомовый песок (ОДП) представляет собой искусственный материал, получаемый путем термической обработки при температуре 700—800°С отформованной диатомито-опилочной смеси. Из отбракованных изделий и боя путем их измельчения

Таблица 1

Физико-механическая характеристика облегчающих добавок

Добавка	Удельный вес, г/см^3	Объемный вес, т/м^3	Удельная поверхность по ПСХ-2, $\text{см}^2/\text{г}$	Гранулометрический состав в % вес. при размере зерен, мм				
				>1,0	1,0—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	<0,1
Асбозурит	2,3	0,38 0,40	8 000 —	18,8 22,1	43,2 12,7	20,0 10,7	10,0 12,9	8,0 41,6
ВПП	2,3	0,15—0,17 0,09—0,10	— —	22,0 28,0	29,2 26,0	23,5 20,0	16,6 18,6	8,7 7,4
Глинопорошок горбский	2,5	—	4 700	—	0,08	0,14	5,6	94,1
Глинопорошок махарадзевский	2,5	—	3 600	—	0,5	5,2	17,5	76,8
Глинопорошок часовъярский	2,6	— —	3 200 8 500	4,8 —	8,1 —	17,2 0,8	37,6 9,7	32,3 89,5
Диатомит	2,2	—	17 500	—	0,1	0,4	20,0	79,5
ОДП	2,2	0,38 0,43	— 4 500	1,7 13,6	33,9 23,6	25,8 22,9	32,0 19,0	6,6 20,9
Трепел	2,3	—	20 900	—	0,7	3,0	11,6	84,7

Таблица 2

Химический состав облегчающих добавок

Добавка	Химический состав, %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	TiO_2	SO_3	п.п.п.
Асбест	40,0	3,0	3,0	0,5	40,0	—	—	—	13,5
Глинопорошок горбский	50,0—57,0	22,0—26,5	3,5—6,5	0,8—2,0	0,9—3,5	0,3—1,5	0,2—0,4	—	—
Глинопорошок махарадзевский	59,0—63,0	18,0—24,0	1,7—4,5	2,9—4,3	1,3—4,5	0,7—7,2	0,3—0,4	0,2	8,5
Глинопорошок часовъярский	55,9	23,8	3,9	0,9	1,1	0,2	1,0	0,14	8,8
Диатомит	72,3	4,8	2,2	0,4	0,4	—	—	—	19,9
Перлит	70,0—73,0	12,0—15,0	0,6—2,5	Следы	Следы	5,4—8,8	0,5	—	2,5—6,8
Трепел	76,7	7,7	2,8	3,9	1,0	—	—	0,7	7,5

готовится так называемая диатомовая крошка или крошка-шамот. Отходы, получаемые при производстве диатомовой крошки, и есть обожженный диатомовый песок. Удельный вес ОДП равен $2,2 \text{ Г/см}^3$, а объемный вес при влажности до 5% находится в пределах 300—400 кг/м^3 .

Обожженный диатомовый песок в отличие от молодого диатомита не гигроскопичен. Несмотря на зернистый характер материала, удельная поверхность ОДП, определяемая на приборе ПСХ-2, достаточно высокая (4000—5000 $\text{см}^2/\text{г}$). Это объясняется тем фактом, что значительная часть ОДП состоит из тонкодисперсных частиц, что видно из ситового анализа (см. табл. 1).

Асбозурит состоит из смеси 70—85% вес. молодого диатомита и 15—30% вес. асбестовой мелочи. По внешнему виду это порошкообразное вещество с примесью волокон асбеста; применяется как теплоизоляционный материал.

Качество асбозурита зависит от качества и количества диатомита в смеси, а также от сортности добавляемого асбеста и степени его распушки. Чем больше распушен асбест, тем меньше его объемный вес и больше водопотребность. В зависимости от объемного веса асбозурита ему присваивается и соответствующая марка: численное значение ее отвечает величине веса 1 м^3 асбозурита в килограммах. Существуют четыре марки асбозурита. Объемный вес асбозурита находится в пределах 450—700 кг/м^3 .

Асбозурит, как и диатомит, гигроскопичен и при увеличении влажности воздуха способен повышать свою влажность, что в значительной мере отражается на объемном весе. При увеличении влажности от 5 до 25% объемный вес асбозурита может изменяться от 450 до 700 кг/м^3 .

Согласно действующим условиям асбозурит не должен содержать частиц диатомита размером более 10 мм , а содержание частиц размером более 5 мм не должно превышать 3% веса. Влажность асбозурита, применяемого для строительных целей, не регламентируется.

Удельный вес асбозурита зависит от плотности исходных материалов и составляет в среднем $2,2—2,3 \text{ Г/см}^3$. Гранулометрический состав двух проб асбозурита при-

веден в табл. 1. На ситах с отверстиями 0,5 и 1,0 мм задерживается почти весь находящийся в асбозурите асбест. Асбозурит выпускается на Инзенском диатомовом комбинате.

Диатомит является природной гидравлической добавкой, способствующей повышению стойкости вяжущих веществ в пресных и сульфатных водах. Гидравлические или минеральные добавки содержат кремнезем в аморфном состоянии, который, будучи очень активным по отношению к извести, связывает ее в нерастворимые в воде соединения и тем самым придает ей способность твердеть в воде.

Диатомит — легкая горная порода, в сухом состоянии светло-серого, слегка желтоватого или белого цвета. Он состоит из кремневых панцирей диатомовых водорослей (диатомей) — остатков простейших одноклеточных организмов. Эти микроскопические кремневые панцири размером 0,02—0,03 мк обуславливают в диатомите сильно развитую удельную поверхность, а следовательно, и его ценные свойства как облегчителя — большую пористость, легкость и высокую водопотребность. В зависимости от степени уплотнения объемный вес диатомита составляет 300—1000 кг/м³. Пористость диатомита хороших сортов составляет 90—92%. Объемный вес диатомита в порошке находится в пределах 220—660 кг/м³ и зависит от качества диатомита, тонкости его помола и влажности. Диатомит является очень гигроскопичным материалом.

Ценным свойством диатомитов является их высокая гидравлическая активность по связыванию свободной извести (150—400 мг СаО на 1 г добавки). Удельный вес наиболее чистого диатомита составляет 2,03—2,2 г/см³. Высокая пористость и низкий объемный вес диатомита в порошке определяют его высокую удельную поверхность, которая при небольшой длительности помола (5—10 мин) на лабораторной мельнице (МЛ-10) может быть в пределах 20 000—25 000 см²/г. Гранулометрический состав одной из проб диатомита приведен в табл. 1, а химический состав — в табл. 2.

Трепел — горная порода осадочного происхождения, в сухом виде желтоватого, светло-серого или почти белого цвета. В отличие от диатомита трепел состоит из микроскопических округлых зерен кремнезема. В трепеле

содержится небольшое количество глинистых частиц, зерен кварца, слюды, полевого шпата и глауконита. Удельный вес трепела различных месторождений колеблется в пределах 2,0—2,5 г/см^3 . Высокая пористость трепела обуславливает его сравнительно невысокий объемный вес: 500—1200 кг/м^3 .

Химический состав трепела не постоянен и содержит 70—90% кремнезема, 3—12% глинозема, до 6% окиси железа и до 2,5% окиси магния. Трепел, как и диатомит, является высокоактивной гидравлической добавкой. Так, например, трепел Брянского месторождения имеет активность по поглощению извести 400—470 мг на 1 г CaO .

Брянский цементный завод на базе местных трепелов изготавливает тонкомолотый трепел — трепельную муку, которая имеет очень высокую удельную поверхность — 15 000—23 000 $\text{см}^2/\text{г}$, что обуславливает ее высокую водопотребность. Гранулометрический состав трепельной муки приведен в табл. 1. Химический состав трепела брянских карьеров дан в табл. 2.

Глино порошки. В нефтепромысловой практике Советского Союза наиболее широко применяются глиноцементные растворы, приготовляемые с использованием глины различных месторождений. Удельный вес глинопорошков колеблется от 2,1 до 2,65 г/см^3 . Тонкость помола глинопорошков и их удельная поверхность зависят как от природных особенностей, так и от условий приготовления. В наших опытах использовались глинопорошки Горбского, Махарадзевского и Черкасского месторождений. Их физико-механическая характеристика и химический состав приведены в табл. 1 и 2.

Все рассмотренные облепители являются сортаментом соответствующих предприятий и выпускаются ими в больших объемах. Кроме этих материалов в качестве облепителей добавок могут быть использованы опока, пемза, зола-унос, мел, асбест и др.

Анализ методов подбора оптимального водосодержания тампонажных растворов

Для обеспечения хорошей прокачиваемости цементный раствор должен содержать такое количество воды, которое позволило бы ему необходимое время оставаться

подвижным в скважине и в то же время исключало возможность гравитационного расслоения в затрубном пространстве после окончания продавливания. Из эмпирических зависимостей (3) или (4) следует, что количество воды затворения для конкретной тампонажной смеси можно рассчитать, если известна водопотребность исходных компонентов.

В работе условно принято, что под водопотребностью вообще понимается не какая-то конкретная величина, а интервал значений (от минимального до максимального), при которых расчетное количество воды затворения для той или иной смеси будет обеспечивать получение цементного раствора, пригодного (по консистенции) для цементирования скважин. Из этого условия следует, что водопотребность тампонажных составляющих — величина переменная, зависящая не только от физико-механических параметров цемента и облегчающих материалов, но и от того, какие требования предъявляются к консистенции цементного раствора.

Основными критериями при подборе необходимого количества воды для той или иной тампонажной смеси являются прокачиваемость и стабильность цементного раствора. При этом прокачиваемостью оценивается минимально необходимое количество воды, а стабильностью — максимальное допустимое ее содержание. Пригодность тампонажного раствора с точки зрения его прокачиваемости оценивается растекаемостью по конусу АзНИИ, кажущейся вязкостью, временем начала загустевания и др. ✓

Наиболее полную оценку подвижности раствора дает измерение его вязкостной характеристики, проводимое в консисометрах [7, 12]. Однако отсутствие таких приборов на промыслах вынуждает оценивать пригодность раствора по консистенции растекаемостью по конусу АзНИИ. Простота прибора и эксперимента, достаточная степень воспроизводимости опытных данных при использовании обычных тампонажных цементов послужили основанием для подбора воды затворения под определенное значение растекаемости. Согласно ГОСТ 1581—63 цементное тесто должно обладать растекаемостью не менее 18 см. Верхний предел растекаемости ГОСТ 1581—63 не регламентируется, но при подборе водоцементного отношения для различных многокомпонент-

ных смесей некоторыми авторами предпочтение отдается растворам с растекаемостью по конусу АзНИИ в пределах 18 см. А. И. Булатов [7] считает, что только при цементировании глубоких скважин с малыми зазорами растекаемость тампонажных растворов следует повышать до 22 см. В то же время практика цементирования скважин с использованием растворов нормального удельного веса ($1,8-1,9 \text{ г/см}^3$) отмечает немало случаев, когда закачиваемый в скважины раствор имеет растекаемость 22—25 см.

При испытании новых видов тампонажных растворов ряд авторов рекомендует независимо от специфики их применения подбирать водо-цементное отношение под растекаемость 25—26 см.

В США принято считать, что начальная консистенция тампонажного раствора, замеряемая с помощью консистометра, должна иметь условную вязкость $5-30 \text{ нз}$, а распыл раствора объемом 120 см^3 — не менее 19 см. Данная методика подбора водо-цементного отношения для той или иной тампонажной смеси позволяет определять минимальное и максимальное количество воды затворения. Установление максимально допустимого количества воды для конкретной тампонажной смеси особенно важно при разработке рецептуры цементных растворов пониженной плотности. Объясняется это следующим. Снижение удельного веса цементного раствора происходит не только за счет того, что вводимая в раствор добавка имеет удельный вес ниже, чем тампонажный цемент, сколько в основном в связи с тем, что водопотребность этой добавки в $2-10$ раз выше, чем цемента. Это обстоятельство и позволяет при небольшом содержании облегчителя в тампонажной смеси резко повысить отношение объема жидкой фазы раствора к объему его твердой фазы (в $1,5-2$ раза по сравнению с обычными портландцементными растворами). Таким образом, т. е. увеличением водной составляющей тампонажной суспензии, чаще всего и достигается снижение плотности раствора.

Большинство облегчающих материалов имеет удельный вес $2,2-2,7 \text{ г/см}^3$, что значительно превышает удельный вес не только облегченных, но и чистых цементных растворов. В связи с этим при разработке рецептуры тампонажных растворов пониженной плот-

ности желательно знать, при какой минимальной величине добавки можно получить раствор заданного удельного веса. Чем меньше в смеси будет содержаться облегчающего материала с удельным весом более $2,0 \text{ г/см}^3$, тем меньше понадобится воды для получения раствора заданной плотности. И, наоборот, чем больше будет введено в смесь облегчителя на единицу веса цемента, тем больше потребуется воды для снижения удельного веса раствора. Для наглядности поясним это положение следующим примером. Цементный раствор удельного веса $1,55 \text{ г/см}^3$ может быть получен смешиванием тампонажного цемента с различным количеством глины. При этом содержание воды в растворе будет связано с добавкой глины. Из табл. 3 видно, что чем

Таблица 3

Влияние водопотребности глины на состав раствора

Состав раствора, % вес			Водопотребность глины, $\text{см}^3/\text{г}$	Растекаемость, см		Удельный вес, г/см^3	Отношение объема жидкой фазы раство- ра к его твердой фазе	Отношение объема твердой фазы к пол- ному объему рас- твора
цемент	глина	вода		начальная	после дополни- тельного перемешива- ния 10 мин			
100	—	50	—	$>26,0$	26,0	1,85	1,56	0,39
100	42	123	2,0	19,0	13,0	1,55	2,56	0,28
100	23	109	3,0	24,5	19,5	1,55	2,67	0,28
100	16	104	4,0	$>26,0$	23,5	1,55	2,72	0,27
100	12	100	5,0	$>26,0$	26,0	1,55	2,73	0,27

больше вводится в смесь глины, тем выше будет водоцементное отношение для получения раствора удельного веса $1,55 \text{ г/см}^3$. В то же время такие характеристики раствора, как отношение объема жидкой фазы к объему твердой и отношение объема твердой фазы к полному объему раствора, изменяются в узких пределах.

Данный пример иллюстрирует изменение состава облегченного цементного раствора в зависимости от методики подбора водо-цементного отношения. В случае, когда смесь состояла из 42 частей глины и 100 частей цемента, вода подбиралась из расчета получения раствора с растекаемостью 19 см. Смесь, содержащая 12%

глины от веса цемента, затворялась на таком количестве воды, которое считалось предельным с точки зрения получения стабильного раствора.

Раствор, приготовленный с добавкой 12% глины от веса цемента, имеет наиболее благоприятные физико-механические характеристики, чем раствор такого же удельного веса, но содержащий 42% глины. Это объясняется тем, что в первом случае в единице объема раствора вяжущего материала (цемента) содержится больше, чем во втором.

Из этого примера можно сделать следующий вывод. В случае, если облегчителем является такой тонкодисперсный высоководопотребный и слабоактивный в гидравлическом отношении материал, как глина, то при определении состава тампонажного раствора конкретной плотности необходимо стремиться к минимально допустимому содержанию облегчителя при максимально допустимом количестве воды для данной глино-цементной смеси.

В качестве критерия для оценки предельного значения водо-цементного отношения может быть использован такой параметр суспензии, как водоотстой, или водоотделение.

Водоотстой, или водоотделение, тампонажного раствора характеризуется отношением объема жидкости, отделившейся из раствора после 2—3 ч покоя, к первоначальному объему раствора. По мнению американских исследователей, цементный раствор, выдерживаемый в цилиндрах в течение 3 ч, не должен отделять более 1% воды от объема раствора. Практически стандартные тампонажные цементы при $В : Ц = 0,5$ имеют водоотстой 0—5%. Однако это не означает, что к концу продавливания растворы с водоотстоем 5% будут расслаиваться, образуя водные прослойки и «карманы». Объясняется это тем, что в процессе движения раствора по трубам и затрубному пространству цемент интенсивно гидратируется, уменьшается количество свободной воды в нем, а значит, и снижается его водоотделительная способность.

При подборе максимального водо-цементного отношения для конкретной тампонажной смеси по критическому значению водоотстоя растекаемость цементных растворов может находиться в пределах 18—26 см и

более. В связи с этим необходимо было выяснить, при каких значениях водоотстоя или растекаемости по конусу АзНИИ растворы, приготавливаемые с использованием различных цементов и облегчителей, следует считать пригодными для цементирования скважин, а при каких — не пригодными.

В результате опытных работ установлено, что для замера водоотстоя длительность нахождения раствора в покое может быть ограничена 2 ч (табл. 4). Как видно из табл. 4, дополнительное перемешивание раствора в механической лопастной мешалке в течение 10 мин ($n = 900$ об/мин) оказывает заметное влияние на водоотстой. Это позволило сделать вывод, что водоотделение зависит не только от состава раствора, но и от условий его приготовления.

Были приведены опыты по затворению растворов одинаковых составов тремя различными способами. Первый способ (I) — методика ГОСТ 1581—63. Второй способ (II) — методика ГОСТ 1581—63 плюс дополнительное 10-минутное перемешивание в мешалке при $n = 900$ об/мин.

Третий способ (III) — методика кода АНИ. Приготовление цементного раствора в лабораторных условиях по коду АНИ существенно отличается от методики по ГОСТ 1581—63. Согласно методу испытания тампонажного шлама, рекомендуемому Американским нефтяным институтом (API RP 10B), раствор приготавливается в специальном смесительном устройстве, которое представляет собой двухскоростную механическую мешалку пропеллерного типа [29]. Смешивание цементной смеси с водой, залитой в смесительное устройство, происходит путем засыпки тампонажной смеси в смеситель в течение 5 сек при вращении лопастей со скоростью 4000 об/мин. Перемешивание осуществляется при $n = 10\,000$ об/мин в течение 35 сек.

Наши исследования показали, что водоотстой тем меньше, чем интенсивнее перемешан раствор (табл. 5). Наиболее отчетливо это прослеживается на растворах, содержащих глинопорошок (1,2 и 12%).

Сопоставляя значения водоотстоя растворов одинакового состава, но затворяемых различными способами, нетрудно прийти к выводу, что максимально допустимое значение водоотстоя не может быть однозначно у рас-

Влияние длительности нахождения раствора в покое на величину водоотстоя

Состав раствора			В:Ц	Растекаемость, см	Водоотстой, %							
цемент	облегчитель				растворов, приготовленных по ГОСТ 1581—63 через, ч				растворов, приготовленных по ГОСТ 1581—63 с последующим перемешиванием 10 мин в мешалке при n=900 об/мин через, ч			
	наименование	добавка к цементу, % вес.			1	2	3	4	1	2	3	4
ЦГС	—	—	0,50	25,0	1,0	1,0	1,0	1,0	4,5	7,0	7,0	—
»	Глинопоршок	20	0,90	22,0	0,5	0,5	0,5	—	0	0	0	0
»	«	20	1,10	26,0	2,7	3,8	3,8	—	0,5	1,0	1,0	—
»	«	20	1,30	>26,0	7,4	10,0	10,0	—	1,9	2,7	2,7	—
»	ОДП	50	1,25	20,0	1,5	2,0	2,0	—	2,6	3,2	3,2	—
»	Диатомит	20	0,80	26,0	1,3	2,0	2,0	—	0,5	0,5	0,5	—
»	«	40	1,05	20,5	1,0	1,0	1,0	—	0,5	0,5	0,5	0,5
»	«	40	1,25	25,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
»	«	40	1,45	>26,0	2,6	3,0	3,0	3,0	1,5	2,0	2,0	2,0
»	Асбозурит	40	1,00	25,0	2,2	2,7	2,7	—	0	0	0	—
ППЦ-М-400	—	—	0,80	21,0	0	0	0	0	0	0	0	0
То же	—	—	0,90	25,0	2,0	2,6	2,6	—	3,0	3,5	3,5	—

Таблица 5

Влияние условий приготовления раствора на величину водоотстоя

Способ приготовления раствора	Состав раствора		В : Ц	Растекаемость, см	Водоотстой, %
	цемент	добавка гл-нопорышка к цементу, % вес.			
I (ГОСТ 1581—63) . . .	ЦГС	—	0,50	18,0	0,5
II	»	—	0,50	21,0	2,0
I (ГОСТ 1581—63) . . .	»	20	1,50	>26,0	12,0
II	»	20	1,50	>26,0	4,5
III (код АНИ)	»	20	1,50	>26,0	1,2
I (ГОСТ 1581—63) . . .	ПЩ-м400	—	0,84	23,0	3,0
II	»	—	0,84	22,5	2,1
III (код АНИ)	»	—	0,84	21,0	0,8
I (ГОСТ 1581—63) . . .	»	—	0,95	25,0	4,5
II	»	—	0,95	24,0	3,0
III (код АНИ)	»	—	0,95	22,0	1,0

творов, приготавливаемых различными способами. Так, если, по мнению американских исследователей, водоотстой тампонажных растворов должен быть не более 1%, то это не означает, что предельное значение водоотстоя для растворов, затворяемых по ГОСТ 1581—63, должно быть также не более 1%.

Данные, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о том, что водоотстой у растворов, приготавливаемых по методике ГОСТ 1581—63, может быть выше требований американских исследователей, так как после дальнейшего перемешивания он существенно уменьшается. С целью установления критического водоотстоя для различных видов облегченных тампонажных растворов нами были проведены опыты по изменению водоотстоя при длительном перемешивании растворов в условиях, приближенных к скважинным. Эти работы проводились на консистометре конструкции авторов. Результаты исследований сведены в табл. 6.

Как видно из табл. 6, растворы, приготавливаемые по методике ГОСТ 1581—63 и содержащие в своем составе тонкодисперсные и волокнистые материалы, могут иметь начальный водоотстой в пределах 5%. При

Таблица 6

Влияние длительного перемешивания на водоотстой растворов

№ п/п	Состав раствора			В : Ц	Растекаемость, см	Водоотстой, "	
	цемент	облегчитель				раствора после затворения по ГОСТ 1581—63	раствора после длительного перемешивания
		наименование	добавка к цементу, % вес.				
1	ЦГС	—	—	0,50	21,0	3,0	0
2	»	Глина	10,8	0,88	28,0	5,0	0
3	»	»	16,0	1,04	27,0	4,3	0
4	»	»	29,2	1,13	17,0	0	0
5	»	Трепел	27,1	1,08	24,0	4,5	0,1
6	»	»	57,0	1,25	18,0	0,5	0
7	ППЦ-М400	—	—	0,84	20,0	2,1	0
8	То же	—	—	0,95	28,0	4,0	0,1
9	ЦГС	Асбозурит	19,6	1,03	23,5	5,2	0
10	»	Асбест	10,0	1,00	17,0	2,5	—
11	»	ОДП	20,0	0,70	18,0	0,8	0
12	»	»	40,0	1,00	20,0	1,5	—
13	»	»	40,0	1,20	25,0	6,0	2,0
14	»	ВПП	10,0	0,80	17,0	0,5	—
15	»	»	10,0	0,85	22,5	3,0	0,5
16	»	»	20,0	1,20	24,0	4,5	1,5

Примечания. 1. Растворы, содержащие перлит, предварительно обрабатывались давлением 100 кг/см². 2. Перемешивание раствора осуществлялось в консистометре в течение 30—60 мин при температуре 75°C и $n = 100$ об/мин.

использовании зернистых материалов водоотстой не должен быть более 3%. Принятые в работе в качестве критических значения водоотстоя 5 и 3%, по-видимому, имеют достаточный коэффициент запаса с точки зрения стабильности раствора, что подтверждается практикой цементирования скважин обычными портландцементными, а также шлаковыми и особенно шлако-песчаными растворами. Последние характеризуются высоким водоотстоем, но с успехом используются при цементировании скважин [7]. Нефтяники Румынии считают тампонажный раствор пригодным для цементирования скважин, если его водоотстой не превышает 5%.

Данные, приведенные в табл. 6, позволяют установить некоторую зависимость между водоотстоем и растекаемостью облегченных цементных растворов. Необходимость такой зависимости очевидна, так как в про-

мысловых условиях подбор воды затворения производится под определенное значение растекаемости.

В том случае, когда облегчающей добавкой является тонкодисперсный материал или асбозурит, тампонажный раствор, отстаивающий за 2 ч покоя до 5% воды, имеет растекаемость по конусу АзНИИ 25—28 см. Растворы, приготовленные с использованием зернистых облегчителей (табл. 6, строки 11—16), при растекаемости более 22 см отделяют воду даже после длительного перемешивания в конспистометре.

Таким образом, на основании рассмотренных выше положений требования, предъявляемые к консистенции тампонажных растворов пониженной плотности, могут быть сформулированы так:

1. Растворы, получаемые на базе тампонажного, портландцемента и таких материалов, как глина, бентонит, диатомит, трепел, асбозурит и др., считаются пригодными для цементирования скважин, если начальный водоотстой у них не превышает 5%, а растекаемость по конусу АзНИИ находится в пределах 18—28 см.

2. При использовании зернистых облегчителей (ОДП, ВПП, водоотстой облегченных тампонажных растворов не должен превышать 3%, а растекаемость по конусу АзНИИ должна быть в пределах 20 ± 2 см.

3. Подбор воды затворения для тонкодисперсных тампонажных смесей можно производить из расчета получения раствора с начальной растекаемостью по конусу АзНИИ 25—28 см.

Влияние перемешивания на некоторые свойства цементных растворов

Многочисленными исследованиями установлено, что перемешивание оказывает существенное влияние на свойства цементных растворов. Воздействие перемешивания на физико-механические характеристики растворов и цементных камней подробно изучено академиком П. А. Ребиндером и его школой. В процессе закачивания и продавливания тампонажных растворов в скважину они подвергаются воздействию не только высокой температуры и давления, но и интенсивного перемешивания. Вследствие этого начальная гидратация цементных частиц, гидратация и диспергирование облегчителя за-

метно ускоряются, что приводит в ряде случаев к преждевременному загустеванию тампонажных растворов, повышению давления во время продавливания и даже к оставлению цементного раствора в колонне [7].

Для изучения влияния перемешивания различной интенсивности и длительности на физико-механические характеристики облегченных тампонажных растворов нами использовалась специальная механическая лопастная мешалка. Раствор в мешалке перемешивался двумя трехкрыльчатыми лопастями, закрепленными на едином валу, который через втулку соединялся с валом электродвигателя. Диаметр лопастей, расположенных на расстоянии 70 мм друг от друга, равнялся 55 мм.

Методика работы по перемешиванию тампонажных растворов очень проста. Предварительно подготовленный согласно требованиям ГОСТ 1581—63 тампонажный раствор заливается в фарфоровый цилиндрический стакан диаметром 65—75 мм с таким расчетом, чтобы нижняя лопасть мешалки отстояла от дна стакана на 5—10 мм, а уровень раствора находился выше верхней лопасти на 10—20 мм. Скорость перемешивания раствора регулировалась латром и регистрировалась тахометром. Включение прибора в сеть осуществлялось через стабилизатор.

О влиянии перемешивания на свойства тампонажных растворов можно судить по изменению таких его параметров, как растекаемость, удельный вес, водоотстой, сроки схватывания, механическая прочность и др. Получение данных и их сравнение производились на растворах одного замеса.

Интенсивность перемешивания раствора в условиях лабораторного эксперимента должна имитировать то перемешивание, которое происходит при движении раствора в скважине. Существует мнение, что данное подобие можно соблюсти, основываясь на двух критериях. Так, одни исследователи выбор интенсивности перемешивания раствора осуществляют по количеству работы, затрачиваемой на перемешивание единицы объема раствора в скважине. При этом они учитывают диаметр скважины, обсадных труб, а также скорости восходящего потока. Работами советских ученых показано, что выбор интенсивности перемешивания следует осуществлять путем определения градиента скоростей пере-

мещения раствора в скважине, а моделирование на приборах и установках производить из расчета равенства градиентов скорости.

В последние годы влияние перемешивания на свойства тампонажных растворов исследовалось во многих институтах. Авторы этих работ осуществляли перемешивание при различных скоростях. Так, А. И. Бережной перемешивал растворы в механической мешалке со скоростью 1800 об/мин, Р. Ш. Рахимкулов использовал скорость 400 и 950 об/мин, А. И. Леонидова и Е. М. Соловьев — 2800 об/мин, П. А. Ежов — 3000 об/мин.

В опытах, проведенных авторами, перемешивание осуществлялось со скоростью 200—900 об/мин. Длительность перемешивания, как правило, не превышала времени, необходимого на проведение цементировочных работ, и составляла не более 90 мин.

О характере изменения некоторых параметров тампонажных растворов в зависимости от скорости перемешивания можно судить по данным, приведенным в табл. 7 и 8. Из этих таблиц видно, что различие в усло-

Таблица 7

Влияние интенсивности перемешивания асбозурито-цементного раствора на его растекаемость

Начальная растекаемость, см	Интенсивность перемешивания, об/мин	Растекаемость (в см) при длительности перемешивания, мин						
		10	15	20	30	45	60	90
26,5	—	26,0	25,5	24,5	24,0	22,5	21,8	18,5
26,5	200	25,0	24,0	24,0	23,0	22,0	—	—
26,0	600	21,0	19,5	18,0	16,5	15,5	—	—
26,5	900	17,5	14,0	14,0	13,5	12,5	—	—

Примечание. Добавка асбозурита к цементу составляла 30% вес., В: Ц = 1,4.

виях перемешивания оказывает существенное влияние на растекаемость и водоотстой.

При исследовании различных видов облегчителей было установлено, что наиболее сильно перемешивание влияет на растекаемость асбозурито-цементных растворов. Для выяснения механизма действия асбозурита на

растекаемость растворов, обрабатываемых перемешиванием, были поставлены опыты, рассматриваемые в табл. 9.

Как видно из табл. 9, быстрое загустевание асбозурито-цементного раствора объясняется тем фактом, что в процессе перемешивания происходит, по-видимому, распушка асбестовых волокон, увеличивается их водоудерживающая способность и уменьшается количество свободной воды. Устранить раннее загустевание растворов, содержащих в своем составе асбест, можно путем подбора воды затворения под начальную растекаемость в пределах 22—26 см [11].

Для изучения влияния перемешивания в течение 10 мин при $n = 900$ об/мин на растекаемость, удельный вес и водоотстой облегченных цементных растворов были поставлены опыты, результаты которых приведены в табл. 10.

Как видно из табл. 10, перемешивание снижает растекаемость и водоотстой растворов, где облегчителем является тонкодисперсная или волокнистая добавка. Обычные цементные растворы, а также растворы с добавками ОДП и ВПП увеличивают растекаемость и водоотстой. Однако, как было показано ранее (см. табл. 6), при длительных перемешиваниях водоотделительная способность этих растворов заметно уменьшается. Повышение стабильности тампонажных растворов вследствие перемешивания объясняется увеличением степени дисперсности тампонажных материалов за счет разрушения крупных скоплений из частичек облегчающего материала. Увеличение растекаемости и водоотстоя растворов, состоящих из грубозернистых материалов (ОДП, ВПП) и тампонажного цемента, по-видимому, связано с тем, что часть цемента, адсорбируясь на зернах облегчителя, способствует увеличению содержания свободной воды в растворе.

Наряду с изменением растекаемости водоотстоя отмечено и незначительное увеличение удельного веса. Оно, по данным авторов, составляет 0,01—0,03 г/см³. Исследованиями А. И. Бережного и И. Н. Ахвердова установлено более высокое увеличение удельного веса (до 0,1 г/см³). Повышение удельного веса раствора, наблюдаемое после перемешивания, происходит, по-видимому, за счет удаления значительной части воздуха,

Таблица 10

Влияние перемешивания в течение 10 мин на растекаемость, удельный вес и водоотстой цементных растворов

Состав раствора			В:Ц	Растекаемость, см		Удельный вес, г/см ³		Водоотстой, %	
цемент	облегчитель			начальная	после перемешивания	начальный	после пере- мешивания	начальный	после пере- мешивания
	наименование	добавка к цементу, % вес.							
ЦГС	—	—	0,5	25,0	25,0	1,83	1,85	1,0	7,0
»	Асбозурит	20	1,0	25,0	18,0	1,58	1,61	2,7	0
»	Глинопопорошок горб- ский	20	0,8	25,0	23,0	1,69	1,72	4,9	2,1
»	Глинопопорошок ма- харадзежский . .	20	0,8	23,0	18,0	1,68	1,69	3,2	1,4
»	Глинопопорошок ча- совьярский . . .	20	1,1	27,0	20,5	1,54	1,56	3,8	1,0
»	Диазомит	20	0,8	26,0	24,0	1,68	1,71	2,0	0,5
»	Жидкое стекло . .	10	1,0	26,0	26,0	1,52	1,53	4,0	1,0
»	ОДП	20	0,7	20,0	22,0	1,74	1,77	0	2,5
»	ВПП	20	1,1	18,5	19,0	1,52	1,56	0,5	1,5
»	Трепел	20	0,8	26,0	24,0	1,62	1,64	0,5	0,2
ИПЦ-М400	—	—	0,8	22,0	22,0	1,56	1,59	0	0
То же	—	—	0,9	26,0	25,0	1,48	1,49	3,9	2,0
ИПЦ-М500	—	—	0,8	24,0	24,0	1,57	1,58	1,6	0
То же	—	—	0,9	26,0	25,0	1,49	1,51	3,2	2,3

вовлеченного в раствор в момент затворения и вследствие контракционных явлений.

Таким образом, на основании опытных данных установлено, что перемешивание оказывает стабилизирующее действие на цементные суспензии, содержащие в своем составе тонкодисперсные и волокнистые материалы. При определении водопотребности тампонажных составляющих необходимо учитывать влияние перемешивания на консистенцию цементных растворов.

Влияние давления на свойства перлита-цементных растворов

В процессе цементировочных работ тампонажные растворы подвергаются действию высоких давлений, которые оказывают влияние на некоторые их свойства. Поскольку давление воздействует на цементные растворы сразу же после их затворения, то, очевидно, очень важно знать, как высокое давление влияет на подвижность раствора. Для этого была предпринята попытка изучить влияние кратковременного воздействия высокого давления на такие параметры тампонажного раствора, как растекаемость по конусу АзНИИ и удельный вес. Результаты исследований показали, что непродолжительная (5—10 мин) обработка раствора давлением 50—200 кг/см² не оказывает заметного влияния на растекаемость и удельный вес различных видов облегченных цементных растворов. Исключением являются растворы, приготовляемые с использованием вспученного перлитового песка. Причем, как подвижность перлита-цементных растворов, так и удельный вес их настолько резко изменяются под воздействием давления, что не учитывать этих изменений в производственных условиях нельзя. Воздействие давления на перлита-цементные растворы исследовалось с помощью 4-тонного гидравлического пресса по методике, подробно описанной во временной инструкции по облегченным перлита-цементным растворам [9].

О влиянии давления на такие параметры перлита-цементного раствора, как растекаемость и удельный вес, можно судить путем сравнения результатов замера до и после обработки раствора давлением.

Природа изменения свойства перлито-цементных растворов под воздействием давления объясняется некоторыми особенностями вспученного перлитового песка [16]. Малый объемный вес ($0,1-0,2 \text{ т/м}^3$), высокий процент замкнутой пористости (до 80%) и низкая прочность частичек перлита ($2-5 \text{ кг/см}^2$ при сжатии) придают растворам, содержащим ВПП, ряд индивидуальных особенностей. Так, в связи с тем, что объемный вес ВПП в 5—10 раз ниже воды, а зерна перлита характеризуются наличием замкнутых пор, в процессе затворения перлито-цементных растворов отмечается всплывание частичек перлита, ухудшающее однородность раствора. Причем, интенсивность всплывания тем выше, чем ниже объемный вес ВПП и выше В:Ц раствора. Для уменьшения явления флотации зерен перлитового песка в тампонажную смесь рекомендуется вводить в небольших количествах структурообразователи, в качестве которых чаще всего используются глинопорошки. Величина добавки глинопорошка зависит от объемного веса перлита и его количества в составе смеси. Чем ниже объемный вес ВПП и выше его содержание в тампонажной смеси, тем больше необходимо глинопорошка для получения однородного раствора. Практически достаточной следует считать добавку глинопорошка в пределах 2—10% при дозировании перлита соответственно 5—20% от веса цемента.

В тех случаях, когда объемный вес ВПП более $0,25 \text{ т/м}^3$, процесс затворения растворов проходит нормально и без введения структурообразователей.

Уже в первых работах американских ученых, посвященных изучению перлито-цементных растворов, обращается особое внимание на сложности, связанные с определением оптимального водо-цементного отношения для тампонажных смесей, содержащих ВПП. Так, С. Д. Саундерс и Ф. В. Нюсбаумер показали, что только за счет повышения давления кажущаяся вязкость перлито-цементных растворов возрастает с 2—7 до 12—30 пз.

Характер изменения удельного веса и растекаемости перлито-цементных растворов, подвергаемых давлению, показан на рис. 1. Наиболее интенсивное насыщение перлита наблюдается при давлениях до 40 кг/см^2 , а при давлении 70 кг/см^2 происходит почти полное насыщение

пор перлита водой, что хорошо согласуется с выводами зарубежных исследователей. В интервале давлений 70—200 кг/см^2 удельный вес и растекаемость раствора практически не меняются.

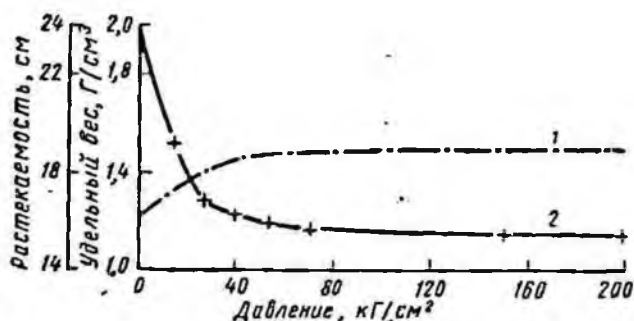


Рис. 1. Влияние давления на удельный вес 1 и растекаемость 2 перлито-цементного раствора. Состав смеси: ЦГС+15% ВПП+4% глины. В:Ц=1,08.

В связи с тем, что объемный вес вспученного перлитового песка, выпускаемого промышленными установками согласно ГОСТ 10832—64, изменяется от 0,05 до 0,3 т/м^3 , появилась необходимость исследовать влияние объемного веса перлита на В:Ц перлито-цементных смесей.

Для изучения влияния объемного веса ВПП на водоцементное отношение перлито-цементных смесей, а значит, и водопотребность перлита было исследовано 16 проб перлита объемного веса 0,08—0,275 т/м^3 . Методика работы с перлитами различных объемных весов сводилась к подбору водоцементного отношения для получения растворов, которые после обработки давлением имели растекаемость в пределах $16 \pm 0,5$ см (эти исследования проводились в период, когда действующим был ГОСТ 1581—42).

В результате анализа экспериментальных данных путем несложных расчетов была построена графическая зависимость между водопотребностью перлита K_n и его объемным весом γ_0 (рис. 2), которая с достаточной точностью может быть описана уравнением равнобедренной

гиперболы с коэффициентом, равным 0,6. Это позволяет записать следующее эмпирическое соотношение:

$$K_n = \frac{0,6}{\gamma_0} \quad (11)$$

Найденная зависимость дает возможность с достаточной для промысловых условий точностью определять

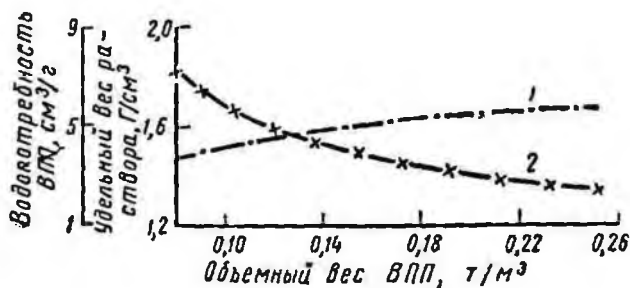


Рис. 2. Зависимость удельного веса перлито-цементного раствора 1 и водопотребности перлита 2 от его объемного веса.

расчетным путем водо-цементное отношение перлитоглино-цементных смесей и исключать работы, связанные с обработкой растворов давлением.

Следует отметить, что в американской практике дозирование вспученного перлита к тампонажному цементу рассчитывается в объемных единицах (кубические футы на мешок цемента или 1 м³ перлита на 1 т цемента). В этом случае значительно упрощается методика расчета состава раствора, так как на одну объемную единицу перлита, добавляемого к цементу, дополнительно вводится 0,6 той же объемной единицы воды.

Установление оптимальной водопотребности тампонажных материалов

Рассмотрев влияние различных факторов на физико-механические свойства тампонажных растворов, перейдем к установлению оптимальной водопотребности вяжущих и облегчающих материалов.

Под оптимальной водопотребностью понимается такая водопотребность цемента и облегчителя, при кото-

рой облегченный тампонажный раствор заданного удельного веса будет иметь наиболее благоприятные характеристики для цементирования конкретной скважины. Однако это понятие в полной мере справедливо только для добавок, у которых водопотребность в силу целого ряда причин может изменяться в широких пределах, как, например, у часовъярского глинопорошка тонкого помола, где она подбирается либо под растекаемость в пределах 18 см, либо по водоотделению в пределах 5%. Водопотребность зернистых облегчителей практически является постоянной величиной (при условии идентичности исходных материалов), так как она устанавливается путем подбора только под растекаемость 20 ± 2 см.

Оптимальная водопотребность для тонкодисперсных и волокнистых материалов устанавливается с учетом свойств добавки, заданной плотности раствора, условий его твердения и ряда других причин. Так, например, если облегчающая добавка инертна по отношению к продуктам гидратации портландцемента, то оптимальной будет максимально допустимая водопотребность. В том случае, когда облегчителем является активная минеральная добавка или когда добавка под воздействием высоких температуры и давления становится активной, оптимальной считается такая водопотребность, при которой раствор заданной плотности получается при наиболее благоприятном для раствора и цементного камня содержании добавки.

Для установления водопотребности различных видов вяжущих и облегчающих материалов были проведены исследования, систематизированные по виду тампонажных материалов в отдельные таблицы.

В табл. 11 рассматривается влияние В:Ц на растекаемость и водоотстой тампонажных растворов, получаемых из цементов различных типов и марок. Эти опытные данные позволяют установить минимальную и максимальную водопотребности цементов. Так, например, минимальная водопотребность тампонажного цемента для «горячих» скважин (ЦГС-5) составит 0,40—0,42, а максимальная, по-видимому, будет равна 0,53—0,55. Для цемента ЦГС-7 минимальная и максимальная водопотребности соответственно равны 0,45 и 0,6, а для пуццоланового портландцемента марки 300 (ППЦ-м300)

Таблица 11

Влияние В:Ц на растекаемость и водоотстой чистых цементных растворов

Цемент		В:Ц	Удельный вес раствора, $\Gamma/\text{см}^3$	Растекаемость, см		Водоотстой, %	
наименование	удельная поверхность (по ГСХ-2), $\text{см}^2/\text{г}$			начальная	после 10 мин перемешивания	начальный	после 10 мин перемешивания
ЦГС-5	3200	0,40	1,94	17,0	18,0	0	0,2
»	3200	0,45	1,88	21,0	22,5	0	2,5
»	3200	0,50	1,84	25,0	>26,0	1,0	7,0
»	3200	0,55	1,78	>26,0	>26,0	3,5	9,0
»	3200	0,60	1,74	>26,0	>26,0	7,5	12,0
ЦГС-6*	—	0,50	1,84	18,5	21,0	0,5	5,0
ЦГС-7	—	0,50	1,82	20,0	—	0	—
ЦГС-6*	—	0,60	1,75	23,5	>26,0	1,0	12,9
ЦГС-7	—	0,60	1,75	25,0	—	1,0	3,0
ППЦ-м300	8250	0,74	1,61	17,0	—	0	0
То же	8250	0,92	1,52	19,0	—	1,0	0
»	8250	1,05	1,46	24,0	—	3,5	1,0
»	8250	1,10	1,45	26,0	—	4,8	3,0
»	8250	1,20	1,42	26,0	—	5,3	4,2
ППЦ-м400	7200	0,70	1,62	17,5	19,0	0	0
ППЦ-м400*	—	0,75	1,59	17,0	—	1,0	0
ППЦ-м400	7200	0,90	1,53	25,0	24,0	3,6	2,0
ППЦ-м400	7200	0,95	1,50	25,0	24,0	4,5	3,0
ППЦ-м400*	—	0,95	1,50	25,0	24,0	2,5	1,5
ППЦ-м400	7200	1,00	1,48	26,0	24,5	5,8	4,4
ППЦ-м500	6300	0,70	1,63	18,0	—	0	0
То же	6300	0,80	1,57	24,0	24,0	1,6	0
»	6300	0,90	1,53	>26,0	24,5	3,5	2,5
»	6300	1,00	1,49	>26,0	>26,0	4,8	3,5

* Цементы испытывались после годового хранения их в складском помещении

минимальная будет равна 0,75, а максимальная — 1,10.

В табл. 12 показано влияние водопотребности зернисто-волоконистых облегчителей на растекаемость и водоотстой. Из этой же таблицы видно, что с повышением содержания облегчителя в смеси несколько увеличиваются растекаемость и водоотстой растворов. Однако это увеличение не столь существенно при дозировании облегчителя в известных пределах (с точки зрения получения цементного камня достаточной прочности).

Растворы, приготовленные с использованием тонкодисперсных облегчителей, не повышают растекаемость и

Таблица 12

Влияние водопотребности зернисто-волоконистых облегчителей на растекаемость и водоотстой цементных растворов, приготовленных из цемента для «горячих» скважин

Облегчитель			В.Ц	Водопотребность облегчителя, см ³ /г	Растекаемость, см		Водоотстой, %	
наименование	Удельная поверхность, см ² /г	добавка к цементу, % вес.			начальная	после 10 мин перемешивания	начальный	после 10 мин перемешивания
Асбозурит	8000	10	0,72	2,7	16,5	< 15,0	1,0	0
»	8000	20	0,97	2,6	16,0	< 14,0	1,0	0
»	8000	20	1,00	3,0	23,0	18,0	2,7	0,6
»	8000	30	1,35	3,0	24,5	18,0	3,0	0
»	8000	20	1,04	3,2	25,0	19,0	3,2	1,5
»	8000	25	1,25	3,2	25,0	18,0	5,0	2,0
»	8000	30	1,40	3,3	> 26,0	19,0	7,0	3,0
ОДП . . .	4500	20	0,70	1,5	18,0	20,0	0	2,0
ОДП . . .	4500	30	0,90	1,5	19,5	—	1,0	—
ОДП . . .	4500	40	1,00	1,5	20,0	—	1,5	4,0
ОДП . . .	4500	75	1,52	1,5	20,0	22,5	2,0	6,0
ОДП . . .	4500	20	0,80	2,0	25,0	> 26,0	3,2	9,0
ВПП* . . .	—	10	0,80	3,0	17,0	19,0	0,5	1,5
ВПП* . . .	—	10	0,85	3,5	22,5	25,0	3,0	6,5
ВПП* . . .	—	20	1,10	3,0	18,0	19,0	1,0	2,7
ВПП* . . .	—	20	1,20	3,5	24,0	> 26,0	4,5	8,0

Данные по перлитно-цементным смесям получены после обработки растворов давлением 100 кг/см².

водоотстой по мере увеличения содержания облегчителей в смеси (табл. 13 и 14). Это объясняется тем фактом, что тонкодисперсные облегчители, как правило, имеют более высокую удельную поверхность, чем тампонажный цемент.

О возможности приготовления облегченных тампонажных растворов при использовании стандартных портландцементов, затворяемых на жидкости с повышенной структурообразующей способностью, свидетельствуют данные, приведенные в табл. 15. Как видно из табл. 15, затворение тампонажного цемента на жидкости, содержащей в своем составе жидкое стекло, мылонафт и КМЦ, позволяет получать тампонажные растворы удельного веса до 1,70 г/см³.

При изучении растворов, приготовленных из тонкодисперсных смесей, было установлено, что величина, ха-

Влияние водопотребности глинопорошка на растекаемость и водоотстой растворов

Состав раствора				В:Ц	Водопотребность глинопорошка, см ³ /г	Растекаемость, см		Водоотстой, %	
цемент	глинопорошок		начальная			после 10 мин перемешивания	началь- ный	после 10 мин перемешивания	
	наименование	удельная поверх- ность, см ² /г							добавка к цементу, % вес.
ЦГС	Горбский	3500	20,0	0,70	1,5	20	18,5	1,5	0
»	»	3500	20,0	0,80	2,0	25	23,0	4,9	2,0
ЦХС	»	3500	20,0	0,90	2,5	>26	>26,0	12,9	4,7
ЦГС	Махарадзевский	3200	20,0	0,70	1,5	20	16,0	0,5	0
»	»	3200	30,0	0,90	1,5	18	—	1,0	0
ЦХС	»	3200	20,0	0,80	2,0	23	18,0	3,2	1,4
ЦГС	»	3200	20,0	0,90	2,5	25	23,0	5,0	2,0
»	»	3200	22,2	0,96	2,5	26	24,5	5,3	2,1
»	»	3200	29,2	1,13	2,5	>26	25,5	5,5	2,0
ЦХС	»	3200	20,0	1,00	3,0	>26	26,0	9,7	4,0
ЦГС	Часовъярский	8500	20,0	0,80	2,0	19	13,0	0	0
»	»	8500	37,3	1,20	2,0	20	—	0,5	0
ЦХС	»	8500	41,5	1,23	2,0	19	13,0	0	0
ЦГС	»	8500	20,0	0,90	2,5	22	15,0	0,5	0
»	»	8500	27,0	1,12	2,5	24	—	1,5	0
»	»	8500	20,0	1,00	3,0	26	18,0	2,0	0
»	»	8500	30,0	1,35	3,0	25	—	2,4	0,5
ЦХС	»	8500	20,0	1,10	3,5	>26	20,5	3,8	1,0
ЦГС	»	8500	16,0	1,04	4,0	>26	23,5	6,0	2,4
»	»	8500	20,0	1,20	4,0	>26	23,0	5,8	1,6
»	»	8500	10,0	0,85	4,5	>26	25,5	5,1	3,0
ЦХС	»	8500	20,0	1,30	4,5	>26	26,0	6,5	2,7
ЦГС	»	8500	12,0	1,00	5,0	>26	26,0	6,5	2,9

Таблица 14

Влияние водопотребности диатомита и трепела на растекаемость и водоотстой растворов

Состав раствора				В:Ц	Водопо- требность облепчи- теля, см ³ /г	Растекаемость, см		Водоотстой, %	
цемент	облегчитель					началь- ная	после 10 мин перемешивания	началь- ный	после 10 мин перемешивания
	наименование	удельная поверх- ность, см ² /г	добавка к цементу, % вес						
ЦГС	Диатомит	7000	50	1,10	1,3	18,5	—	1,0	—
»	»	18000	20	0,70	1,5	22,0	22,0	1,0	0
»	»	18000	40	1,04	1,5	20,0	—	1,0	0,5
»	»	22000	50	1,25	1,6	19,5	—	1,0	—
»	»	18000	20	0,80	2,0	25,0	24,0	2,0	0,5
»	»	18000	50	1,45	2,0	26,0	—	2,0	1,0
ЦХС	»	18000	20	0,90	2,5	>26,0	25,0	3,0	2,0
ЦГС	»	18000	40	1,45	2,5	>26,0	—	3,0	2,0
»	»	18000	50	1,70	2,5	>26,0	—	5,0	2,5
»	»	18000	20	1,00	3,0	>26,0	>26,0	7,0	4,0
»	»	18000	40	1,65	3,0	>26,0	—	6,3	4,0
ЦХС	Трепел	9500	30	0,90	1,5	24,5	—	2,7	1,0
ЦГС	»	9500	30	1,35	3,0	>26,0	—	16,0	9,0
»	»	20500	20	0,70	1,5	20,5	19,0	0	0
ЦХС	»	20500	57	1,25	1,5	18,0	—	0	0
ЦГС	»	20500	20	0,80	2,0	26,0	23,5	0,5	0
»	»	20500	30	1,00	2,0	26,0	23,0	0,5	0,3
»	»	20500	20	0,90	2,5	>26,0	24,0	3,2	1,5
»	»	20500	40	1,40	2,5	>26,0	26,0	5,1	1,6
»	»	20500	20	1,00	3,0	>26,0	26,0	5,7	2,5
»	»	20500	30	1,30	3,0	>26,0	26,0	6,0	3,0

Таблица 15

Влияние структурообразующих добавок на растекаемость и водоотстой растворов

Состав раствора			В.Ц	Удельный вес раствора, г/см ³	Растекаемость, см		Водоотстой, %	
цемент	структурообразова- тель				начальная	после 10 мин пере- мешивания	начальный	после 10 мин пере- мешива- ния
	наимено- вание	добавка к цементу, % вес.						
ЦГС	Жидкое стекло, <i>m</i> =2,93*	5,0	0,65	1,70	25,0	>26,0	1,5	0,5
»	То же	10,0	0,70	1,67	23,0	25,0	0	0
»	»	10,0	0,80	1,62	24,0	25,0	0	0
»	»	10,0	0,90	1,58	25,0	>26,0	1,0	0,5
»	»	10,0	1,00	1,52	26,0	>26,0	4,2	1,0
»	Мыло- нафт	0,5	0,80	1,62	22,5	—	7,7	1,0
»	КМЦ	0,5	0,60	1,76	21,0	25,0	3,0	3,9
ППЦ- -м400	»	0,5	0,95	1,51	21,0	23,0	4,0	6,5
То же	Мыло- нафт	0,5	0,95	—	22,0	22,0	4,3	3,0

* m —модуль жидкого стекла.

рактически характеризующая количество воды, приходящееся на 1 см^2 удельной поверхности тампонажной смеси, примерно одинакова для смесей с различными добавками. Сравнения проводились на растворах, перемешанных в течение 10 мин при $n=900 \text{ об/мин}$ и имеющих одинаковый водоотстой. Это отношение названо авторами удельной водопотребностью тампонажной смеси ΔK и математически записывается так:

$$\Delta K = \frac{K_{\text{ц}} + m_{\text{д}} K_{\text{д}}}{S_{\text{ц}} + m_{\text{д}} S_{\text{д}}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{ц}}$, $K_{\text{д}}$ — водопотребность цемента и добавки в $\text{см}^3/\text{г}$; $m_{\text{д}}$ — содержание облепчителя в смеси на единицу веса цемента; $S_{\text{ц}}$, $S_{\text{д}}$ — удельная поверхность цемента и добавки в $\text{см}^2/\text{г}$.

Таблица 16

Изменение величины ΔK в зависимости от водоотстоя растворов

Состав тампонажной смеси					В.Ц	Водоотстой, %		$\Delta K, n \times 10^{-4}$
цемент		облегчитель				начальный	после 10-мешивания	
наименование	удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	наименование	удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$	добавка к цементу, % вес.				
ЦГС	3200	—	—	—	0,45	0	2,5	1,40
»	3000	Диатомит	18 000	20	0,90	3,0	2,0	1,37
»	3000	»	18 000	40	1,45	3,0	2,0	1,41
»	3000	»	18 000	50	1,70	5,0	2,5	1,41
»	3000	Трепел	20 500	20	0,90	3,2	1,5	1,26
»	3000	»	20 500	30	1,15	5,0	2,0	1,26
»	3000	»	20 500	40	1,40	5,1	1,6	1,25
»	3000	»	20 500	47	1,57	4,9	2,0	1,24
»	3000	»	20 500	20	1,00	5,7	2,5	1,41
»	3000	»	20 500	30	1,30	6,0	3,0	1,42
ГПЦ.-м300	8250	—	—	—	1,10	4,8	3,0	1,34
ГПЦ.-м400	7200	—	—	—	0,95	4,5	3,0	1,32
ГПЦ.-м500	6300	—	—	—	0,90	3,5	2,5	1,43

Как видно из табл. 16, удельная водопотребность тампонажных смесей в пределах $(1,3-1,4) \times 10^{-4}$, по-видимому, является максимальной (критической) для растворов тампонажной консистенции. Рассматривая удельную водопотребность глино-цементных смесей, нетрудно установить, что она в 2—3 раза выше критической. Это объясняется, вероятно, тем фактом, что в процессе взаимодействия глины с водой в условиях интенсивного перемешивания раствора удельная поверхность глинопошка, по видимому, увеличивается в 2—3 раза. В связи с этим и резко возрастает водоудерживающая способность глиноцементной смеси.

Обстоятельные исследования водопотребности различных видов вяжущих и облегчающих материалов позволили установить водопотребность каждого исследованного компонента тампонажной смеси. В табл. 17 и 18 приведены значения водопотребности вяжущих и облегчающих материалов.

Водопотребность вяжущих материалов

Краткая характеристика материала				Водопотребность		
наименование	ГОСТ, технические условия	удельная поверхность, см ² /г	удельный вес, г/см ³	минимальная	максимальная	оптимальная
ЦХС	1581—63	2500— —4000	3,05— —3,20	0,40	0,55	0,45
ЦГС	1581—63	2500— —4000	3,05— —3,20	0,40	0,55	0,45
Цемент класса «А»	Код АНИ США	2700	3,16	0,40	0,63	0,46
Цемент класса «В»	Код АНИ США	2900	3,16	0,40	—	0,46
Цемент класса «С»	Код АНИ США	4000	—	—	—	0,56
Цемент класса «Д»	Код АНИ США	—	3,25	—	—	0,40
ПЦ	PZ-275 ФРГ	—	3,15	—	—	0,45
ПЦ	PZ-475 ФРГ	—	3,15	—	—	0,55
Цемент для глубоких скважин . .	TBZ ФРГ	—	3,2	—	—	0,40
ПЦ-КГС	Куйбышев-гидрострой	—	—	0,50	—	0,55
ППЦ	10178—62	—	2,8— —3,0	0,55	—	—
ППЦ-М300	10178—62	8250	2,8	0,75	1,05	0,9
ППЦ-М400	10178—62	7200	2,85	0,70	0,94	0,85
ППЦ-М500	10178—62	6300	2,90	0,65	0,92	0,80

Под минимальной водопотребностью вяжущих и облегчающих материалов понимается такая водопотребность, при которой расчетное количество воды затворения для той или иной смеси будет обеспечивать получение цементного раствора с начальной растекаемостью пульпы 18 см по конусу АзНПП. При максимальных значениях водопотребности расчетное количество воды затворения должно обеспечивать получение тампонажного раствора с водоотстоем не более 3% для облегчителей зернисто-волокнистого типа (ОДП, ВПП и др.) и не более 5%, когда облегчителем является тонкодисперсный материал (глина, трепел и др.).

Знание водопотребности исходных компонентов тампонажной смеси дает основание перейти к проектированию состава облегченного цементного раствора. Под проектированием состава тампонажного раствора пониженного удельного веса следует подразумевать такой спо

Водопогребность облегчающих материалов

Краткая характеристика материала				Водопогребность, см ³ /г		
наименование	ГОСТ, страна	удельная поверхность, см ² /г	удельный вес, Г/см ³	минимальная	максимальная	оптимальная
Асбест V сорта	ГОСТ 12871—67	7000	2,45	—	—	5,5
Асбест VII сорта	ГОСТ 12871—67	—	2,45	—	—	5,5
Асбозурит	СНП 1-B-26-62	8000	2,30	—	—	3,2
Бентонит	США	—	2,30	3,7	5,6	5,3
»	ФРГ	—	2,50	—	—	4,0
»	—	—	2,40	—	—	4,5
ВПП	—	—	2,30	—	—	0,6
Гильсонит	—	—	1,07	—	—	0,25
Глинопокрошок горбский	США	3500	2,45	1,2	2,0	1,6
Глинопокрошок городищенский	—	—	—	1,0	—	—
Глинопокрошок махарадзевский	—	3200	2,45	1,5	2,5	2,0
Глинопокрошок часовьярский	—	8500	2,50	1,7	4,5	3,0—4,0
Диатомит инзенский	—	18 000	2,20	1,4	2,5	2,0
Диатомит киссаятский	—	—	—	—	—	3,0
Диатомит	США	—	2,10	3,0	5,0	4,0—5,0
Жидкое стекло $m=2,83$	—	—	1,45	2,5	6,0	1,5
ОДП инзенский	—	4500	2,20	—	—	1,5
ОДП молотый	—	—	2,12	—	—	—
Опока	—	—	2,45	1,2	—	—
Трепел брянский	—	20 500	2,30	1,5	3,0	1,5—2,5
Трепел вольский	—	—	2,40	—	—	1,5
Трепел первоувановский	—	9500	2,45	—	—	5,0
Трепел	ФРГ	—	2,20	—	—	2,0—3,0
Улучшенный перлит	США	—	2,30	—	—	—

соб его расчета, который позволил бы при данных качественных характеристиках, составляющих тампонажную смесь, получать наиболее благоприятные параметры тампонажного раствора и камня на его основе.

В настоящее время еще нет принятого научно-обоснованного метода проектирования тампонажного раствора. Авторами делается попытка установить оптимальное соотношение между цементом, облепшителем и их водопотребностями в зависимости от удельного веса раствора и условий его работы в скважине.

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Необходимым условием удовлетворительного разобщения водо-нефте-газоносных горизонтов в глубоких скважинах является строгое соблюдение ряда требований, предъявляемых к тампонажному раствору и цементному камню.

В этом разделе рассматриваются основные свойства тампонажных растворов пониженного удельного веса и изучаются физико-механические характеристики цементного камня.

Удельный вес

Одним из основных свойств тампонажных растворов является удельный вес или плотность. Долгое время в отечественной нефтепромысловой практике существовало мнение, что для наиболее полного вытеснения глинистого раствора цементным необходимо, чтобы разность их удельных весов была $0,5-0,6 \text{ г/см}^3$.

В последние годы рядом авторов [7, 25] высказывалось сомнение по поводу правильности данного положения. Так, А. И. Булатов [7] считает, что при существующей технике и технологии цементирования скважин, когда в затрубном пространстве скважин создаются высокие скорости подъема, требование высокой разницы удельных весов цементного и глинистого растворов недостаточно обоснованно. Во многих случаях она (особенно при больших скоростях) является опасной в связи с возможным разрывом пластов. Практика показывает,

что разница удельных весов цементного и глинистого растворов должна составлять примерно $0,1—0,2 \text{ Г/см}^3$.

Американские исследователи [25] считают, что для успешного проведения цементировочных работ необходимо, чтобы разница между удельным весом тампонажного раствора и промывочной жидкостью была не менее $0,24 \text{ Г/см}^3$. Отсюда следует, что при цементировании глубоких скважин наиболее широкое распространение, по-видимому, получают тампонажные растворы удельного веса $1,4—1,7 \text{ Г/см}^3$.

Стремление осуществить проходку глубоких скважин в условиях минимально допустимого с технологической точки зрения зазора между стенкой скважины и обсадной колонной, а цементирование с максимально высокой скоростью подъема цементного раствора в затрубном пространстве ведет к тому, что гидродинамические давления в процессе цементирования достигают значений, превышающих давление гидравлического разрыва пласта. В этих случаях и наблюдаются интенсивное поглощение тампонажного раствора, и, как его следствие, недоподъем цементного раствора. В первую очередь опасность гидроразрыва пласта возникает там, где разрез скважин представлен трещиноватыми и кавернозными породами.

Каким должен быть удельный вес цементного раствора γ для нормального проведения цементировочных работ, можно определить, зная величину гидравлического разрыва пластов $p_{грп}$ вязко-пластичными жидкостями, расстояние от устья скважины до зоны предполагаемого гидроразрыва или поглощения H и высоту подъема тампонажного раствора h над указанной зоной. В этом случае для нормального цементирования необходимо, чтобы выражение $p'_r + 0,1(H-h)\gamma_{гр} + 0,1h\gamma$ было меньше $p_{грп}$.

Отсюда удельный вес тампонажного раствора должен удовлетворять условию

$$\gamma \leq \frac{10(p_{грп} - p'_r) - (H - h) \gamma_{гр}}{h},$$

где p'_r — давление на преодоление гидравлических сопротивлений в опасной зоне цементирования к моменту

окончания продавливания в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$; $\gamma_{\text{гр}}$ — удельный вес глинистого раствора в $\Gamma/\text{см}^3$.

Критерием для расчета удельного веса облегченного цементного раствора γ может быть не только давление гидравлического разрыва пласта, но и предельно допустимое давление к концу продавливания p_k . В этом случае

$$\gamma \leq \frac{10(p_k - p_r) - (L - h_1 - h_2)\gamma_{\text{гр}} + (L - h_k)\gamma_{\text{пр}} - (h_1 - h_k)\gamma_{\text{цр}}}{h_2},$$

где p_r — давление на преодоление гидравлических сопротивлений в трубах и затрубном пространстве к концу продавливания в $\kappa\Gamma/\text{см}^2$; L — длина колонны в м; h_1 — высота подъема цементного раствора нормального удельного веса в затрубном пространстве в м; h_2 — высота подъема облегченного тампонажного раствора в затрубном пространстве в м; h_k — высота цементного стакана в обсадной колонне в м; $\gamma_{\text{пр}}$ — удельный вес чистого цементного раствора в $\Gamma/\text{м}^3$; $\gamma_{\text{цр}}$ — удельный вес продавочной жидкости в $\Gamma/\text{м}^3$; $\gamma_{\text{гр}}$ — удельный вес глинистого раствора в $\Gamma/\text{м}^3$.

Значения $p_{\text{грп}}$, p_r , p_k определяются по известным формулам гидравлики [22, 32] или опытным путем на основании промысловых данных.

В большинстве случаев удовлетворительные результаты при цементировании глубоких скважин могут быть получены при правильно подобранном составе тампонажного раствора. В первую очередь они зависят от вида и количества добавки в облегченном цементе.

О характере изменения удельного веса тампонажных растворов в зависимости от вида и величины облегчающих добавок можно судить по кривым, приведенным на рис. 3, а и б. Эти кривые построены для случая, когда удельный вес цемента $\gamma_{\text{ц}} = 3,1 \Gamma/\text{см}^3$, а водопотребность $K_{\text{ц}} = 0,45$ (см. рис. 3, а) и $\gamma_{\text{ц}} = 3,15 \Gamma/\text{см}^3$; а $K_{\text{ц}} = 0,5$ (см. рис. 3, б).

Из данных, приведенных на рис. 3, а и б, хорошо видно, что снижение удельного веса раствора в первую очередь зависит от водопотребности добавки. Чем выше водопотребность, тем интенсивнее снижение. Несколько

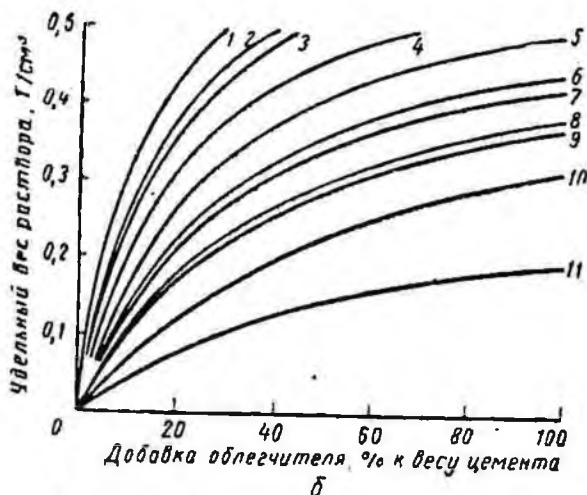
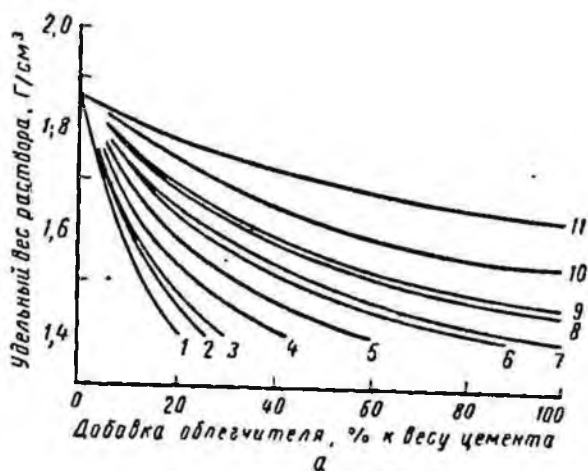


Рис. 3. Изменение удельного веса тампонажного раствора в зависимости от содержания облепгчителя.

а — при $\gamma_{\text{ц}}=3,1 \text{ г/см}^3$; $K_{\text{ц}}=0,45$; б — при $\gamma_{\text{ц}}=3,15 \text{ г/см}^3$; $K_{\text{ц}}=0,5$. 1 — асбест V сорта, $K_{\text{а}}=5,5$, $\gamma_{\text{а}}=2,45$; 2 — часовязьский глинопорошок, $K_{\text{г}}=4,5$, $\gamma_{\text{г}}=2,5$; 3 — ВПП, $K_{\text{в}}=4,0$, $\gamma_{\text{в}}=2,3$; 4 — асбозурит, $K_{\text{ас}}=3,2$; $\gamma_{\text{ас}}=2,3$; 5 — трепел, $K_{\text{т}}=2,5$, $\gamma_{\text{т}}=2,3$; 6 — трепел, диатомит, $K=2,0$, $\gamma=2,3$; 7 — глинопорошок махарадзевский, $K_{\text{г}}=2,0$, $\gamma_{\text{г}}=2,45$; 8 — ОДП, $K_{\text{о}}=1,5$, $\gamma_{\text{о}}=2,2$; 9 — глинопорошок горбский, $K_{\text{г}}=1,5$, $\gamma_{\text{г}}=2,45$; 10 — каменный уголь, $K_{\text{у}}=0,5$, $\gamma_{\text{у}}=1,5$; 11 — зола-унос, $K_{\text{з}}=0,8$, $\gamma_{\text{з}}=2,45$.

иной характер изменения удельного веса тампонажного раствора наблюдается при использовании цемента очень тонкого помола (рис. 4).

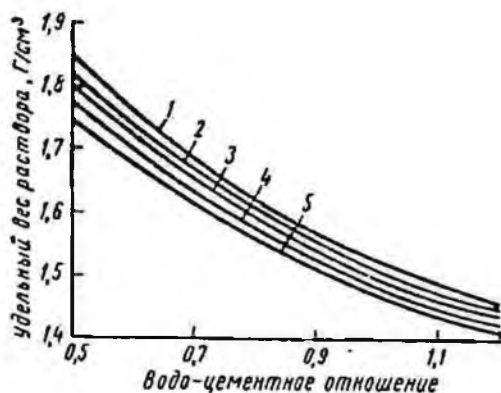


Рис. 4. Зависимость удельного веса раствора из цемента тонкого помола от водо-цементного отношения.

1 — портландцемент очень тонкого помола, $\gamma_{\text{ц}}=3,2$; 2 — портландцементная пыль рукавных фильтров, $\gamma_{\text{цп}}=3,1$; 3 — шлако-портландцементная пыль рукавных фильтров, $\gamma_{\text{ш}}=3,0$; 4 — ППЦ-м 500, $\gamma_{500}=2,9$; 5 — ППЦ-м 300, $\gamma_{300}=2,8$.

Подвижность и загустевание

✓ Одним из важнейших свойств тампонажных растворов является подвижность, или способность их легко прокачиваться в скважине в течение времени, необходимого для полного завершения цементировочных работ. В настоящее время еще не разработаны методология и специальное оборудование для проведения эксперимента, моделирующего условия закачивания и продавливания тампонажных растворов в скважину. В связи с этим подвижность цементных растворов регистрируется такими косвенными характеристиками, как растекаемость по конусу АзНИИ, эффективная или кажущаяся вязкость и др.

Рассмотренные ранее положения о водопотребности тампонажных составов предполагают, что все исследуемые тампонажные растворы пониженного удельного веса имеют начальную растекаемость по конусу

АзНИИ не менее 18 см, а водоотстой — не более 3—5%. Поскольку растекаемость раствора характеризует его подвижность в момент затворения, то, очевидно, она не может быть показателем транспортабельности раствора в условиях, аналогичных скважинным. Это обстоятельство послужило основанием для изыскания таких методов исследования, которые бы воссоздавали производственные условия работы раствора. В связи с этим рядом исследователей были созданы различные типы консистометров.

Принцип работы этих приборов основан на постоянном фиксировании величины крутящего момента, возникающего в результате закручивания специального подвешенного устройства, помещаемого во вращающийся цилиндр с испытуемым раствором. Величина крутящего момента, или усилие, передаваемое раствором на подвешенное устройство, замеряется с помощью калиброванной стальной нити или пружины. Тарируются эти приборы по истинно вязким жидкостям известной консистенции, выражаемой в паузах.

За последние годы рядом авторов проведены обширные исследования по реологии цементных растворов, в результате которых получены некоторые общие зависимости. В частности, было установлено, что на скорость загустевания цементного раствора, так же как и на схватывание, в большей степени влияет температура, чем давление. Причем с повышением температуры влияние давления на скорость загустевания растворов заметно уменьшается.

М. С. Винарский, ссылаясь на работы американских исследователей, пишет, что согласно требованиям, предъявляемым к консистенции тампонажных растворов (фирма «Халлибуртон»), кажущаяся вязкость раствора сразу после затворения должна поддерживаться в пределах 10—30 пз.

В период выполнения настоящей работы авторы не располагали консистометром КЦ-3 и для исследования скорости загустевания тампонажных растворов был создан специальный прибор путем частичной реконструкции вискозиметра, разработанного в УкрНИИПНД А. Н. Яровым.

Установка для определения консистенции тампонажных растворов при повышенных температурах и атмос-

ферпом давлением изготовлена на базе прибора СНС-2. Она состоит из следующих основных узлов: вискозиметра; ультратермостата для поддержания температуры во время опыта в интервале $20-80^{\circ}\text{C}$; регулятора напряжения для установления заданной скорости вращения стакана с испытуемым раствором; стабилизатора напряжения типа С=0,09.

Для регистрации консистенции раствора в процессе опыта вискозиметр был прокалиброван с помощью истинно вязкой (лыутоновской) жидкости. Такой жидкостью в рассматриваемых опытах было цилиндрическое масло «Ванор». В результате калибрования найдена зависимость между эффективной вязкостью η и углом закручивания ϕ лимба вискозиметра. На основании опытных данных получено, что для случая, когда цилиндрический стакан с раствором вращается со скоростью 100 об/мин, эффективная вязкость равна $\eta_{100}=0,222\phi$, а при $n=60$ об/мин $\eta_{60}=0,364 \phi$.

Время от начала затворения тампонажного раствора до того момента, когда вязкость его достигала $70-80$ пз, считалось временем начала загустевания. Длительность лабораторного эксперимента ограничивалась временем начала загустевания, а в тех случаях, когда растворы характеризовались растянутыми сроками загустевания, не превышала 4—6 ч. Скорость подъема температуры составляла $0,7^{\circ}\text{C}$ в 1 мин. Конечная температура (75°C) опыта поддерживалась в пределах $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Исследования тампонажных растворов пониженной плотности, проведенные на этой установке, позволили объяснить причины повышения давления выше расчетного, а в отдельных случаях и невозможность завершения продавливания при использовании глиноцементных растворов, содержащих свыше 25—30% глинопорошка от веса цемента. Данные, приведенные в табл. 19 и на рис. 5, наглядно иллюстрируют изменение скорости схватывания и загустевания в зависимости от содержания глинопорошка в растворе.

Из анализа экспериментальных данных установлено, что различие между временем начала схватывания и загустевания у чистых растворов находится в пределах 30 мин (см. табл. 19). Причем, схватывание опережает загустевание. Аналогичные зависимости получены авторами при испытании цементов для «холодных» и «го-

Таблица 19

Характеристика подвижности облегченных цементных растворов

Состав раствора			В.Ц	Растекаемость, см		Начальная вяз- кость, л/с	Время начала за- густевания, ч-мин	Время начала схватывания, ч-мин
цемент	облегчающая добавка			начальная	после пе- ремешива- ния 10 мин			
	наименование	величина, % от веса цемента						
ЦГС	—	—	0,50	18,0	—	13	2—45	2—25
»	—	—	0,50	25,0	>26,0	7	3—25	3—00
»	Асбест V сорта	10,8	1,10	19,5	—	30	1—30	2—30
»	Асбозурит	19,6	1,03	24,0	19,0	11	2—50	2—30
»	Глинопорошок часовъярский	10,8	0,88	23,5	22,0	5	>5—00	3—45
»	То же	12,0	1,00	>26,0	26,0	4	>4—30	—
»	»	16,0	1,04	26,5	23,5	7	3—45	3—30
»	»	23,0	1,09	24,5	19,5	12	2—15	4—00
»	»	29,0	1,13	21,5	16,0	14	1—45	4—30
»	»	42,0	1,23	19,0	13,0	—	1—15	4—35
»	Трепел	27,1	1,08	25,0	23,5	4	>4—30	3—50
»	»	36,8	1,14	24,0	22,5	3	>4—45	3—30
»	»	47,0	1,57	26,0	24,0	3	>5—00	5—00
»	»	57,0	1,25	18,5	—	6	>4—00	2—50
ПГЦ- -м400	—	—	0,75	18,0	—	12	>4—15	3—30
То же	—	—	0,84	21,0	—	7	>5—00	5—30

рячих» скважин и согласуются с исследованиями зарубежных авторов.

При изучении скорости загустевания различных видов облегченных цементных растворов было установлено, что время начала схватывания в отдельных случаях резко отличается от времени начала их загустевания. Особенно это важно в тех случаях, когда загустевание намного опережает сроки схватывания. В первую очередь это относится к глиноцементным смесям. Так, при высоком содержании глинопорошка в тампонажном растворе (42 и 23%) время начала загустевания короче времени начала схватывания соответственно на 3 ч 20 мин и 2 ч 45 мин (см. табл. 19). Это обстоятельство нельзя не учитывать при цементировании глубоких скважин.

При содержании глинопорошка в смеси 16 и 12% от веса цемента и повышении водопотребности облегчите-

ля соответственно до 4 и 5 см³/г наблюдается обратная картина, т. е. время начала схватывания опережает время начала загустевания (см. табл. 19).

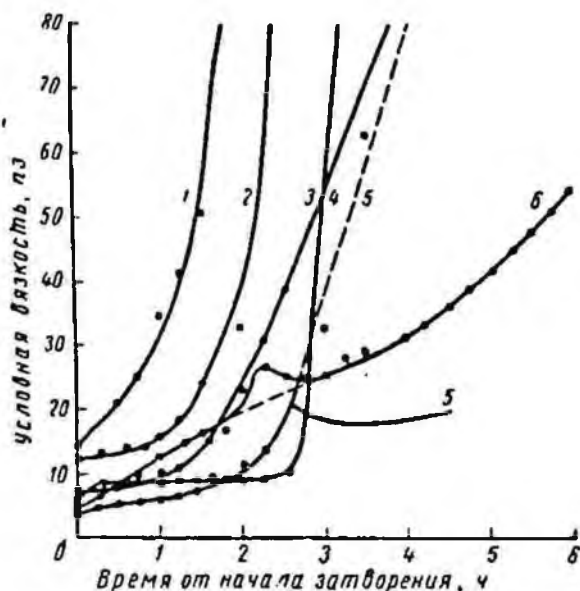


Рис. 5. Зависимость скорости загустевания глино-цементных растворов от добавки глинопорошка и его водопотребности.

1 — глино-цементный раствор, $m_r=0,29$, $K_r=2,5$; 2 — глино-цементный раствор, $m_r=0,23$, $K_r=3,0$; 3 — глино-цементный раствор $m_r=0,16$, $K_r=4,0$; 4 — чистый цементный раствор; 5 — глино-цементный раствор, $m_r=0,12$, $K_r=5,0$; 6 — глино-цементный раствор $\gamma=1,60$ $m_r=0,108$, $K_r=4,5$.

Облегченные цементные растворы, за исключением глино-цементных с большим содержанием глинопорошка и асбестоцементных, имеют сроки загустевания более продолжительные, чем исходный тампонажный цемент. Наиболее растянутыми сроками загустевания по сравнению со временем начала схватывания характеризуются растворы, где в качестве облегчающей добавки используются пуццолановые материалы.

При исследовании вязкости облегченных растворов было отмечено, что у некоторых из них (см. рис. 5, кривые 5, 6 и рис. 6, кривая 3) вслед за непродолжительным повышением величины условной вязкости наблюда-

ется ее падение. Можно предположить, что скачкообразный характер нарастания вязкости тампонажных растворов с последующим переходом на плавный связан с более интенсивным первоначальным процессом образо-

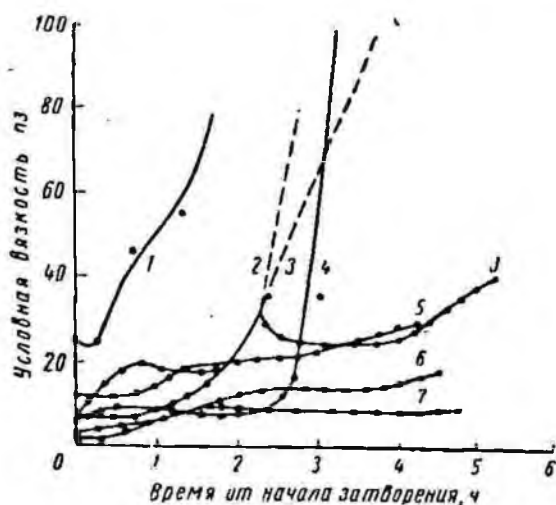


Рис. 6. Кривые загустевания облегченных цементных растворов.

- 1 — асбестоцементный раствор, $\gamma=1,50$, $m_a=0,108$, $K_a=6,0$;
 2 — асбозурито-цементный раствор, $\gamma=1,55$, $m_{ac}=0,196$,
 $K_{ac}=3,2$; 3 — глино-цементный раствор, $\gamma=1,55$, $m_r=0,16$,
 $K_r=4,0$; 4 — чистый цементный раствор, $\gamma=1,85$; 5 — пуд-
 цоланово-цементный раствор (ППЦ-м 400), $\gamma=1,59$;
 6 — трепело-цементный раствор, $\gamma=1,55$, $m_T=0,27$, $K_T=2,5$;
 7 — трепело-цементный раствор, $\gamma=1,46$, $m_T=0,47$, $K_T=2,5$.

вания гидратных соединений в портландцементе, чем это происходит впоследствии. По времени это повышение вязкости облегченных цементных растворов совпадает с началом интенсивного повышения вязкости у чистых цементных растворов (см. рис. 5, кривая 4). К этому же времени может быть привязано и начало схватывания чистого цементного раствора.

Тампонажные растворы пониженной плотности, имеющие начало загустевания более 4—6 ч, после окончания опыта в консистометре испытывались на схватывание при температуре 75°C и атмосферном давлении. Начало схватывания у этих проб раствора, как правило,

наступало через 30—60 мин после окончания их перемешивания в консистомере.

Исходя из конструктивных особенностей рабочей камеры консистометра (малый зазор между стенками цилиндрического стакана и лопастями мешалки — 1,0—1,5 мм), исследовать характер загустевания тампонажных растворов, содержащих зернистые материалы (ОДП, ВПП), не представилось возможным. В связи с этим время нахождения растворов в прокачиваемом состоянии оценивалось сроками схватывания.

Исследования облегченных цементных растворов, проведенные авторами на консистомере, позволили сделать следующие выводы.

1. Скорость загустевания тампонажных растворов пониженной плотности зависит от качества и количества облегчителя в растворе.

2. Глина, асбозурит и асбест, как правило, ускоряют начало загустевания облегченного цементного раствора по сравнению с растворами нормального удельного веса из чистого тампонажного цемента.

3. Трепел и диатомит являются облегчителями, замедляющими начало загустевания.

4. Начало загустевания в большинстве случаев отстает во времени от начала схватывания на 30—60 мин. Исключения составляют растворы с добавкой асбеста и глинопорошка (более 20% от веса цемента), у которых начало загустевания наступает на 30—120 мин раньше начала схватывания.

Сроки схватывания

Процесс схватывания цементных растворов в скважине носит чрезвычайно сложный характер, зависящий как от состава раствора, так и от внешних условий. К числу важнейших факторов, воздействующих на скорость схватывания цементных растворов, следует отнести температуру, давление, длительность и интенсивность прокачивания раствора и др.

Необходимость определения сроков схватывания цементных растворов при высоких температурах и давлениях побудила исследователей [7] разработать специальный прибор — автоклав, позволяющий определять

время схватывания при температуре 100—300°C и давлении до 1000 кг/см². Определение сроков схватывания тампонажных растворов пониженной плотности в опытах осуществлялось с помощью автоклава ГрозНИИ. Скорость подъема температуры в автоклаве составляла 2—4°C в 1 мин.

При изучении перлито-цементных композиций пробы раствора, предназначенные для изучения сроков схватывания, предварительно обрабатывались давлением в пределах 100 кг/см². Это исключало возможность расслоения перлито-цементных растворов и позволяло с большей точностью характеризовать скорость их схватывания.

Исследование цементных растворов в условиях высоких температур и давлений начато советскими учеными еще в 30-е годы. Уже тогда было установлено, а затем и подтверждено, что температура в большей степени влияет на скорость схватывания, чем давление.

В скважине на схватывание тампонажных растворов влияет не только температура и давление, но и такие факторы, как длительность и интенсивность перемешивания раствора, его водоотдача и многие другие.

В лабораторных условиях было рассмотрено влияние кратковременного перемешивания ($t=10$ мин, $n=900$ об/мин) на сроки схватывания некоторых видов тампонажных растворов (табл. 20). Из табл. 20 видно, что даже непродолжительное перемешивание раствора,

Таблица 20

Влияние предварительного перемешивания растворов на скорость схватывания

Состав раствора			В : Ц	Сроки схватывания, ч/мин			
цемент	облегчающая добавка			начало		конец	
	наименование	величина, % от веса це- мента		раствор не пе- ремешан	раствор пере- мешан	раствор не перемешан	раствор пе- ремешан
ЦГС	—	—	0,50	3—30	3—00	4—15	3—45
»	Диатомит	40,0	1,45	3—10	2—50	7—40	7—25
»	Глинопорошок часовьярский	10,4	0,88	2—45	2—15	6—00	4—00
ПЩ-М400	—	—	0,90	4—05	3—30	5—10	4—45

проводимое при комнатной температуре и атмосферном давлении, ускоряет процессы схватывания.

При цементировании глубоких скважин длительность закачивания и продавливания тампонажных растворов подчас превышает 1—2 ч. В связи с этим были поставлены опыты по перемешиванию облегченных цементных растворов в консистомере при конечной температуре 75°C в течение 2—3 ч с последующим определением начала их схватывания. Так, трепело-цементный раствор состава — цемент: трепел: вода = 100 : 57 : 125 после перемешивания в консистомере в течение 4 ч начал схватываться через 60 мин. Тот же цементный раствор имел начало схватывания 2 ч 50 мин, когда сроки схватывания определялись по стандартной методике (ГОСТ 1581—63). Из этого примера видно, что длительное перемешивание существенно замедляет процессы схватывания. Подтверждением этого является и такой опыт. После того как условная вязкость чистого тампонажного раствора достигла 80 лз, т. е. было отмечено начало его загустевания, раствор помещался в кольцо для схватывания. Начало схватывания в этом случае наступало не раньше чем через 30 мин после окончания перемешивания раствора в консистомере. Разница во времени между началом схватывания раствора, помещенного в кольцо для схватывания сразу после затворения и после длительного перемешивания, составляла 60 мин и более.

Ускорение процессов схватывания тампонажных растворов, подвергаемых кратковременному перемешиванию, объясняется тем фактом, что интенсивное перемешивание способствует диспергированию и гидратации твердой фазы раствора. Повышение дисперсности тампонажных составляющих ведет к увеличению объема связанной воды. Уменьшением количества свободной воды в системе цемент — вода и интенсификацией первоначальных процессов гидратации можно объяснить ускорение схватывания.

Влияние перемешивания на процессы схватывания тампонажных растворов рассмотрено в работах Н. И. Титкова и Н. Т. Черткова.

Изучение сроков схватывания различных видов облегченных цементных растворов позволило сделать некоторые выводы. Так, было установлено, что если в ка-

в качестве облегчающей добавки используются материалы с водопотребностью более $1,5-2,0 \text{ см}^3/\text{г}$, то процессы схватывания облегченных растворов по сравнению с чистыми цементными замедляются. Причем характер замедления нарастает по мере увеличения содержания облегчающей добавки в смеси и повышения ее водопотребности. Эти положения иллюстрируются кривыми 1, 2, 3 и 4 на рис. 7 и кривыми 1, 2, 3, 8, 9 и 10 на рис. 8.

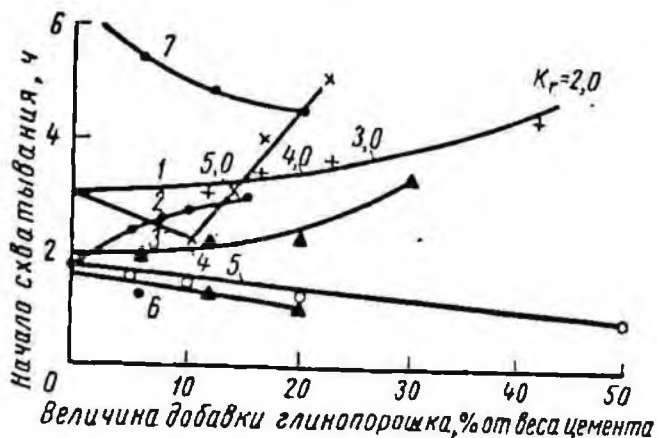


Рис. 7. Зависимость начала схватывания глино-цементных растворов от содержания глинопорошка при $t=75^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$.

1 — растворы с часовъярским глинопорошком, $\gamma=1,55$, $K_p=2,0-5,0$; 2 — растворы с бентонитом (по данным А. И. Булатова [7]); 3 — растворы с часовъярским глинопорошком, $K_p=4,5$; 4 — растворы с часовъярским глинопорошком, $K_p=1,6-2,5$; 5 — растворы с черкасским глинопорошком, $K_p=1,0-1,3$; 6 — растворы с горбским глинопорошком, $K_p=1,2-1,3$; 7 — растворы с горбским глинопорошком, но при $t=22^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$.

Облегченные цементные растворы, приготовленные с использованием добавок, имеющих водопотребность менее $1,5-2,0 \text{ см}^3/\text{г}$, характеризуются ускорением сроков схватывания. При повышении содержания такого облегчителя в смеси можно добиться заметного ускорения схватывания (рис. 8).

Интенсивность замедления и ускорения схватывания в зависимости от вида и величины добавки хорошо прослеживается в различных условиях твердения цементных

растворов. Так, например, темп замедления начала схватывания асбозуриито-цементных растворов различного состава при $T > 75^{\circ}\text{C}$ не зависит от температуры и давления (рис. 8, кривые, 1, 2, 3).

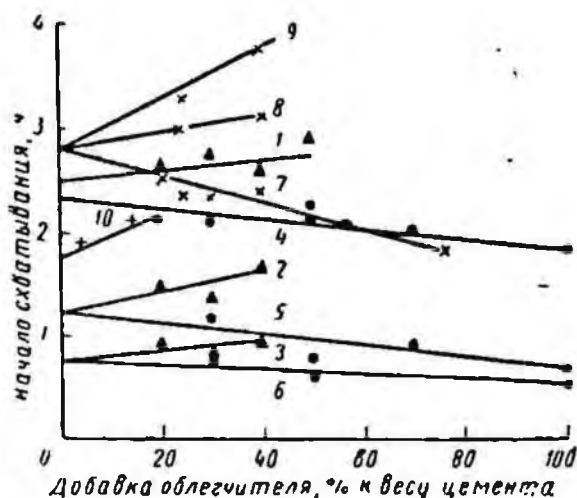


Рис. 8. Влияние облепгчителя на схватывание тампонажных растворов пониженной плотности.

1, 2, 3 — асбозуриито-цементные растворы; 4, 5, 6 — растворы с добавкой ОДП; 7 — диатомито-цементные растворы, $K_d=1,5$; 8 — диатомито-цементные растворы, $K_d=2,0$; 9 — диатомито-цементные растворы, $K_d=2,5$; 10 — перлитно-цементные растворы; 1, 4, 7, 8, 9, 10 — условия твердения: $t=75^{\circ}\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$; 2, 5 — условия твердения: $t=100^{\circ}\text{C}$, $p=300 \text{ кг/см}^2$; 3, 6 — условия твердения: $t=125^{\circ}\text{C}$, $p=300 \text{ кг/см}^2$.

У растворов с добавкой ОДП отмечается не замедление, а, наоборот, ускорение сроков схватывания по сравнению с чистым цементным раствором (рис. 8, кривые 4, 5, 6). Замедляющее действие добавок высокой водопотребности на скорость схватывания цементных растворов, по-видимому, может быть связано с увеличением водных прослоек между частицами твердой фазы и уменьшением сил взаимодействия между ними.

Ускорение процессов схватывания в случае использования добавок малой водопотребности можно объяснить увеличением сил взаимодействия между частицами цемента с одной стороны и зернами цемента и активной облепгчающей добавки — с другой. Это способствует бо-

лее быстрому образованию каркаса цементного камня по сравнению с чистым цементным раствором. В тех случаях, когда облегчающей добавкой является такой достаточно прочный крупнозернистый материал, как ОДП и ВПП, ускорение сроков схватывания может произойти по следующей причине. В процессе замера схватывания раствора с помощью иглы Вика не исключено, что падающая игла встретит на своем пути крупные частицы песка, которые могут затормозить ее падение и исказить результаты эксперимента. В этом случае получаемое начало схватывания будет кажущимся, или ложным, значительно опережающим истинное схватывание.

Для проверки высказанного предположения был поставлен следующий опыт. В кольца для схватывания одновременно заливались растворы одного и того же состава с той разницей, что один раствор был приготовлен с использованием обычного ОДП, а другой — тонкомолотого. Начало схватывания у раствора, содержащего тонкомолотый ОДП, составило 2 ч 40 мин против 2 ч 10 мин у раствора, приготовленного с обычным ОДП. Конец схватывания соответственно равнялся 5 ч 10 мин и 3 ч 55 мин. Результат этого опыта свидетельствует о том, что в тех случаях, когда тампонажная смесь содержит в своем составе крупнозернистые материалы, время начала схватывания цементных растворов, так же как и время начала загустевания, не может быть правильно определено с помощью существующей методики и аппаратуры.

В связи с этим С. Д. Саундерс и Ф. В. Нусбаумер предпочитают определять начало схватывания тампонажных растворов, содержащих грубодисперсные добавки, по времени максимального тепловыделения раствора в условиях, приближенных к скважинам. По их мнению, время максимума тепловыделения находится между началом схватывания и началом загустевания раствора и позволяет наиболее правильно оценивать подвижность растворов, содержащих грубодисперсные материалы.

На рис. 9 приведены характерные кривые тепловыделения для гелцементных и перлито-цементных растворов, испытанных при температуре 60°C и давлении 281 кг/см^2 . Как видно из рис. 9, максимум тепловыделения почти не зависит от состава раствора и в первую

очередь определяется вяжущей составляющей смеси. Незначительное смещение вправо максимума тепловыделения для перлито-цементных растворов (рис. 9, кривые

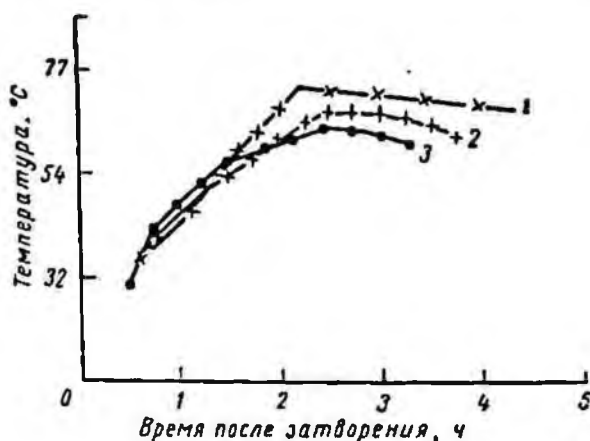


Рис. 9. Влияние состава раствора на максимум тепловыделения для условий опыта:

$t=60^{\circ}\text{C}$, $\rho=281 \text{ кг/см}^3$. 1 — глино-цементный раствор, $m_r=0,04$, $B:C=0,69$; 2 — перлито-цементный раствор, $m_r=0,04$, $m_n=0,66 \text{ м}^3/\text{т}$, $B:C=1,06$; 3 — перлито-цементный раствор, $m_r=0,04$, $m_n=1,32 \text{ м}^3/\text{т}$, $B:C=1,33$.

2 и 3) по сравнению с гелецементным (кривая 1), по-видимому, объясняется увеличением количества воды, участвующей в гидратации цемента.

Из приведенных выше рис. 7 и 8 видно, что ускоряющее и замедляющее действие некоторых добавок на сроки схватывания носит плавный характер. Причина почти линейной зависимости сроков схватывания от величины облегчающей добавки объясняется тем фактом, что между величиной добавки и содержанием воды в растворе существует прямая зависимость, вытекающая из уравнения (4).

При изучении скорости схватывания тампонажных растворов пониженной плотности было установлено, что она во многом зависит от соответствующих характеристик исходного портландцемента (табл. 21). Чем более растянутые сроки схватывания имеет взятый для эксперимента цемент (ЦХС или ЦГС) по сравнению с другими партиями, тем медленнее будет схватываться облегченный цемент, приготовленный на его основе. (Сравни-

тельные испытания, результаты которых приведены в табл. 21, осуществлялись на цементах для «горячих» скважин партий № 444 и 560.)

Таблица 21

Влияние исходного цемента на скорость схватывания
облегченных цементных растворов

($t = 75^\circ \text{C}$, $p = 1 \text{ кг/см}^2$)

Облегчающая добавка		В : Ц	Сроки схватывания, ч—мин			
наименование	количество, % от веса це- мента		начало		конец	
			ЦГС-444	ЦГС-560	ЦГС-444	ЦГС-560
—	—	0,50	2—30	1—55	3—20	2—55
Асбозурит	30	1,37	2—45	2—20	5—00	—
ОДП	50	1,25	2—15	1—45	4—00	2—30

В результате лабораторных исследований был найден общий характер изменения сроков схватывания облегченных цементных растворов в зависимости от величины водо-цементного отношения (рис. 10). Эти опыты показали, что в ряде случаев за счет правильно подобранного состава цементного раствора можно добиться необходимых сроков схватывания.

Изучение тампонажных растворов пониженной плотности нельзя считать полным, если не выяснено влияние температуры и вида облегчающей добавки на сроки схватывания. На рис. 11 показано влияние температуры на начало схватывания различных видов облегченных цементных растворов удельного веса $1,5—1,6 \text{ Г/см}^3$. Наиболее растянутые сроки схватывания имеют облегченные цементные растворы, полученные из пуццоланового портландцемента Брянского завода. Даже при динамической температуре на забое скважины 125°C они могут использоваться без замедлителей схватывания. Большинство тампонажных растворов пониженной плотности, как это видно из рис. 11, имеет сроки схватывания при температуре $100—125^\circ\text{C}$ менее $1,5—1,0 \text{ ч}$, поэтому было рассмотрено влияние некоторых замедлителей на скорость схватывания тампонажных композиций.

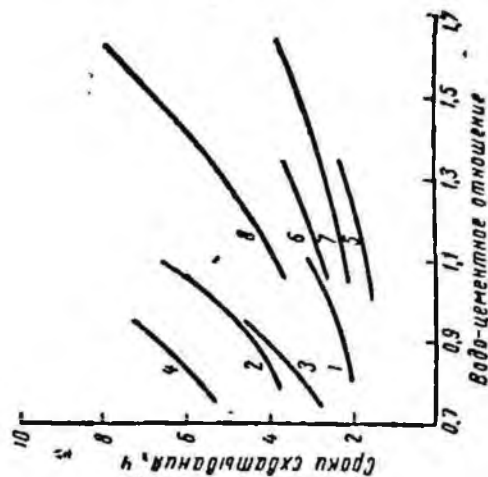


Рис. 10. Зависимость сроков схватывания облегченных цементных растворов от водо-цементного отношения.

1, 2 — диатомито-цементный раствор, $m_d=0.25$, $t=75^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$; 3, 4 — раствор из ППЦ, $t=75^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$; 5, 6 — диатомито-цементный раствор, $m_d=0.30$, КМЦ-1%, $t=125^\circ\text{C}$, $p=300 \text{ кг/см}^2$; 7, 8 — диатомито-цементный раствор, $m_d=0.40$, $t=75^\circ\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$; 1, 3, 5, 7 — начало схватывания; 2, 4, 6, 8 — конец схватывания.

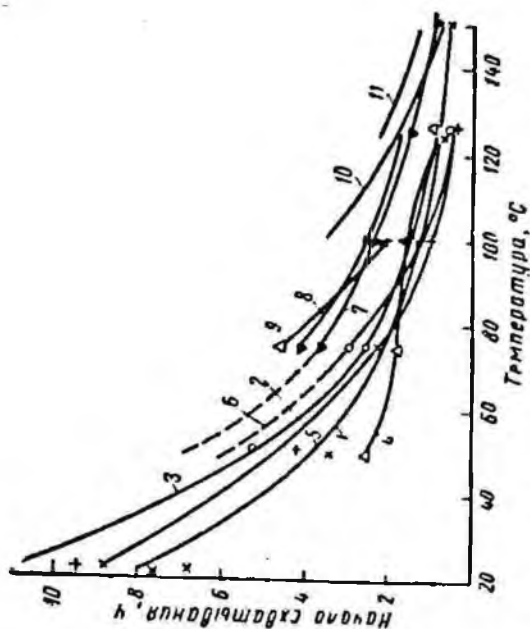


Рис. 11. Влияние температуры на сроки схватывания облегченных цементных растворов.

1 — чистый цементный раствор; 2 — раствор с добавкой ОДП; 3 — раствор с добавкой асбозурита; 4 — раствор с добавкой ВПП; 5 — раствор с добавкой диатомита; 6 — раствор с добавкой глины; 7 — раствор из ППЦ-м 300 при $B:C=1.0$; 8 — раствор из ППЦ-м 400 при $B:C=0.9$; 9 — раствор из ППЦ-м 500 при $B:C=0.9$; 10 — диатомито-цементный раствор с добавкой 1% КМЦ; 11 — раствор из ППЦ-м 300 с добавкой 1% КМЦ.

В табл. 22 приведены данные о влиянии таких замедлителей, как ССБ, КМЦ, ВКК и мелассы, на сроки схватывания,

Таблица 22

Влияние замедлителей на скорость схватывания
диатомито-цементных и пуццоланово-цементных растворов

Состав раствора					В:Ц	Условия опыта		Сроки схватывания, ч — мин	
цемент	добавка					t, °C	P, кг/см²	начало	конец
	облегчитель		замедлитель						
	наименование	количество, % от веса цемента	наименование	количество, % от веса цемента					
ЦГС	—	—	—	—	0,50	75	1	2—50	3—50
»	—	—	—	—	0,50	100	300	1—25	2—25
»	—	—	—	—	0,50	125	300	1—00	1—50
»	Диатомит	30	—	—	1,35	100	300	1—20	2—50
»	»	30	ССБ	1,0	1,20	100	300	1—15	2—15
»	»	30	КМЦ	1,0	1,20	100	300	3—30	—
»	»	30	»	1,0	1,35	100	300	3—00	—
»	»	30	—	—	1,35	125	300	1—10	2—40
»	»	30	ССБ	1,0	1,20	125	300	1—20	2—30
»	»	30	КМЦ	0,5	1,05	125	300	1—00	2—30
»	»	30	»	1,0	1,05	125	300	1—30	2—30
»	»	30	»	1,0	1,20	125	300	1—50	3—00
»	»	30	»	1,0	1,35	125	300	2—15	—
»	»	30	»	1,0	1,35	150	300	<1—10	—
»	»	30	Меласса	2,0	1,35	150	300	0—45	2—40
»	»	40	КМЦ	1,0	1,45	100	300	2—15	—
»	»	50	—	—	1,20	100	300	1—00	2—00
»	»	50	—	—	1,20	125	300	0—50	1—30
»	»	75	—	—	1,55	100	300	0—55	1—20
»	»	75	—	—	1,55	125	300	0—30	1—00
ПЩ. м300	—	—	—	—	1,00	125	300	1—30	2—40
»	—	—	ССБ	1,0	1,00	125	300	<1—30	2—00
»	—	—	КМЦ	0,5	1,00	125	300	1—45	2—25
»	—	—	»	1,0	1,00	125	300	2—05	2—40
»	—	—	—	—	1,00	150	300	0—55	1—25
»	—	—	ССБ	1,0	1,00	150	300	0—35	1—05
»	—	—	КМЦ	1,0	1,00	150	300	>2—00	—
»	—	—	»	0,5	1,00	150	300	0—55	1—20
»	—	—	ВКК	0,5	1,00	150	300	<0—40	1—30

тивания термостойких цементных растворов пониженного удельного веса. Как видно из табл. 22, наиболее эффективным замедлителем схватывания диатомито-цементных и пуццоланово-цементных растворов является КМЦ. При введении в раствор 1% КМЦ от веса цемента схватывание наступает в сроки, допустимые для успешного проведения цементировочных работ при динамических температурах на забое скважины 120°C и даже 150°C (ППЦ-м300).

Конец схватывания у облегченных цементных растворов в большинстве случаев более продолжительный, чем у чистых цементных. Этот факт особенно наглядно проявляется при низких температурах твердения (20—50°C).

Для ускорения схватывания тампонажных растворов пониженной плотности при температурах 20—50°C следует рекомендовать добавление к воде затворения небольших количеств известных ускорителей (CaCl_2 , NaCl , Na_2SiO_3 и др.).

Таким образом, исследование скорости схватывания облегченных тампонажных растворов позволяет сделать следующие выводы.

1. Сроки схватывания облегченных цементных растворов и характер их изменения в зависимости от температуры, давления, водо-цементного отношения и ряда других причин подчиняются общим закономерностям, полученным при исследовании цементных растворов.

2. Время начала схватывания в первую очередь определяется соответствующим параметром исходного цемента. Конец схватывания, как правило, наступает в более поздние сроки, чем у чистого цементного раствора.

3. Цементные растворы, приготовленные на базе тампонажного портландцемента и облегчающих добавок с водопотребностью выше 1,5—2,0 $\text{см}^3/\text{г}$, имеют более поздние сроки схватывания, чем чистый цементный раствор.

4. Цементные растворы, у которых в качестве облегчающих добавок используются материалы с водопотребностью менее 1,5—2,0 $\text{см}^3/\text{г}$, имеют более ранние сроки начала схватывания (при $T=75^\circ\text{C}$), чем исходный тампонажный цемент при $B : Ц = 0,5$.

5. С увеличением содержания облегчителя в составе раствора в зависимости от его вида и водопотребности

наблюдается линейное ускорение или замедление начала схватывания.

6. Эффективным замедлителем схватывания для диатомито-цементных и пуццоланово-цементных растворов, твердеющих при температуре 100—150°C, является КМЦ.

Водоотдача

Существенное влияние на качество цементировочных работ в скважине оказывает водоотдача тампонажного раствора. Чем больше уходит воды из раствора в процессе цементирования, тем существеннее изменяются параметры тампонажного раствора. Раствор становится густым, вследствие чего ускоряются сроки схватывания и загустевания, ухудшаются условия его продавливания. Все это ведет к снижению качества изоляционных работ в скважине.

Известно, что в лабораторных опытах чистый цементный раствор даже при малом перепаде давления в течение первых пяти минут может отделить до 90% воды. При перепаде давления 7 кг/см^2 водоотдача, приведенная методом экстраполяции к 30 мин, составляет 600—1000 см^3 .

Водоотдача тампонажных растворов пониженной плотности изучалась нами с помощью прибора ВМ-6. В табл. 23 приведены значения водоотдачи различных видов облегченных тампонажных растворов в сравнении с водоотдачей чистых цементных растворов. Как видно из табл. 23, водоотдача раствора, замеренная через глинистую корку, на 2—3 порядка ниже, чем у того же раствора, испытанного при фильтрации его через обычный бумажный фильтр. Причем величина водоотдачи зависит от плотности корки. Чем плотнее корка, тем ниже водоотдача, и наоборот.

Для снижения водоотдачи цементных растворов прибегают к различным способам. Так, в зарубежной практике [29] используют многочисленные добавки. В ряде случаев для снижения водоотдачи рекомендуются тампонажные смеси, характеризующиеся повышенной удельной поверхностью [32]. Эффективной добавкой для снижения водоотдачи считается бентонитовая глина. При увеличении ее содержания в растворе с 12 до 25% от веса цемента водоотдача, определяемая по методике АНИ, снижается с 340 до 120 см^3 за 30 мин.

Таблица 23

Влияние состава раствора на величину водоотдачи

Состав раствора			В : Ц	Водоотдача, см ³ за 30 сек		
цемент	добавка	количество, % от веса цемента		через бумажный фильтр	через глинистую корку толщиной 3 мм	через глинистую корку толщиной 5 мм
	наименование					
ЦГС	—	—	0,50	600—1000	5—7	10—15
»	Асбозурит	30	1,40	1800	6,0	—
ЦГС*	»	30	1,40	950	3,5	—
ЦГС	Глинопорошок	10	0,70	—	8,5	15,5
»	»	30	1,10	—	7,5	17,0
»	»	4	0,60	—	7,0	13,0
»	Перлит	5	0,75	—	6,0	12,0
»	»	10	0,90	—	6,0	12,0
»	»	15	1,10	—	7,0	13,0
»	»	20	1,40	2640	5,5	12,0
ПЦЦ-м400	—	—	0,80	605	—	—
»	—	—	0,90	1000	—	—
»	Жидкое стекло	3	0,90	947	—	—
»	То же	3	0,90	846	—	—

* Раствор перед определением водоотдачи перемешивался в течение 10 мин при $n = 900$ об/мин.

Всесторонние исследования водоотдачи тампонажных растворов, в том числе и облегченных, проведены Л. Н. Шадринным [32]. Им установлено, что введение в цементные растворы тонкодисперсных (бентонит, трепел) и волокнистых (асбозурит) материалов сопровождается понижением водоотдачи. Заметное влияние на снижение водоотдачи облегченных растворов оказывает их перемешивание (см. табл. 23).

Таким образом, проведенный выше анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Величина водоотдачи тампонажных растворов пониженной плотности находится на уровне водоотдачи стандартных тампонажных растворов нормальной плотности.

2. Облегченные цементные растворы с точки зрения водоотдачи следует считать пригодными для цементирования скважин.

Закупоривающая способность

В ряде случаев замена тампонажного раствора нормального удельного веса на раствор плотностью 1,4—1,6 г/см³ не дает желаемых результатов. Это наблюдается, когда разрез скважин представлен трещиноватыми и кавернозными отложениями или породами, предрасположенными к гидравлическому разрыву пластов в процессе проведения цементировочных работ. Происходит поглощение цементного раствора, которое, по мнению И. Н. Багби, имеет место в том случае когда давление столба раствора превышает пластовое, а размер пор примерно в 3 раза больше размера наиболее крупных частиц, содержащихся в растворе. К такому же выводу приходит Б. К. Грин, считающий, что поглощение возникает там, где размер твердых частиц в растворе составляет менее $\frac{1}{3}$ размера канала в породе. Очевидно, что для устранения поглощения необходимо, чтобы размер частиц в растворе был не менее $\frac{1}{3}$ размера пластовых пор. Большинство частиц твердой фазы раствора имеет диаметр 70 мк и более. Эти частицы могут быть поглощены лишь в случае, если диаметр каналов в пласте будет более 210 мк. Такой размер поровых каналов соответствует проницаемости порядка 325 д. А поскольку известно, что проницаемость большинства пород не превышает 3—4 д, очевидно, что поглощение раствора происходит только в зонах с относительно крупными каналами.

Поглощение может наблюдаться и в скважинах, в разрезе которых отсутствуют сильно проницаемые или кавернозные породы. В этих случаях раствор уходит в пластовые трещины или в трещины разрыва пород, возникающие с увеличением давления.

Часто существующие в породах трещины при обычных условиях непроницаемы. Если давление достигает критических величин или превышает его, трещина раскрывается и начинается поглощение раствора. Интенсивность поглощения возрастает под воздействием размыва и расширения трещины.

Для повышения качества цементируемых работ в скважинах, разрезы которых представлены трещиноватыми и кавернозными породами, в зарубежной практике используются так называемые закупоривающие материалы.

Применение в качестве облегчающих добавок материалов, характеризующихся повышенной закупоривающей способностью, позволяет устранить поглощение тампонажных растворов там, где только снижение удельного веса не дает положительных результатов. Использование облегчителей, обладающих повышенной закупоривающей способностью, не требует чрезмерного снижения удельного веса тампонажного раствора, что в свою очередь ведет к получению в затрубном пространстве более прочного цементного камня.

Облегчающие добавки этого вида могут быть разделены на две основные группы: зернистые и волокнистые.

К группе зернистых материалов следует отнести вспученный перлитовый песок, обожженный диатомитовый песок, каменный уголь, гильсонит, кокс и др.

В группу волокнистых облегчителей следует включить асбозурит, асбест и др.

О закупоривающей способности зернисто-волокнистых материалов свидетельствуют лабораторные и промышленные исследования, проведенные рядом авторов. Так, опытами, проведенными в США, установлено, что перлитовые частицы выдерживают давление до 140 кг/см^2 для условий, когда трещины или отверстия составляют 3,2 мм.

В табл. 24 приводится характеристика закупоривающей способности пяти цементных смесей. Подобные исследования были проведены и при диаметре опытных отверстий 4,3 мм. Результаты получены аналогичные. Из табл. 24 видно, что при введении в тампонажную смесь 0,223 м³ ВПП на 1 т цемента раствор приобретает повышенную закупоривающую способность. В случае разрушения закупоренной зоны новое закупоривание наступает немедленно и без значительных потерь цементного раствора.

Закупоривающая способность ВПП, несмотря на низкую механическую прочность его зерен, отмечается и Г. Н. Гельфманом.

Таблица 24

Влияние состава смеси на закупоривающую способность растворов

Состав раствора			В : Ц	Диаметр опытных отверстий, мм	Результаты опыта
цемент	содержание бен-тонита, % от веса цемента	содержание пер-лита, м ³ /т цемента			
ASTM тип I	—	—	0,49	3,2	Раствор течет при перепаде давления 1,7 кг/см ²
То же	4	—	0,69	3,2	То же
»	4	0,223	0,86	3,2	Раствор не течет при перепаде давления до 140 кг/см ²
»	4	0,331	0,95	3,2	То же
»	4	0,665	1,22	3,2	»

Рекомендованный нами в качестве облегчающей добавки обожженный диатомовый песок (ОДП) как закупоривающий материал, по-видимому, является более эффективным, чем ВПП. Основанием для такого заключения являются более высокая прочность зерен ОДП по сравнению с ВПП (10—20 кг/см² на сжатие у ОДП против 2—5 кг/см² у ВПП) и наличие в ОДП частиц песка размером от 0,001 до 5—10 мм.

Разработанные авторами цементные растворы пониженной плотности на базе тампонажного портландцемента и облегчителей зернисто-волокнуистого типа (ОДП и асбозурит) позволили улучшить качество цементировочных работ на скважинах Октябрьской площади (трест Крымнефтегазразведка). Так, при цементировании эксплуатационной колонны диаметром 127 мм на скв. 9 впервые на данной площади удалось произвести подъем цементного раствора на высоту более 2500 м, против 400—800 м при цементировании обычными растворами.

С успехом были испытаны и асбозурито-цементные растворы на скв. 11 Октябрьская и скв. 3 Кировская.

Таким образом, использование в качестве облегчающих добавок зернисто-волокнуистых материалов позволяет успешно осуществлять цементировочные работы при разобщении трещиноватых, кавернозных пластов и пород, предрасположенных к гидроразрыву пластов.

Прочность цементного камня

Важнейшим свойством цементного раствора является то, что в процессе твердения он превращается в камневидное тело — цементный камень без заметного изменения в объеме, обладающий значительной прочностью, плотностью, непроницаемостью, устойчивостью к агрессивным средам и рядом других необходимых свойств. Причем совершенно очевидно, что высокая прочность камня, как правило, предопределяет достаточную плотность, водо- и газонепроницаемость и ряд других ценных качеств.

В настоящее время механическая прочность цементного камня является наиболее важным свойством, определяющим пригодность тампонажного раствора для разобщения пластов в скважинах. Вопрос о необходимой прочности цементного камня в скважине еще окончательно не решен, но очевидно, что высокие требования, предъявляемые к механической прочности заводских тампонажных портландцементов, не следует сопоставлять с прочностью камня, реализуемого в скважинах.

В последние годы исследованию прочности цементного камня в условиях скважины уделяется большое внимание. Такие работы в значительных объемах ставились как в нашей стране, так и за рубежом.

Обобщив результаты многочисленных исследований, а также проведя детальный анализ теоретических, экспериментальных и промысловых работ, А. И. Булатов пришел к выводу, что качественное разобщение продуктивных горизонтов вполне может быть обеспечено применением цемента, дающего камень с пределом прочности 15 кг/см^2 при изгибе или 50 кг/см^2 при сжатии.

Согласно последним исследованиям, проведенным в США [25], цементный камень в условиях скважины к началу возобновления работ в колонне должен иметь прочность при сжатии не ниже 35 кг/см^2 , а к моменту сдачи скважины в эксплуатацию — не менее 70 кг/см^2 .

Авторами было принято, что если облегченный тампонажный раствор, затвердевая, превращается в камень с прочностью на сжатие не менее 50 кг/см^2 или прочностью на изгиб 15 кг/см^2 , то его можно считать пригодным для цементирования скважин.

В 1967 г. были утверждены технические условия на

портландцемент тампонажный облегченный —
 ТУ-21-1-6-67. Этими ТУ раствор облегченного тампонаж-
 ного цемента предусмотрен с удельными весами менее
 $1,45 \text{ Г/см}^3$, $1,45\text{—}1,55 \text{ Г/см}^3$ и $1,55\text{—}1,65 \text{ Г/см}^3$. Проч-
 ность на изгиб цемента для «горячих» скважин у рас-
 творов удельного веса более $1,45 \text{ Г/см}^3$ должна быть не
 менее 15 кг/см^2 . Это требование хорошо согласуется
 с принятой нами прочностью на изгиб еще до утверж-
 дения ТУ-21-1-6-67.

Современный уровень знаний еще не позволяет с до-
 статочной точностью предвидеть прочность многокомпо-
 нентного цементного раствора, твердеющего в сложных
 условиях. Однако в работах Т. Пауэrsa, И. Н. Ахвер-
 дова, К. Гродде предполагаются эмпирические зависи-
 мости, дающие удовлетворительное совпадение факти-
 ческих данных с расчетными.

В общем виде прочность облегченного цементного
 камня может быть выражена такой зависимостью:

$$R = f(R_{\text{ц}}, B : \text{Ц}, K, P, \rho), \quad (13)$$

где $R_{\text{ц}}$ — прочность исходного цемента при $B : \text{Ц} = 0,5$,
 твердеющего в тех же условиях, что и облегченный це-
 ментный раствор, в кг/см^2 ; $B : \text{Ц}$ — отношение весового
 количества воды к весовому количеству сухого цемента
 (без учета облегчающих добавок); K — параметр, учи-
 тывающий влияние облегчающей добавки на прочность
 цементного камня; P — условия твердения раствора;
 ρ — условия приготовления раствора.

Если принять, что K для конкретной партии облегчи-
 теля изменяется в сравнительно узких пределах, а усло-
 вия приготовления и твердения цементного раствора по-
 стоянны, то прочность цементного камня может быть
 выражена более простой зависимостью

$$R = f(R_{\text{ц}}, B : \text{Ц}). \quad (14)$$

Из рассмотрения экспериментальных данных, приве-
 денных на рис. 12 видно, что большинство кривых с дос-
 таточной точностью может быть записано уравнением
 следующего вида:

$$R = \frac{R_{\text{ц}}}{N (B : \text{Ц})^m}, \quad (15)$$

где R ; $R_{\text{ц}}$; $B : \text{Ц}$ — то же, что и в формуле (13); N и
 m — эмпирические коэффициенты, учитывающие влия-

ные качества цемента и облегчителя на прочность цементного камня.

Значения N и m , найденные по экспериментальным данным (табл. 25), позволяют с достаточной точностью

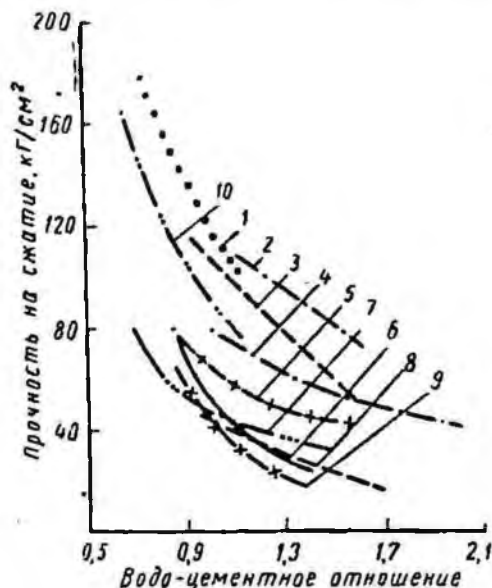


Рис. 12. Изменение прочности облегченных цементов в зависимости от водо-цементного отношения.

1 — ППЦ-м 400; 2 — ЦГС + трепел, $K_T=2,5$; 3 — ЦГС + диатомит, $K_D=2,5$; 4 — ЦГС + ОДП, $K_O=1,5$; 5 — ЦГС + асбозурит, $K_{ас}=3,2$; 6 — ЦГС + чашовъярский глинопорошок, $K_r=4,5$; 7 — ЦГС + ВПП, $K_n=4,0$; 8 — ЦГС + глино-порошок, $K_r=2,5$; 9 — ЦГС + асбест V сорта, $K_a=5,5$; 10 — ЦГС + зола-унос, $K_z=0,8$.

не только рассчитывать прочность облегченного цементного камня, но и определять предельно допустимую величину облегчающей добавки m_d . Решая уравнение (15) относительно $B : C$ и подставляя вместо водо-цементного отношения правую часть выражения $B : C = K_d + m_d K_d$ находим

$$m_d = \frac{\sqrt[m]{\frac{R_{ц}}{NR}} - K_{ц}}{K_d}. \quad (16)$$

Таблица 25

Эмпирические коэффициенты N , m и граничные условия В:Ц
 для справедливости функции вида $R = \frac{R_{ц}}{N (В:Ц)^m}$

Состав смеси			N	m	В : Ц	
цемент	облегчающая добавка	водопотреб- ность, см. ³ /г			от	до
	наименование					
ЦГС	Асбозурит	3,2	3,5	1,5	0,5	1,5
»	Асбест V сорта	5,5	5,5	3,0	0,7	1,5
»	Глинопорошок махарад- зевский	2,5	5,0	2,0	0,8	1,7
»	Глинопорошок часовъяр- ский	4,5	4,5	3,0	0,8	1,5
»	ВПП	4,0	3,0	1,5	0,7	1,
»	ОДП	1,5	3,0	1,0	1,0	2,0
»	Зола-унос	0,8	2,5	1,5	0,7	1,1
»	Диатомит	2,5	2,3	1,3	0,9	1,6
»	Трепел	2,5	2,1	0,9	0,8	1,6
ППЦ-М400	—	—	116*	1,2	0,7	1,1

* Приведено значение $R_{ц}/N$.

Зная водопотребность цемента и облегчителя $K_{ц}$, $K_{д}$, прочность исходных цемента $R_{ц}$ при В:Ц=0,5, требования к прочности облегченного цементного камня R и эмпирические коэффициенты m и N , нетрудно найти $m_{д}$. Определив $m_{д}$, можно подсчитать минимальное значение удельного веса раствора, который после затвердевания будет иметь камень с требуемой механической прочностью.

Непрерывность функции вида $R=f(R_{ц}, В:Ц)$ прослеживается при некоторых граничных значениях В:Ц, приведенных в табл. 25.

Из уравнения (13) следует, что механическая прочность облегченного цементного камня зависит от многих факторов. Рассмотрим важнейшие из них.

Прочность исходного цемента. Поскольку прочность цементного камня и другие его свойства зависят от количества гидратированного и связанного материала, то очевидно, что на прочность облегченных цементов суще-

ственное влияние оказывает качество исходного тампонажного портландцемента. Влияние исходного цемента на прочность облегченных цементных камней хорошо видно из опытных данных, приведенных на рис. 13 и 14.

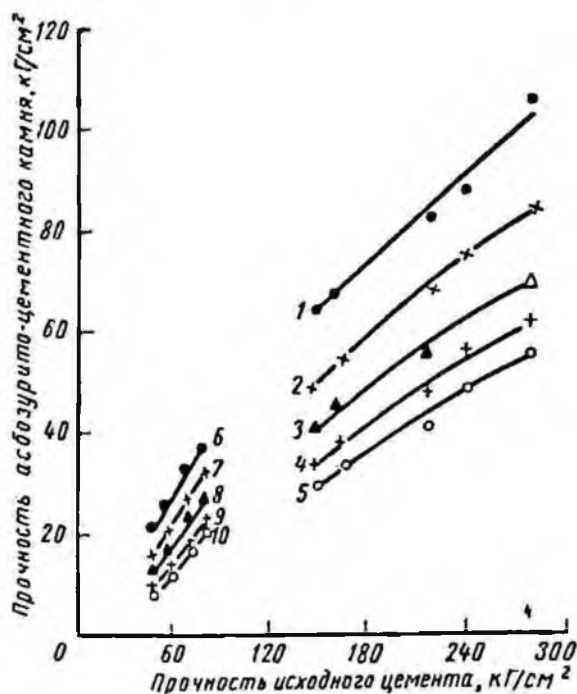


Рис. 13. Изменение прочности асбозурито-цементного камня в зависимости от прочности чистого цементного камня. Условия твердения:

7—48 ч, $t=75^{\circ}\text{C}$, $p=1 \text{ кг/см}^2$. 1, 2, 3, 4, 5 — при сжатии; 6, 7, 8, 9, 10 — при изгибе; 1, 6 — ЦГС+10% асбозурита; 2, 7 — ЦГС+15% асбозурита; 3, 8 — ЦГС+20% асбозурита; 4, 9 — ЦГС+25% асбозурита; 5, 10 — ЦГС+30% асбозурита.

Так, например, асбозурито-цементный раствор, содержащий в своем составе 10 и 20% асбозурита от веса цемента, в зависимости от прочности исходного цемента при $B:Ц=0,5$, затвердевая, превращается в камень с прочностью при сжатии от 65 до 105 кг/см^2 (10% асбозурита) и от 42 до 70 кг/см^2 (20% асбозурита). Прочность при изгибе соответственно изменится с 22 до 37 кг/см^2 и с 13 до 26 кг/см^2 . Эти наблюдения свидетельствуют о том, что при выборе цемента, предназначенного для приготовления облегченных тампонажных

растворов, предпочтение следует отдавать тем партиям, которые имеют наиболее высокую механическую прочность при $B : Ц = 0,5$.

Вид и качество облегчающих добавок. Совершенно очевидно, что вводимая в тампонажную смесь добавка

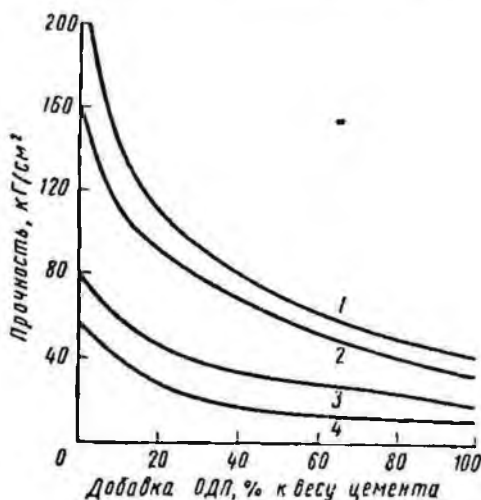


Рис. 14. Влияние ОДП на прочность цементного камня при сжатии 1, 2, и изгибе 3, 4. Образцы выдерживались в течение двух суток при $t=75^{\circ}\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$; 1, 3 — ЦГС (партия цемента № 583); 2, 4 — ЦГС (партия цемента № 444).

влияет не только на удельный вес раствора, но и на механическую прочность цементного камня. Если изменение плотности раствора в первую очередь зависит от водопотребности облегчителя, его содержания в растворе и удельного веса, то изменение прочности цементного камня носит более сложный, а иногда и противоречивый характер. На рис. 15 показано изменение механической прочности цементных камней в зависимости от содержания облегчителя в растворах, твердеющих в течение двух суток при температуре 75°C и атмосферном давлении.

На рис. 15 видно, чем больше облегчителя введено в смесь, тем ниже прочность цементных камней. Этот рисунок иллюстрирует и характер изменения прочности в зависимости от содержания добавки.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 15, не дают полного представления о влиянии вида и качества облегчителей на прочность цементных камней, так как добавки различаются по водопотребности и удельному весу.

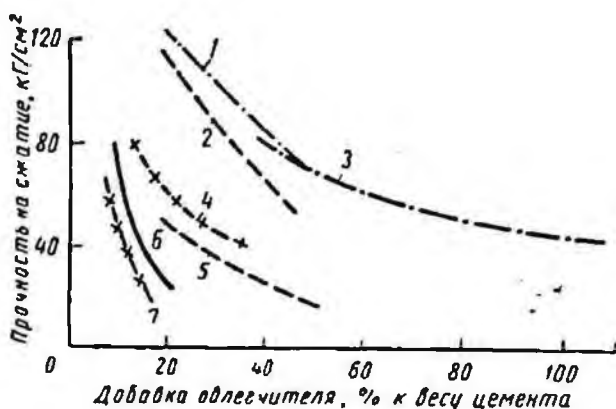


Рис. 15. Изменение прочности цементного камня в зависимости от содержания облегчителя.
1 — ЦГС+гипс; 2 — ЦГС+диатомит; 3 — ЦГС+ОДП; 4 — ЦГС+асбозурит; 5 — ЦГС+глинопорошок, $K_g=2,5$; 6 — ЦГС+глинопорошок, $K_g=4,5$; 7 — ЦГС+асбест V сорта.

Для сравнительной характеристики влияния той или иной добавки на механическую прочность цементного камня были поставлены опыты с девятью различными добавками. Во всех случаях облегченные цементные растворы были получены из тампонажного цемента для «горячих» скважин и 25% облегчителя от веса цемента при $B : Ц = 1,0$ (табл. 26).

Как видно из данных табл. 26, растекаемость и удельный вес растворов изменяются в небольших пределах (за исключением смесей, содержащих асбест и ВПП). Прочность цементных камней на сжатие через двое суток твердения при температуре 75°C и атмосферном давлении колебалась от 30 до 93 кг/см². Наиболее высокой прочностью обладают цементные камни, содержащие в своем составе диатомит и ОДП. Причем прочность диатомито-цементного камня выше, чем камня, приготовленного с использованием ОДП. Это свидетельствует о том, что термическое воздействие, оказываемое на диа-

Таблица 26

Влияние вида облегчающей добавки на прочность при сжатии цементного камня, приготовленного из цемента для «горячих» скважин

Облегчающая добавка*	Водопотребность, $\text{см}^3/\text{г}$	В: Ц	Растекаемость, см	Удельный вес, $\text{г}/\text{см}^3$	Прочность, $\text{кг}/\text{см}^2$
—	—	0,5	23,5	1,84	145
Асбест V сорта	2,0	1,0	$<11,0$	1,57	30
Асбозурит	2,0	1,0	18,0	1,58	52
Глинопорошок горбский	2,0	1,0	$>26,0$	1,58	47
Глинопорошок махарадзевский	2,0	1,0	23,5	1,58	37
Глинопорошок часовьярский	2,0	1,0	22,0	1,59	41
Глинопорошок черкасский	2,0	1,0	25,0	1,59	36
Диатомит	2,0	1,0	24,0	1,58	93
ОДП	2,0	1,0	25,0	1,57	73
ВПП**	2,0	1,0	$22,0/ <11,0$	1,57	41

* Раствор содержал 25% облегчающей добавки от веса цемента.

** Дробное значение растекаемости у раствора с добавкой ВПП означает: в числителе — начальную растекаемость и в знаменателе — растекаемость после обработки раствора давлением $100 \text{ кг}/\text{см}^2$.

томит в процессе его обжига и получения ОДП, в меньшей степени влияет на прочность облегченного цементного камня, чем тонкость помола облегчителя. В наших опытах пробы диатомита и ОДП имели удельную поверхность соответственно $17\,000$ и $6000 \text{ см}^2/\text{г}$ (по ПСХ-2).

Влияние тонкости помола добавки на прочность цементного камня иллюстрируется данными, приведенными в табл. 27. Так, прочность диатомито-цементного камня состава цемент : диатомит : вода = $1 : 0,3 : 0,9$, приготовленного с использованием диатомита различной удельной поверхности (1400 и $20\,000 \text{ см}^2/\text{г}$), в полтора раза выше там, где облегчитель имел более высокую степень помола. Данное положение характерно и для растворов, содержащих 50% диатомита от веса цемента. Аналогичные выводы могут быть сделаны, когда в качестве облегчающей добавки используется такой высокоактивный гидравлический материал, как трепел.

В меньшей степени дополнительный помол облегчителя влияет на прочность цементных камней, содержащих

в своем составе асбозурит и ОДП (см. табл. 27). Прочность камня, приготовленного с использованием ВПП, тем больше, чем выше объемный вес перлита. Некоторый рост прочности в этом случае, по-видимому, является следствием более высокой прочности перлитовых зерен, участвующих в образовании скелета цементного камня.

Влияние высокой температуры. Известно, что с повышением температуры твердения портландцементных растворов процессы гидратации и гидролиза цемента заметно интенсифицируются. Более того, повышение температуры выше какого-то предела сопровождается не только ускорением процессов гидратации, но и существенным снижением механической прочности цементных камней, а также увеличением их проницаемости.

Н. С. Дон [15], ссылаясь на работы зарубежных исследователей [36], отмечает, что падение прочности тампонажных портландцементов наблюдается при температурах твердения свыше $82,2^{\circ}\text{C}$. Об этом же свидетельствуют и данные советских исследователей [7] (рис. 16, кривая 1).

По мнению Г. Картера и Д. Смита область критических температур для портландских цементов начинается со 110°C , но наибольшее снижение прочности цементного камня происходит при температуре свыше 127°C . Обширные исследования, проведенные этими авторами с цементами 15 различных составов, испытанных при температурах 93, 110, 127, 143, 160°C и длительности хранения 1, 3, 7, 28, 60, 90 и 180 суток, позволили сделать следующие выводы.

Большинство цементных составов при температуре 110°C приобретает максимальную прочность на третьи—седьмые сутки твердения, после чего в течение 180 суток прочность цементного камня меняется незначительно. Исключением являются лишь пуццолановые цементы, прочность которых непрерывно повышается даже после 90 суток твердения.

При температуре 127°C наблюдается снижение прочности камня многих цементных смесей. Прочность цементов, в состав которых входят пуццоланы, портландцемент и замедлитель, продолжает медленно увеличиваться при повышении температуры до 143°C и после этого начинает снижаться.

Таблица 27

Влияние тонкости помола материала и объемного веса ВПП на прочность цементного камня

цемент	Состав раствора				краткая характеристика	количество, % от веса цемента	Водопоглощаемость, см ³ /г	В: Ц	Растекаемость, см		Удельный вес, г/см ³	Двухсуточная прочность (t = 75° C), кг/см ²	
	наименование	облегчающая добавка	начальная	после обработки давлением					на изгиб	на сжатие			
ЦГС	Асбозурит	•	•	•	Обычный	20,0	3,00	1,00	25,0	20,0	1,55	18	45
	»	•	•	•	Молотый	20,0	3,00	1,00	23,0	17,5	1,55	25	62
	Диазомит	•	•	•	S = 1400	30,0	1,35	0,90	22,5	—	1,64	20	71
	»	•	•	•	S = 7000	50,0	1,20	1,10	18,5	—	1,59	31	103
	»	•	•	•	S = 17000	50,0	1,40	1,20	19,0	—	1,55	26	101
	»	•	•	•	S = 20000	30,0	1,35	0,90	18,0	—	1,64	31	100
	»	•	•	•	S = 20000	30,0	2,80	1,35	< 26,0	—	1,49	29	72
	»	•	•	•	S = 22000	50,0	1,50	1,25	19,5	—	1,52	28	120
	ОДП	•	•	•	Обычный	30,0	1,50	0,95	20,0	—	1,60	21	66
	ОДП	•	•	•	Молотый	30,0	1,75	1,025	22,5	—	1,57	19	60
ЦХС	ВПП	•	•	•	γ ₀ = 0,06	5,4	10,00	0,99	25,0	18,0	1,53	18	44
	»	•	•	•	γ ₀ = 0,14	14,2	4,00	1,12	24,0	17,5	1,57	20	61
	»	•	•	•	γ ₀ = 0,26	26,0	2,30	1,10	21,0	17,0	1,56	22	70
	ВПП	•	•	•	γ ₀ = 0,47	47,0	1,10	0,95	21,0	18,0	1,59	20	98
ЦГС	Трепел первозановский	•	•	•	S = 9500	20,0	1,50	0,70	19,0	—	1,73	36	139
	Трепел брянский	•	•	•	S = 20500	21,0	2,50	0,92	< 25,0	—	1,60	20	122

Примечание. S — удельная поверхность добавки по ПСХ-2; γ₀ — объемный вес вспученного перлита. Прочность перлитов-цементных растворов, содержащих помимо перлита 4% глинозорошка от веса цемента, определялась по образцам, хранившимся в течение 7 суток при t = 22° C.

Причины падения прочности портландских цементов еще полностью не выяснены, но, очевидно, существенное влияние оказывают следующие факторы. В процессе гидратации и гидролиза цементного клинкера выделяется

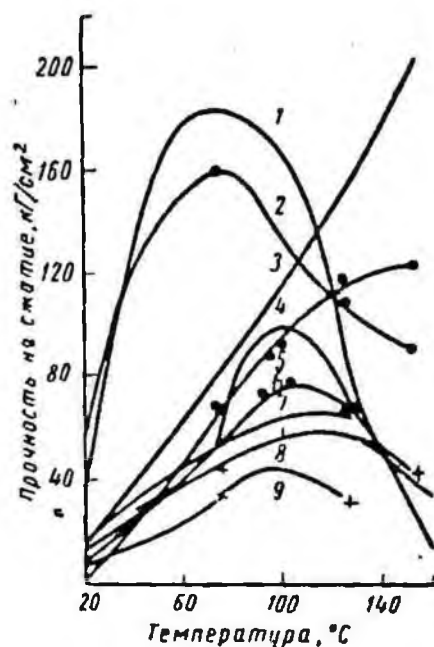


Рис. 16. Влияние температуры твердения на одноосную прочность цементного камня.

1 — ЦГС, В : Ц = 0,5 (по данным А. И. Булатова [7]); 2 — ЦГС, В : Ц = 0,5; 3 — ЦГС+диатомит, $m_d = 0,25$, $K_d = 2,0$; 4 — ЦГС+ОДП, $m_o = 0,5$, $K_o = 1,5$; 5 — ППЦ-м 300, В : Ц = 0,9; 6 — АСТМ = А + бентонит, $m_b = 0,12$, $K_b = 5,0$; 7 — ЦГС+ВПП, $m_v = 0,10$, $K_v = 4,0$; 8 — ЦГС+глинопорошок, $m_r = 0,3$, $K_r = 2,0$; 9 — ЦГС+асбозурит, $m_{ac} = 0,25$, $K_{ac} = 3,2$.

значительное количество свободного гидрата окиси кальция, который оказывает большое влияние на процессы коррозии цементного камня в водных условиях. Гидрат окиси кальция является наиболее растворимым компонентом цементного камня и легко выносится водой, окружающей камень. Повышение температуры заметно интенсифицирует образование в цементном камне свобод-

ного гидрата окиси кальция. Так, при температуре 60°C в цементном камне содержится до 12% свободной извести. Цементный камень, полученный из 28,3 л чистого цементного раствора удельного веса 1,94 г/см³ и выдержанный при температуре 160°C, дает 6,65 кг свободной извести, т. е. 17% от веса цементного раствора [15].

Таким образом, первым вероятным фактором, оказывающим существенное влияние на падение механической прочности цементных камней, твердеющих при высоких температурах, является повышенная концентрация свободной извести в цементном камне.

По данным рентгеноструктурных анализов установлено, что все цементные камни, имеющие низкую прочность при сжатии и высокую проницаемость, содержат хорошо выкристаллизованный двухкальциевый силикат- α -гидрат. Причем, чем выше концентрация указанной фазы двухкальциевого гидросиликата в цементном камне, тем ниже его прочность. В то же время в образцах цементного камня, твердеющего при температуре 82,2°C, наличие двухкальциевого силикат- α -гидрата не обнаружено после 150 суток хранения. Это является подтверждением того, что двухкальциевый силикат- α -гидрат является соединением, оказывающим отрицательное воздействие на механическую прочность цементных камней, твердеющих в условиях высоких температур.

Для устранения вредного влияния высоких температур (свыше 100°C) на механическую прочность цементных камней используются различные материалы — стабилизаторы прочности. К таким материалам относятся активные минеральные добавки (пуццоланы), тонкомолотый кварцевый песок (силикатная мука) и искусственные пуццолановые материалы. Пуццолановые добавки содержат в своем составе кремнезем в аморфном состоянии, который является активным по отношению к извести и образует с ней нерастворимые в воде гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, способствующие повышению прочности камня.

В связи с тем, что значительная часть облегчающих материалов содержит в своем составе до 60—75% кремнезема, а некоторые из них являются активными минеральными добавками, было рассмотрено влияние температуры на характер изменения механической прочности различных видов облегченных растворов (рис. 16). При

этом установлено, что механическая прочность увеличивается по мере подъема температуры до 100°C . Последующее увеличение температуры ведет в ряде случаев к снижению суточной прочности облегченных цементов. Тампонажные растворы, у которых в качестве облегчителя используется активная минеральная добавка и ее содержание в растворе достаточно для полного связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$, при затвердевании превращаются в камни, прочность которых увеличивается при подъеме температуры вплоть до 150°C .

Падение прочности у растворов, которые содержат ВПП, асбозурит, объясняется тем фактом, что как ВПП, так и асбозурит, во-первых, являются грубодисперсными материалами и, во-вторых, их содержание в смеси, по-видимому, недостаточно для полного связывания свободной извести.

Как будет показано ниже, повышение степени дисперсности ОДП и ВПП, а также увеличение их содержания в растворе способствуют получению высокопрочного цементного камня при температуре 150°C .

Механизм действия активной минеральной добавки на прочность портландцемента, твердеющего при высоких температурах, рассматривался многими исследователями. Еще в 1934 г. Мензель показал, что добавка кварцевого песка к цементу, твердеющему при температуре 180°C , значительно повышает прочность камня. Им же было установлено, что в зависимости от дозировки песка меняется величина прочности. Так, при введении в состав раствора не более 10% песка от веса цемента прочность снижается по сравнению с чистым цементом. Максимальная прочность отмечается при добавке 30% песка от веса цемента.

Пэтчен установил, что введение в тампонажный цемент свыше 35% тонкомолотого кварцевого песка позволяет предупредить снижение прочности цементных камней, твердеющих при температуре 160°C .

Работами советских исследователей было выяснено, что при малых дозировках песка он весь связывается с выделяющейся при гидратации цемента известью и образует двухкальциевый гидросиликат $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$, который снижает прочность камня. При содержании кремнезема в смеси большем, чем может связаться с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до образования $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$, начинается реакция этого ми-

перала с песком с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция, являющихся основными носителями прочности цементного камня.

Оптимальное содержание минеральной добавки в растворе определяется в зависимости от качества и состава исходного цемента, а также от активности или реакционной способности кремнезема добавки. В свою очередь реакционная способность облепчителя зависит от тонкости его помола. Чем тоньше помол добавки, тем она активнее по поглощению извести. Грубодисперсные частицы являются инертными и не взаимодействуют с продуктами гидратации цемента. Именно этим фактом можно объяснить снижение прочности цементных камней, содержащих в своем составе до 30% ОДП (рис. 16). Известно, что обожженный диатомовый песок содержит большое количество крупных частиц. Повышая содержание ОДП в смеси до 50—100% или используя тонкомолотый обожженный диатомит, можно получить высокопрочный цементный камень при температуре твердения раствора 150°C.

О характере изменения прочности диатомито-цементных растворов, твердеющих при температуре 75, 100 и 150°C, в зависимости от содержания диатомита в смеси и его водопотребности можно судить по кривым, приведенным на рис. 17. Эти кривые наглядно показывают, что состав облепченного цементного раствора должен определяться в каждом конкретном случае в зависимости от условий его твердения. Причем, как это видно из рис. 17, изменение водопотребности диатомита в интервале 1,5—2,5 см³/г оказывает меньшее влияние на прочность камня, чем отклонение его содержания от оптимальной величины на $\pm 5\%$.

Резкий характер падения прочности диатомито-цементного камня, содержащего в растворе 30% добавки, при увеличении водопотребности диатомита с 2,5 до 3,0 см³/г (рис. 17, кривые 3 и 4) объясняется не только повышением водо-цементного отношения с 1,20 до 1,35, но и в первую очередь качественным различием структуры образующихся цементных камней.

И. Н. Ахвердов, рассмотрев природу данного явления, пришел к заключению, что наиболее вероятной причиной столь интенсивного падения прочности является образование рыхлой структуры цементного теста. Незначитель-

ное повышение В:Ц (на 0,15) в данном случае, по-видимому, способствует ослаблению молекулярно-силового взаимодействия цементных мицелл с реакционно-способ-

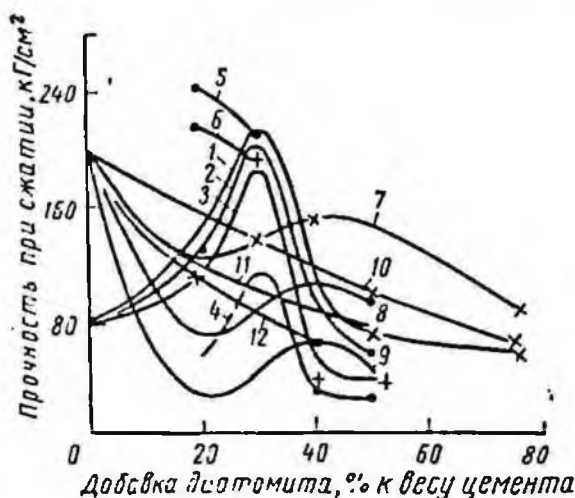


Рис. 17. Влияние диатомита на прочность цементного камня.

1, 2, 3, 4 — твердение один сутки при $t=150^{\circ}\text{C}$ и $p=300 \text{ кг/см}^2$; 5, 6 — твердение двое суток при $t=150^{\circ}\text{C}$ и $p=300 \text{ кг/см}^2$; 7, 8, 9 — твердение один сутки при $t=100^{\circ}\text{C}$ и $p=300 \text{ кг/см}^2$; 10, 11, 12 — твердение двое суток при $t=75^{\circ}\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$; 1, 7, 10 — $K_d=1,5$; 2, 5, 8; 11 — $K_d=2,0$; 3, 6, 12 — $K_d=2,5$; 4, 9 — $K_d=3,0$.

ной частью добавки. Именно поэтому значения прочности на сжатие у диатомито-цементных растворов, используемых в США, в 2—5 раз ниже, чем полученные авторами. Водопотребность диатомита, применяемого американскими фирмами, в среднем равна $4,0 \text{ см}^3/\text{г}$.

Рассмотренные выше положения заставляют с особым вниманием отнестись к тем цементам, которые содержат в своем составе до 30—40% диатомита или трепела. В связи с этим была изучена возможность использования пуццоланового портландцемента (ППЦ) Брянского завода, являющегося продукцией цементной промышленности и удовлетворяющего требованиям ГОСТ 10178—62, для приготовления облегченных цементных растворов.

В результате лабораторных и промысловых испытаний было установлено, что пуццолановый портландце-

мент может быть с успехом использован для цементирования глубоких скважин.

Физико-механическая характеристика облегченных цементных растворов и камней на основе пуццоланового портландцемента приведена в табл. 28.

Таблица 28
Физико-механическая характеристика пуццоланового
портландцемента

Вид и марка цемента	Водо-цементное отношение	Растекаемость, см	Удельный вес, г/см ³	Условия опыта		Прочность на сжатие через одну сутки, кг/см ²	Сроки схватывания, ч — мин	
				Р, кг/см ²	t, °C		начало	конец
ПЦЦ-м300	0,90	19,0	1,53	300	75	141	—	—
ПЦЦ-м300	1,00	24,0	1,48	300	75	114	3—20	5—40
ПЦЦ-м300	1,00	24,5	1,48	300	100	105	—	—
ПЦЦ-м300	0,90	20,0	1,53	300	125	116	1—30	2—50
ПЦЦ-м300	1,00	26,0	1,48	300	125	103	—	—
ПЦЦ-м300	1,00	26,0	1,48	300	150	109	1—00	1—40
ПЦЦ-м400	0,90	24,5	1,54	300	100	113	2—20	3—20
ПЦЦ-м400	0,90	23,5	1,54	300	125	106	1—35	3—00
ПЦЦ-м500	0,90	25,5	1,54	300	100	106	2—10	3—00
ПЦЦ-м500	0,90	24,5	1,54	300	125	110	1—40	3—10
ПЦЦ*	0,75	26,0	1,60	1	75	20/63**	3—30	7—30
ПЦЦ*	0,75	26,0	1,61	300	100	—	1—25	2—15
ПЦЦ*	0,75	26,0	1,61	300	125	32/122	0—55	1—20
ПЦЦ-м400	0,74	17,5	1,60	1	75	25/180	2—45	5—15
ПЦЦ-м400	0,84	22,0	1,55	1	75	25/150	3—30	6—00
ПЦЦ-м400	0,95	25,0	1,50	1	75	23/129	4—25	7—05
ПЦЦ-м400	1,10	25,0	1,45	1	75	17/102	—	—

* Опытная партия пуццоланового портландцемента Брянского завода, испытанная на скв. 32 Октябрьская треста Крымнефтегазразведка.

** В числителе приведена прочность на изгиб, в знаменателе — на сжатие, через двое суток твердения.

Придя к выводу, что максимальная прочность затвердевшего диатомито-цементного раствора при температуре 150°C и давлении 300 кг/см² достигается при 80%-ной добавке диатомита, были поставлены опыты и с другими добавками. Так, при использовании в качестве облегчающих добавок молотых ВПП и ОДП максимальная прочность на сжатие получена у тех цементных камней, которые приготовлены из растворов, содержащих соответственно 45 и 50% облегчителя от веса цемента (рис. 18).

Для приготовления облегченных цементных растворов удельного веса менее $1,45 \text{ Г/см}^3$ приходится вводить в смесь свыше 50% облегчителя. В этом случае часть ак-

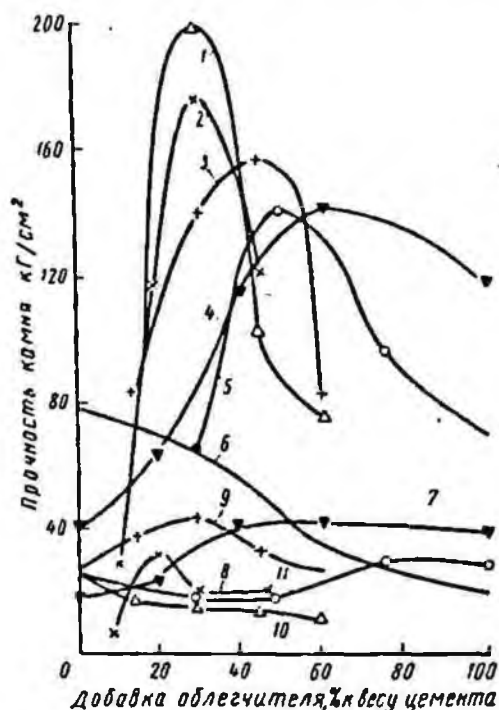


Рис. 18. Влияние облегчителя на прочность цементного камня, твердеющего в течение одних суток при температуре 150°C и давлении 300 кг/см^2 .

1, 2, 3, 4, 5, 6 — сжатие; 7, 8, 9, 10, 11 — изгиб;
1, 7 — ЦГС+диатомит, 2, 8 — ЦГС+трепел; 3, 9 — ЦГС+молотый ВПП; 4, 10 — ЦГС+городыщенский глинопорошок [77]; 5, 11 — ЦГС+молотый ОДП; 6 — ЦГС+глина

тивной минеральной добавки становится инертным материалом, так как для полного поглощения извести достаточно только 30—45% облегчителя от веса цемента. В связи с этим было рассмотрено влияние дополнительно вводимой в смесь извести на прочность цементных камней. В результате этих исследований установлено, что введение извести способствует повышению прочности цементного камня (табл. 29). К аналогичному выводу пришел Н. И. Титков и другие, добавляя в глино-цемент-

Влияние некоторых добавок на прочность диатомито- и трепело-цементных камней,
приготовленных из цемента для «горячих» скважин

Облегчитель, 50% вес	Добавка		В.Ц	Растекаемость, см	Удельный вес, г/см ³	Условия опыта		Прочность, кг/см ²	
	наименование	количество, % к весу цемента				t, °C	p, кг/см ²	на изгиб	на сжатие
Диатомит	—	—	1,20	19,0	1,54	75	1	26	106
»	ССБ	0,50	1,20	24,0	1,54	75	1	—	102
»	Меласса	0,75	1,20	24,0	1,54	75	1	—	154
»	Ca(OH) ₂	5,00	1,25	20,0	1,54	75	1	25	127
»	Ca(OH) ₂	5,00	1,10	20,5	1,58	75	1	28	159
»	ССБ	1,00	1,50	24,0	1,47	150	300	—	73
Трепел	—	—	1,50	21,0	1,47	150	300	—	78
»	Ca(OH) ₂	5,00	1,50	19,0	1,48	150	300	—	129
»	Ca(OH) ₂	10,00	1,50	17,0	1,49	150	300	—	111
»	Ca(OH) ₂	15,00	1,50						

Примечание. Диатомито-цементные растворы твердели в течение двух суток; трепело-цементные—одни сутки.

ные растворы до 7% извести. В то же время имеется мнение, что добавка к облегченным цементным растворам небольших количеств свободной извести не ведет к повышению механической прочности цементных камней.

Из табл. 29 видно, что при добавке в раствор 0,75% мелассы от веса цемента прочность диатомито-цементного камня повышается почти в полтора раза.

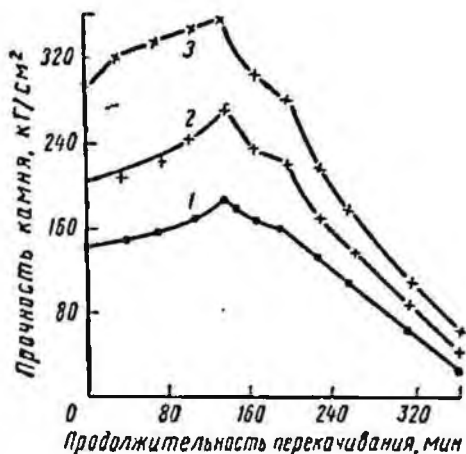


Рис. 19. Влияние продолжительности перекачивания раствора ($B : Ц = 0,4$) на прочность цементного камня. Образцы выдерживались при $t = 22^\circ C$ и $p = 1 \text{ кг/см}^2$ в течение:
1 — 7 суток; 2 — 28 суток; 3 — 90 суток.

Влияние перемешивания. Методика испытания тампонажных цементов на прочность (ГОСТ 1581—63) не учитывает, что при цементировании скважин цементные растворы подвергаются перемешиванию в процессе закачивания и продавливания. Известно, что механическое воздействие на растворы оказывает существенное влияние на прочность цементных камней. На рис. 19, построенном по данным Н. С. Гадзиева, это влияние иллюстрируется тремя кривыми. Наибольшую прочность цементный камень приобретает после 135-минутного перекачивания раствора по трубам. Имеются данные, что перекачивание легких растворов сопровождается более значительным повышением прочности, чем обычных.

Повышение механической прочности цементного камня за счет обработки исходного раствора перемешиванием

ванием связано с разрушением крупных цементных ячеек (флокул), на месте которых возникают более мелкие, равномерно распределяющиеся по всей системе.

П. А. Ребиндер, рассматривая влияние перемешивания на прочность цементного камня, отмечает, что если длительность перемешивания раствора не превышает время индукционного периода, то оно не оказывает вредного влияния на свойства затвердевшего камня. Более того, перемешивание в течение этого периода повышает прочность за счет разрушения рыхлой и малопрочной структуры, возникающей в начальный период, вместо которой затем образуется более плотная и прочная структура. Длительное и постоянное перемешивание раствора в пределах индукционного периода, сопровождающееся непрерывным разрушением образующейся структуры, влечет за собой увеличение удельной поверхности гидратируемого цемента.

Совершенно очевидно, что от качества перемешивания, т. е. от длительности и интенсивности механического воздействия на раствор, зависит и характер изменения прочности. В опытах, проведенных авторами, перемешивание осуществлялось на механической лопастной мешалке, работающей при скорости вращения лопастного вала 900 и 200 об/мин. Как показали эти опыты, увеличение интенсивности перемешивания раствора с 200 до 900 об/мин не оказывает существенного влияния на дальнейший рост прочности цементного камня.

О влиянии перемешивания растворов при скорости вращения вала мешалки 900 об/мин на прочность некоторых видов облегченных цементов, твердеющих при температуре 22 и 75°C, можно судить по данным, приведенным в табл. 30. Как видно из табл. 30, перемешивание в большой степени влияет на прочность растворов, содержащих в своем составе такие облегчители, как асбозурит, ОДП и глинопорошок. Перемешивание растворов, приготовленных с использованием высокодисперсных добавок (диатомит, трепел), не вызывает столь ощутимого увеличения прочности. Тот факт, что для растворов с использованием одних добавок перемешивание ведет к повышению прочности цементных камней в 1,5—2,0 раза, а других — только на 10—30%, объясняется механизмом действия перемешивания и свойствами той или иной добавки. Так, перемешивание раство-

Таблица 30

Влияние перемешивания облегченных цементных растворов на прочность цементных камней, твердеющих при атмосферном давлении

Состав раствора			В:Ц	Температура хранения, °С	Двухсуточная прочность, кг/см²				
цемент	облегчающая добавка	наименование			на изгиб		на сжатие		
					раствор не перемешан	раствор перемешивался 10 мин при η=900 об/мин		раствор не перемешан	раствор перемешивался 10 мин при η=900 об/мин
		количество, % к весу цемента							
ЦГС	—	—	0,50	75	63	78	205	240	
»	Асбозурит	20	1,14	22	7	11	15	24	
»	»	20	1,14	50	11	15	28	38	
»	»	40	1,70	75	11	14	32	53	
»	Глинопоророшок	50	1,50	22	—	—	6	11	
»	»	42	1,23	75	—	15	19	30	
»	Диатомит	50	1,35	22	6	6	20	24	
»	»	40	1,05	75	29	29	132	143	
»	»	40	1,45	75	19	19	74	78	
»	ОДП	60	1,40	22	6	11	14	28	
»	Трепел	100	1,50	75	—	—	105	123	
»	»	30	1,15	75	—	—	76	95	
ПЦЦ-м400*	—	—	0,90	22	—	—	45	47	

* Образцы хранились в течение 7 суток.

ров, содержащих грубодисперсные материалы, способствует увеличению концентрации мельчайших частиц цемента и добавки, а также образованию более плотной и прочной структуры цементного теста. Когда же облегчителем является тонкомолотая добавка, частицы которой и так чрезвычайно малы (около 1 мк), то перемешивание не вызывает заметного повышения дисперсности твердой фазы раствора и улучшения структуры цементного камня.

Приведенный экспериментальный материал о влиянии перемешивания на прочность цементных камней позволяет сделать вывод, что облегченные цементные растворы, затвердевающие в скважине, имеют более высокие показатели прочности, чем растворы того же состава, приготовленные в лабораторных условиях по методике ГОСТ 1581—63.

Влияние продолжительности хранения. Тампонажный раствор считается пригодным для цементирования скважин, если в процессе твердения он превращается в камень, прочность которого не снижается с течением времени. В наших исследованиях длительность хранения образцов из облегченных цементов составляла до 360 суток. Опыты с продолжительным хранением образцов проводились при температуре 22, 50, 75°C и атмосферном давлении, а также при температуре 100, 125, 150°C и давлении 300 кг/см² в течение 5 суток. Результаты этих исследований приведены в табл. 31 и показаны на рис. 20—24.

О влиянии продолжительности хранения асбозуритоцементных растворов, твердевших при температуре 22, 50, 75°C, можно судить по данным, приведенным на рис. 20. Из этого рисунка видно, что прочность на изгиб у цементных образцов, хранившихся при температуре 22 и 50°C к 14 суткам твердения несколько выше, чем прочность образцов, хранившихся при температуре 75°C. Прочность на сжатие у образцов, хранившихся при температуре 22 и 50°C к 14 суткам значительно выше, чем у камня, твердеющего при 75°C. По другим данным (рис. 21) видно, что наиболее интенсивный набор прочности происходит в течение первых трех месяцев твердения. Причем прочность на изгиб, как правило, стабилизируется к 30 суткам твердения, а прочность на сжатие

возрастает вплоть до 6 месяцев хранения (рис. 21, кривые 8, 9).

Растворы, твердеющие при температуре 75°C, приобретают прочность, близкую к конечной, уже через 2—3

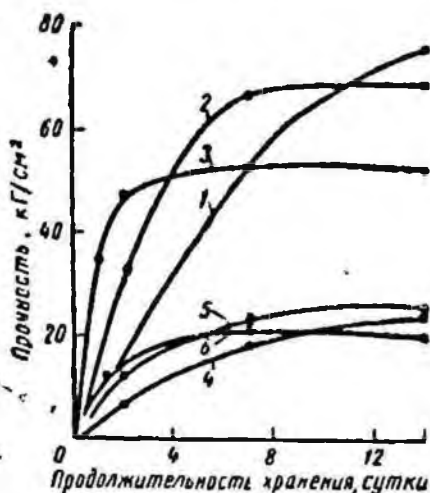


Рис. 20. Влияние продолжительности хранения растворов на прочность асбозурито-цементного камня. Состав раствора:

ЦГС+20% асбозурита, В:Ц=1,1, $\gamma=1,52$
 1, 2, 3 — при сжатии; 4, 5, 6 — при изгибе.
 1, 4 — при температуре $22\pm 2^\circ\text{C}$; 2, 5 — то же, 50°C ; 3, 6 — то же, 75°C .

суток (рис. 22). О влиянии величины добавки на прочность камней при длительном хранении можно проследить на примере растворов с добавкой асбозурита и ОДП (рис. 23 и 24).

В табл. 31 рассматривается воздействие высокой температуры и давления на прочность облегченных цементных камней, твердеющих в автоклаве в течение 5 суток. Как видно из табл. 31, прочность цементных камней на сжатие несколько снижается, а прочность на изгиб у растворов, содержащих ОДП и трепел, заметно повышается. Эти положения хорошо согласуются с исследованиями Картера и Смита.

Изучение влияния длительного хранения цементных камней, твердеющих в различных температурных условиях, на их механическую прочность дает основание

Влияние длительности хранения образцов, приготовленных из цемента для «горячих» скважин, на механическую прочность цементных камней, твердеющих при температуре 150°C и давлении 300 кг/см²

Добавка, % вес.				Удельный вес, г/см ³	Длительность хранения, сутки	Прочность, кг/см ²	
ВПП молотый	ОДП молотый	тресел	вода			на изгиб	на сжатие
30	—	—	110	1,54	1	44	140
35	—	—	110	1,56	5	28	125
—	45	—	115	1,54	1	19	140
—	40	—	110	1,56	5	48	125
—	—	30	110	1,55	1	20	170
—	—	30	110	1,55	5	38	120

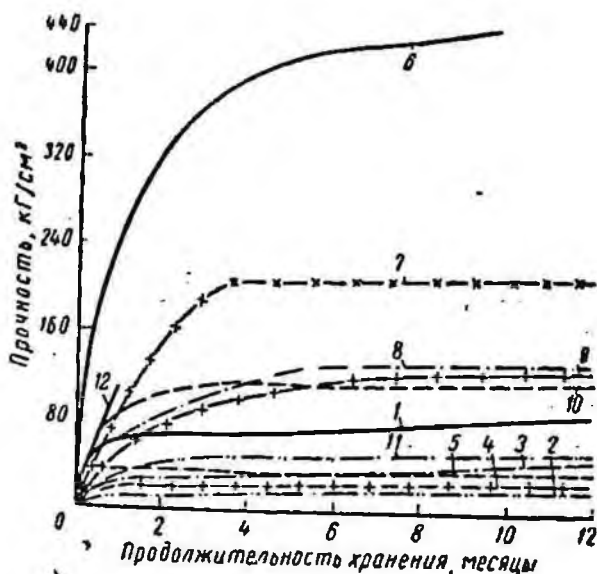


Рис. 21. Изменение прочности цементного камня при изгибе (1, 2, 3, 4, 5) и сжатии (6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) в зависимости от продолжительности твердения. Образцы выдерживались при $t=22\pm 2^\circ\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$.

1, 6 — ЦХС, В: Ц=0,5, $\gamma=1,83$; 2, 7 — ЦХС±50% диатомита, В: Ц=1,35, $\gamma=1,50$; 3, 8 — ЦХС+20% асбозурита, В: Ц=1,14, $\gamma=1,52$; 4, 9 — ЦХС+60% ОДП, В: Ц=1,4, $\gamma=1,50$; 5, 10 — ЦХС+13% ВПП, В: Ц=1,04, $\gamma=1,50$; 11 — ЦХС+50% глинопорошка, В: Ц=1,50, $\gamma=1,50$; 12 — ППЦ-м 300, В: Ц=1,0, $\gamma=1,50$.

считать облегченные цементы тампонажным материалом, пригодным для цементирования нефтяных и газовых скважин.

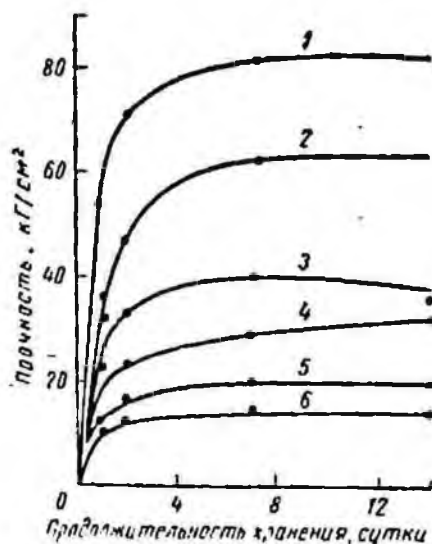


Рис. 22. Влияние продолжительности хранения на прочность асбозуритоцементного камня при сжатии (1, 2, 3) и изгибе (4, 5, 6). Образцы выдерживались при $t=75^{\circ}\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$.
1, 4 — ЦГС+10% асбозурита; 2, 5 — ЦГС+20% асбозурита; 3, 6 — ЦГС+30% асбозурита.

Таким образом, на основании исследований механической прочности облегченных цементов могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Тампонажные растворы пониженной плотности,готавливаемые на основе цемента для «холодных» и «горячих» скважин и таких материалов, как асбозурит, диатомит, трепел, ВПП, ОДП и др., затвердевают в цементный камень с конечной прочностью, обеспечивающей надежное разобщение продуктивных горизонтов.

2. Прочность облегченного цемента зависит не только от количества, качества, вида облегчителя и условий твердения раствора, но и от прочности исходного тампонажного цемента при $B : Ц = 0,5$. Чем она выше, тем более высокую прочность будет иметь облегченный цемент.

3. Наиболее высокой прочностью в равных условиях характеризуются цементы, приготовленные с использованием высокоактивных гидравлических добавок.

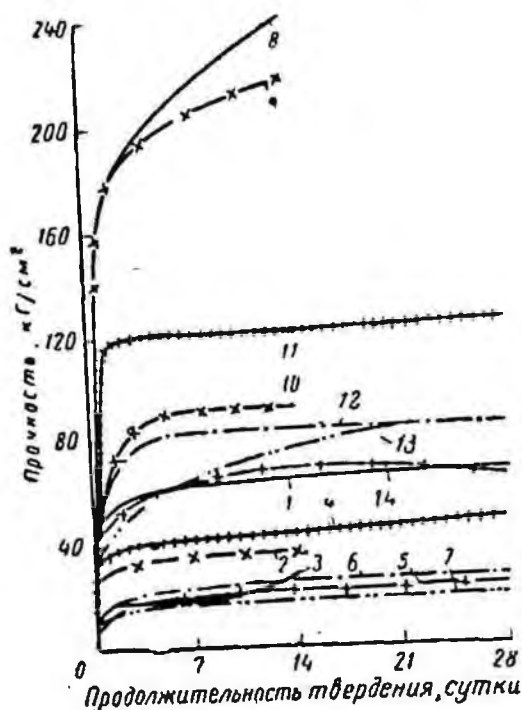


Рис. 23. Прочность камня из облегченных тампонажных растворов в зависимости от длительности твердения. Образцы выдерживались при $t=75^{\circ}\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$.

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — при изгибе; 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 — при сжатии; 1, 8 — ЦГС, В: Ц=0.5, $\gamma=1.83$; 2, 9 — ЦГС+20% диатомита, В: Ц=0.8, $\gamma=1.65$; 3, 10 — ЦГС+25% диатомита, В: Ц=0.95; $\gamma=1.55$; 4, 11 — ЦПС-м 300, В: Ц=1.0, $\gamma=1.50$; 5, 12 — ЦГС+30% глинопорошка, В: Ц=1.09, $\gamma=1.56$; 6, 13 — ЦГС+15% асбозурита, В: Ц=0.95; $\gamma=1.54$; 7, 14 — ЦГС+50% ОДП, В: Ц=1.25, $\gamma=1.54$.

4. Повышение тонкости помола активных минеральных добавок способствует увеличению механической прочности цементных камней.

5. Наибольшей прочностью в условиях высокотемпературного твердения ($100-150^{\circ}\text{C}$) обладают цементы, содержащие в своем составе такое количество активных

минеральных добавок, которое необходимо и достаточно для наиболее полного связывания образовавшейся в процессе гидратации портландцемента извести.

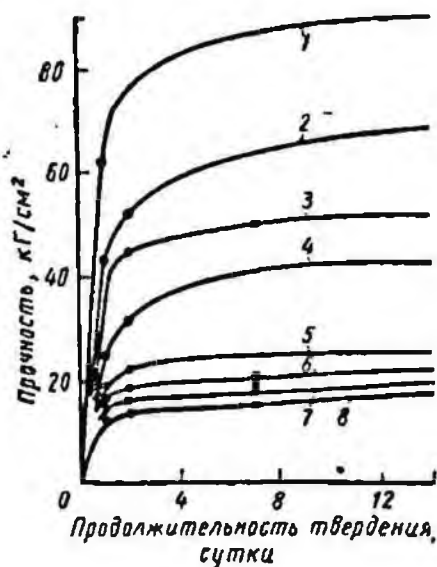


Рис. 24. Влияние длительности твердения на прочность камня из растворов с добавкой ОДП.

Образцы выдерживались при $t=75^{\circ}\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$.

1, 2, 3, 4 — при сжатии; 5, 6, 7, 8 — при изгибе; 1, 5 — ЦГС+30% ОДП; 2, 6 — ЦГС+50% ОДП; 3, 7 — ЦГС+70% ОДП; 4, 8 — ЦГС+100% ОДП.

6. Облегченные цементы, приготовленные с использованием тонкоизмельченных ВПП и ОДП, являются термостойкими и могут быть рекомендованы для цементирования скважин с забойными температурами до 150°C .

7. Оптимальное содержание облепгчителя в цементе зависит от гидравлической активности материала и условий твердения раствора. Так, для диатомито- и трепело-цементных растворов, твердеющих при температуре 100°C , оптимальная добавка равна 40% диатомита или трепела от веса портландцемента; при температуре 125°C и 150°C оптимальная добавка равна соответственно 35 и 30% диатомита или трепела. Растворы с добавками

ВПП и ОДП должны содержать 55% ВПП и 60% ОДП при температуре 100°C и соответственно 45% ВПП и 50% ОДП при температуре 150°C.

8. Для улучшения прочностной характеристики цемента, содержащих избыточное (выше оптимального) количество облепчика, следует вводить известь в необходимых количествах.

9. Перемешивание раствора с длительностью и интенсивностью, имитирующей закачивание и продавливание его в скважину, ведет к повышению прочности камней на 20—50% по сравнению с растворами, не обработанными перемешиванием.

10. Исследование прочности облепченных цемента во времени позволило установить:

прочность цементных камней, твердеющих при температуре 22°C и атмосферном давлении, повышается по мере увеличения продолжительности хранения;

прочность цементных камней, твердеющих при температуре 75°C, повышается в течение первых 14 суток, последующее хранение не вызывает существенного изменения прочности;

облепченные тампонажные растворы, приготовленные с использованием в качестве облепчика добавок повышенной гидравлической активности, затвердевают в камни с высокой прочностью при температуре 150°C и не снижают прочности после пятисуточного автоклавного хранения.

Проницаемость цементного камня

В последние годы проводятся обширные исследования по изучению проницаемости цементного камня [5, 7, 17]. Цементный раствор не может считаться пригодным для цементирования скважин, если, затвердевая, он превращается в проницаемый камень. До настоящего времени нефтепромысловая практика не выработала нормативных величин для проницаемости цементного камня. Однако некоторыми авторами высказывается мнение, что проницаемость цементного камня до 2—4 мд не может быть причиной обводнения скважин и движения газа.

Действующая методика определения проницаемости [7], по-видимому, не всегда учитывает специфику рабо-

ты цементного камня в скважине. Просушивание цементного керна, осуществляемое при температуре 105°C, может привести к трещинообразованиям, особенно у облегченных цементных камней. В свою очередь, нарушение целостности цементного камня сопровождается резким увеличением проницаемости. В наших исследованиях газопроницаемости часть образцов, predisposed к трещинообразованию, подсушивалась при комнатной температуре, а некоторые из них испытывались без подсушивания. Поскольку проницаемость водонасыщенного или влажного камня отличается от проницаемости высушенного, были проведены сравнительные исследования газопроницаемости на цементных образцах различных составов. Результаты этих исследований приведены в табл. 32 и 33. Как видно из табл. 32 и 33

Таблица 32

Влияние условий хранения на газопроницаемость цементных камней, приготовленных из цемента для «горячих» скважин с добавкой ОДП

Содержание ОДП, % к весу цемента	В:Ц	Условия хранения		Длительность хранения образцов, сутки	Газопроницаемость образцов, мд	
		t, °C	p, кг/см ³		высушенных	влажных
30	0,95	75	1	2	5,26	0,56
30	0,95	100	300	1	0,14	0,04
70	1,55	75	1	2	3,48	0,10
70	1,55	100	300	1	2,13	0,05

газопроницаемость влажных образцов ниже, чем высушенных до постоянного веса. Аналогичные результаты получены на растворах с добавкой глины и асбозурита.

Ранее исследовалось влияние водопотребности часовъярского глинопорошка на некоторые свойства раствора и цементного камня. В настоящем разделе рассматривается изменение газопроницаемости камня в зависимости от водопотребности величины добавки глинопорошка (табл. 34). Как видно из табл. 34, повышение водопотребности и увеличение содержания глинопорошка в растворе не ведет к заметному росту проницаемости.

Таблица 33

Влияние диатомита и его водопотребности на газопроницаемость диатомито-цементных камней, приготовленных из цемента для «горячих» скважин (температура 75°C, давление 1 кг/см², длительность хранения двое суток)

Диатомит		В.Ц	Удельный вес, Г/см ³	Прочность на сжатие, кг/см ²	Газопроницаемость образцов, мд	
содержание, % к весу цемента	водопотребность, см ³ /г				высушенных	плажных
40	1,5	1,05	1,59	132/143	0,5/0,15	0/0
25	2,0	0,95	1,57	110	2,25	—
40	2,0	1,25	1,52	87/109	1,3/0,7	0/0
50	2,0	1,45	1,50	77	5,0	0
25	2,6	1,10	1,53	78	6,25	—
40	2,5	1,45	1,47	74/78	1,3/1,2	—
50	2,5	1,70	1,45	53	7,35	—
40	3,0	1,65	1,44	43/60	1,5/2,0	—

Примечание. Дробные значения прочности и газопроницаемости обозначают: в числителе—для растворов неперемешанных; в знаменателе—для растворов перемешанных.

Таблица 34

Влияние состава глино-цементного раствора на его физико-механические свойства

Величина добавки чистого глино-порошка, % от веса цемента	Водопотребность глино-порошка, см ³ /г	В.Ц	Удельный вес раствора, Г/см ³	Сроки схватывания, ч/мин		Время начала загустевания, ч/мин	Двухсуточная прочность, кг/см ²		Газопроницаемость, мд
				начало	конец		на изгиб	на сжатие	
12,0	5,0	0,5	1,85	3—00	3—45	3—25	78	240	0,1
16,0	4,0	1,00	1,55	3—10	5—15	4—00	26	63	1,08
23,0	3,0	1,04	1,55	3—30	5—00	3—50	23	51	0,76
42,0	3,0	1,09	1,55	4—00	5—45	2—15	13	40	0,86
	3,0	1,23	1,55	4—35	6—15	1—15	15	30	1,6

Условия твердения раствора и его состав во многом определяют проницаемость камня. Установлено [7], что проницаемость в зависимости от температуры и давле-

ния носит обратный характер по сравнению с прочностью. Повышение температуры до 80°C ведет к снижению проницаемости. Дальнейшее повышение температуры сопровождается ее увеличением. С увеличением давления проницаемость цементного камня снижается приблизительно так же, как повышается его прочность.

В качестве примера, иллюстрирующего влияние температуры и давления на проницаемость цементного камня, можно сослаться на растворы с добавкой ОДП (см. табл. 32). О динамике изменения проницаемости перлитоглино-цементных камней с течением времени можно судить по данным, приведенным на рис. 25, кривая 3.

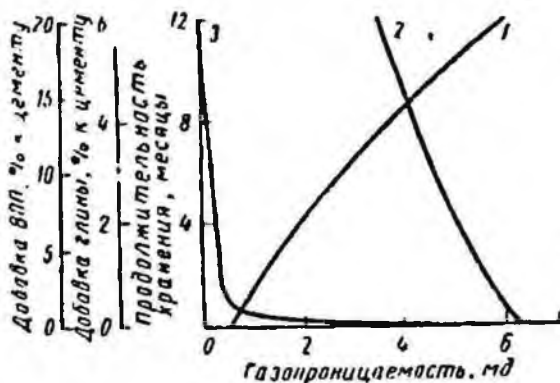


Рис. 25. Изменение газопроницаемости цементного камня в зависимости от добавки перлита 1, глины 2 и продолжительности хранения 3.

Образцы выдерживались в течение двух суток при $t = 75^{\circ}\text{C}$ и $p = 300 \text{ кг/см}^2$ (1, 2) и при $t = 22^{\circ}\text{C}$ и $p = 1 \text{ кг/см}^2$ (3). Содержание перлита для кривых: 2 — 15% и 3 — 10% от веса цемента.

Влияние величины облегчающей добавки на газопроницаемость цементных камней видно из табл. 33 и рис. 25. Минимальная проницаемость получена у камней, содержащих в своем составе 40% облегчителя (диатомита). Однако этот вывод нельзя считать общим для диатомито-цементных растворов, так как известно, что проницаемость относится к числу трудно измеряемых параметров цементного камня, не всегда дающих

приемлемую воспроизводимость опытных результатов. В табл. 33 приведены значения газопроницаемости для растворов, подвергнутых перемешиванию. Как правило, перемешивание раствора приводит к уменьшению проницаемости, но имеются случаи ее увеличения.

Для снижения проницаемости цементных камней рекомендуется в раствор вводить глину. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 25.

Таким образом, исследования проницаемости цементных камней позволяют сделать следующие выводы.

1. Проницаемость облегченных цементных камней, содержащих в своем составе такие добавки, как асбозурит, глинопорошок, диатомит, трепел, ВПП, ОДП, а также полученных из пуццоланового портландцемента Брянского завода, дает основание считать тампонажные растворы пониженной плотности надежным изолирующим материалом, пригодным для цементирования нефтяных и газовых скважин.

2. Для снижения проницаемости перлито-цементных растворов в ранний период твердения рекомендуется добавка глинопорошка в количестве 2—10% от веса цемента.

Коррозионная стойкость

Тампонажные растворы пониженной плотности и камни на их основе не могут быть признаны надежным тампонирующим материалом без изучения их коррозионной устойчивости по отношению к агрессивным средам.

Исследования минерализованных пластовых вод ряда месторождений Советского Союза, проведенные А. Я. Липовецким, Г. Н. Гельфманом и др., показали, что имеются воды, коррозионные по отношению к цементному камню. В основе коррозионного действия агрессивных пластовых вод на цементный камень лежит катионный обмен, в результате которого часть ионов кальция в цементном камне замещается ионами магния и щелочных металлов.

Наиболее сильное действие на цементный камень оказывают следующие виды коррозии: сульфатная, магnezияльная и выщелачивающая.

Сульфаты различных оснований, связываясь со свободным гидратом окиси кальция, образуют гипс. Переход гидрата окиси кальция в гипс более чем вдвое увеличивает объем твердого вещества, так как молекулярные объемы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ составляют соответственно 33,2 и 74,3 см³. В этом одна из причин предварительного расширения, а затем и разрушения цементного камня.

Сульфатоалюминатная коррозия происходит вследствие взаимодействия гипса с высокоосновными алюминатами кальция. Катионы кальция поступают для реакции в результате растворения $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а аннион SO_4^{2-} — из омывающей цемент воды. Таким образом, вместо одной молекулы C_3AH_6 с общим молекулярным объемом 150,12 см³ и трех молекул $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с общим молекулярным объемом 99,69 см³ образуется одна молекула гидросульфатоалюмината кальция с молекулярным объемом 715,11 см³. При этой реакции объем твердой фазы увеличивается в 2,86 раза. В теле цементного камня возникают кристаллизационные напряжения, вызывающие растрескивание и разрушение.

Механизм действия магnezальной коррозии на цементный камень объясняется следующим образом. Ионы магния, проникая в цементный камень, реагируют с гидроксильной группой $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образуя труднорастворимое соединение $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Снижение концентрации гидрата окиси кальция вызывает разложение гидросиликата кальция с образованием недостающего для установления химического равновесия количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Не менее интенсивным коррозионным процессом, происходящим в цементном камне, можно считать и выщелачивание гидроокиси кальция, так как $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обладает высокой растворимостью по сравнению с другими продуктами гидратации портландцемента.

Наиболее интенсивно корродирует цементный камень при совместном воздействии магnezальной и сульфатной коррозии, в связи с чем при наличии сульфата магния в водной среде коррозионные процессы заметно активизируются. Сульфат магния не только реагирует с алюминатами и гидратом окиси кальция, но и разлагает гидросиликаты кальция.

В гидротехническом строительстве для повышения коррозионной устойчивости бетона используются раз-

личные гидравлические добавки. Однако последними работами Дж. Мальквори [30] показано, что для повышения коррозионной устойчивости цементов необходимо использование таких добавок, которые характеризуются слабой реакционной способностью глинозема. По мнению Дж. Мальквори, для повышения сульфатостойкости цементов следует применять пуццолановый материал с очень небольшим содержанием или не содержащий реакционноспособного глинозема.

Исследование коррозии облегченных тампонажных цементов представляет особый интерес, так как о влиянии тех или иных облегчителей на коррозионную устойчивость цементного камня имеются разноречивые мнения. Кроме того, целый ряд новых видов облегченных растворов, разработанных в последние годы, вообще не исследовался на коррозионную устойчивость. В связи с этим авторами предпринята попытка изучить влияние агрессивной среды на прочность различных видов облегченных цементных растворов, а также произвести визуальную оценку коррозионных процессов, происходящих в цементном камне.

Поскольку эксплуатационный период скважины охватывает 10—20 лет и более, то очевидно, что лабораторные методы исследования коррозионной устойчивости камня должны быть ускоренными. Для ускорения процесса коррозии пользуются двумя приемами, которые часто совмещаются: во-первых, повышается концентрация агрессивной среды по сравнению с природной и, во-вторых, увеличивается реагирующая поверхность образца, т. е. отношение его суммарной поверхности к объему. Методы исследования коррозии, используемые в строительной практике, были положены в основу опытов, приведенных авторами. Агрессивной средой был принят 3%-ный раствор $MgSO_4$, вызывающий как магниезиальную, так и сульфатную коррозию. Образцы различных видов облегченных цементных растворов удельного веса 1,50—1,52 г/см³ имели форму призм размером 1,1×4×16 см и кубиков размером 2×2×2 см. Образцы в 3%-ном растворе $MgSO_4$ хранились в стеклянных эксикаторах с плотно притертой крышкой. Отношение объема агрессивной среды к объему образцов было примерно 5:1. Смена раствора в эксикаторах производилась через каждые две недели. Образцы по мере исте-

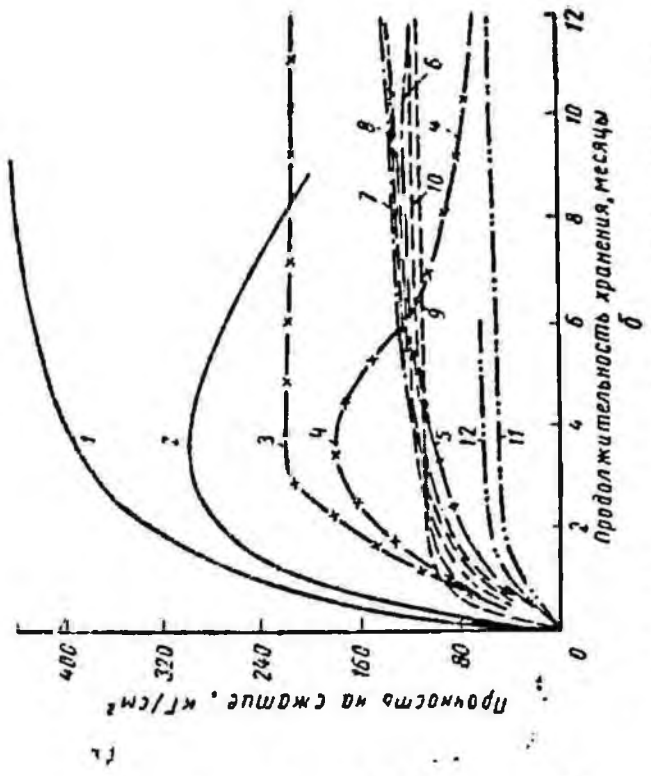
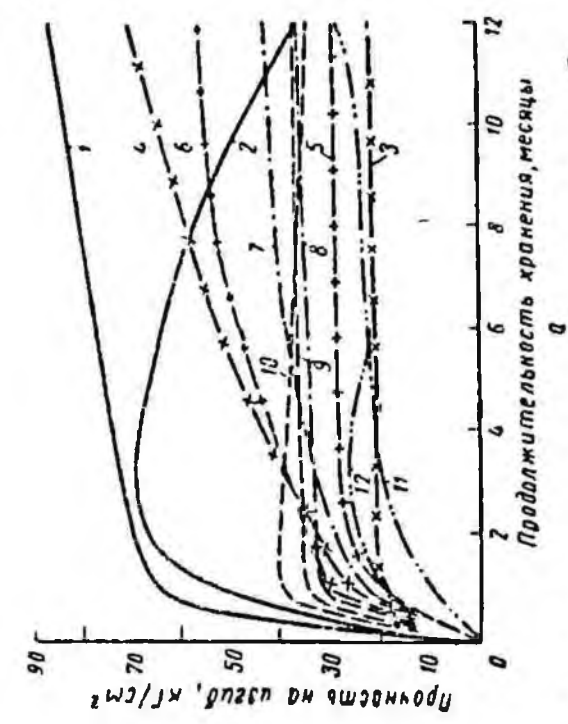


Рис. 26. Изменение прочности камня из облегченных цементных растворов в зависимости от продолжительности хранения: а — прочность на изгиб; б — прочность на сжатие. Образцы выдерживались при $t = 22 \pm 2^\circ\text{C}$ и $p = 1 \text{ кг/см}^2$ в водопроводной воде (1, 3, 5, 7, 9, 11) и в 3%-ном растворе MgSO_4 (2, 4, 6, 8, 10, 12).
 1, 2 — ЦХС, В: Ц-0,5, $\gamma=1,83$; 3, 4 — ЦХС+50% диатомита, В: Ц-1,35, $\gamma=1,50$; 5, 6 — ЦХС+60% ОДП В: Ц-1,4, $\gamma=1,50$; 7, 8 — ЦХС+20% асбозурита, В: Ц-1,14, $\gamma=1,52$; 9, 10 — ЦХС+13% ВПП, В: Ц-1,04, $\gamma=1,51$; 11, 12 — ЦХС+50% глины, В: Ц-1,50, $\gamma=1,50$.

чения срока испытывались как на изгиб, так и на сжатие. Одновременно в ванне для водного хранения находились образцы-близнецы, полученные из раствора одного общего замеса. Длительность хранения образцов в агрессивных средах и контрольных в водопроводной воде устанавливалась 1, 3, 6 и 12 месяцев. Результаты этих исследований для большей наглядности представлены кривыми на рис. 26. Как видно из рис. 26, прочность на изгиб различных по составу камней, хранившихся в агрессивных средах, как правило, не ниже, а в отдельных случаях даже выше, чем тех же образцов, твердеющих в водопроводной воде. Аналогичные данные получены А. Я. Липовецким и В. С. Данюшевским.

Визуальные наблюдения позволили отметить у диатомито-цементных камней уже после трехмесячного хранения нарушение целостности камня на стыке двух поверхностей (в реберной части). Эти нарушения заметно усилились после шестимесячного хранения и привели фактически к разрушению верхней грани образцов после годового хранения. Незначительные нарушения реберной поверхности отмечены после двенадцатимесячного хранения образцов, содержащих в своем составе обожженный диатомовый песок. В то же время интересно отметить, что, несмотря на интенсивное разрушение этих образцов под воздействием агрессивной среды, прочность на изгиб у них значительно выше, чем у тех же образцов, хранившихся в водопроводной воде.

На всех образцах, находившихся в агрессивной сульфатно-магнезимальной среде, появилась белая плотная оболочка толщиной до 2 мм. Образование этой оболочки связано с проникновением в поверхностные поры цементного камня гидрата окиси магния. О величине оболочки гидрата окиси магния, являющейся, по-видимому, защитным панцирем, замедляющим процессы разрушения цементного камня, можно судить по изменению веса образцов (рис. 27). Вес образцов, содержащих диатомит, уменьшается за счет их разрушения. Наиболее интенсивное образование $Mg(OH)_2$ отмечено на глино-цементных камнях.

Необходимо более детально остановиться на асбозу-рито-цементных образцах. Длительность хранения в 3%-ном растворе $MgSO_4$ не повлияла на значения прочности этих растворов, а визуальными наблюдениями не

удалось установить каких-либо отклонений от нормы. В то же время известно, что асбозурит является родственным материалом как диатомита, так и ОДП.

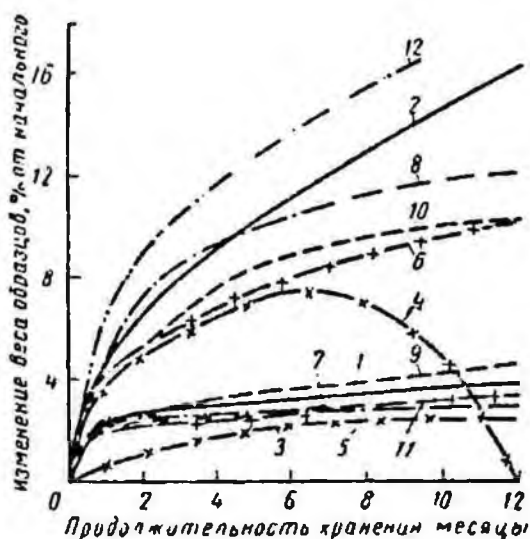


Рис. 27. Изменение веса образцов в зависимости от длительности хранения. Цементные камни выдерживались при $t=22\pm 2^\circ\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$ в водопроводной воде (1, 3, 5, 7, 9, 11) и в 3%-ном растворе MgSO_4 (2, 4, 6, 8, 12).

1, 2 — ЦХС; В : Ц = 0,5; 3, 4 — ЦХС + 50% диатомита, В : Ц = 1,35; 5, 6 — ЦХС + 60% ОДП, В : Ц = 1; 7, 8 — ЦХС + 20% асбозурита, В : Ц = 1,14; 9, 10 — ЦХС + 13% ВПП, В : Ц = 1,04; 11, 12 — ЦХС + 50% глины, В : Ц = 1,50.

В чем же причина коррозионной устойчивости асбозурито-цементных растворов по сравнению с диатомито-цементными? По-видимому, это можно объяснить следующими положениями. Во-первых, содержание асбозурита в цементном камне составляет только 20% от веса цемента, а в пересчете на диатомит — 16—17% против диатомито-цементного (50%) и у раствора с добавкой ОДП — 60%. Во-вторых, размер зерен диатомита в асбозурите значительно больше, чем в чистом тонкомолотом минерале.

Изучение влияния сульфатно-магnezиальной агрессии на некоторые виды тампонажных растворов пони-

жекой плотности в сравнении с чистыми цементными растворами позволяет сделать следующие выводы.

1. Облегченные цементные растворы, полученные на базе тампонажного цемента и таких добавок, как асбозурит, глинопорошок и вспученный перлитовый песок, являются более коррозионноустойчивыми по отношению к сульфатно-магнезиальной агрессии, чем чистые портландцементные растворы.

2. Растворы, приготовленные с использованием обожженного диатомового песка (ОДП), характеризуются пониженной коррозионной устойчивостью при наличии сульфатно-магнезиальной агрессии.

3. Использование инзенского диатомита для приготовления облегченных цементных растворов, работающих в условиях пластовых вод, классифицируемых как сульфатно-магнезиальные агрессивные воды, следует считать недопустимым.

Таким образом, обстоятельные экспериментальные исследования основных свойств различных видов облегченных тампонажных растворов позволили сделать вывод о целесообразности и большой практической ценности широкого внедрения тампонажных растворов пониженной плотности в практику цементирования глубоких нефтяных и газовых скважин.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТАМПОНАЖНЫХ РАСТВОРОВ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Назначение и область применения

Тампонажные растворы пониженного удельного веса могут быть с успехом использованы при цементировании нефтяных, газовых и разведочных скважин. Они широко применяются при проводке глубоких и сверхглубоких скважин. Однако наиболее целесообразно применять такие растворы в следующих случаях:

при наличии в разрезе ствола цементируемой скважины трещиноватых и кавернозных пород, а также пород, предрасположенных к гидроразрыву пластов и поглощению тампонажных растворов;

при необходимости подъема цементного раствора одной ступенью на высоту 2000—3000 м и более.

для проведения цементовязких цементировочных операций;

при отсутствии тампонажного цемента в количествах, необходимых для приготовления заданного объема раствора;

для изменения параметров чистого тампонажного раствора и цементного камня (улучшение перфорационных свойств камня, замедление времени начала схватывания и загустевания, повышение термо- и коррозионной устойчивости камня и др.).

Кроме того, применение облегченных цементных растворов позволит значительно сократить затраты на строительство скважин. Это сокращение расходов будет как прямым — за счет снижения стоимости 1 м³ раствора, так и косвенным — в связи с повышением качества цементировочных работ.

Для успешного проведения цементировочных работ с использованием облегченных тампонажных растворов следует составлять обстоятельный план цементирования скважины с учетом следующих геолого-технических данных;

условий проходки и цементирования скважин на данном месторождении или регионе и сопоставления обобщенных данных с теми особенностями, которые отмечены на конкретной скважине;

наличия в интервале подъема тампонажного раствора водо-, нефте- и газопроявляющих пластов, степени агрессивности минерализованных пластовых вод по отношению к цементному камню;

динамической и статической температуры на забое скважины, а также температуры на всем интервале подъема тампонажного раствора в затрубном пространстве;

фактического объема затрубного пространства скважины;

кривизны скважины в зоне цементирования и величины зазора между стенкой скважины и обсадной колонной;

необходимой высоты подъема тампонажного раствора в затрубном пространстве.

На основании детального изучения геолого-технических данных устанавливаются основные требования к цементному раствору. Так, например, определяется, какими должны быть удельный вес раствора, сроки его схватывания и загустевания, прочность камня и пр.

Исходя из требований, предъявляемых к цементному раствору и камню, разрабатывается рецептура тампонажного раствора. В настоящее время такая разработка сводится к подбору необходимого количества и вида облегчающей добавки, воды затворения для получения цементного раствора заданной плотности и консистенции.

Авторами делается попытка заложить некоторые основы проектирования состава облегченных цементов в зависимости от заданного удельного веса раствора, исходных материалов и условий твердения.

Проектирование состава растворов

Под проектированием состава облегченных цементных растворов подразумевается такой способ их подбора, который при данных качественных характеристиках составляющих позволил получить стабильные тампонажные растворы с наиболее благоприятными сроками схватывания и загустевания, а цементные камни — с максимально высокой прочностью.

Основные положения проектирования облегченных цементных растворов сводятся к выбору исходных тампонажных портландцемента и облегчителя, а также к установлению оптимального соотношения цемент : добавка : вода.

Выбор портландцемента (при наличии нескольких партий) осуществляется путем анализа основных свойств раствора и камня при $B : Ц = 0,5$. Предпочтение следует отдавать той партии, из которой в конкретных промысловых условиях могут быть получены растворы с наиболее благоприятными свойствами.

Облегчающие материалы выбираются в зависимости от геолого-технических условий в цементируемой скважине. Так, например, при цементировании трещиноватых и кавернозных пород, предрасположенных к поглощению, выбор облегчителя следует остановить на волокнисто-зернистых материалах (асбест, асбозурит, ОДП и ВПП). В случае цементирования водоносных горизонтов

с повышенной агрессивностью по отношению к портландцементу следует снижение плотности цементных растворов осуществлять путем введения в тампонажную смесь добавок, повышающих коррозионную устойчивость цементного камня. Для повышения термоустойчивости цементного камня наиболее эффективной облегчающей добавкой к тампонажному портландцементу может быть признан диатомит и трепел.

Рассмотрим несколько примеров проектирования состава облегченного цементного раствора.

Необходимо приготовить тампонажный раствор плотностью $1,55 \text{ г/см}^3$. В качестве исходных материалов могут быть использованы тампонажный цемент для «горячих» скважин и часовъярский глинопорошок. Глиноцементный раствор плотностью $1,55 \text{ г/см}^3$, как видно из табл. 34, может быть получен при различных соотношениях цемент : глинопорошок : вода. Оптимальным составом облегченного раствора является тот, который содержит 12% глинопорошка от веса цемента при $B : Ц = 1,0$.

Из табл. 34 следует, что прочность глиноцементных камней, твердеющих при температуре 75°C и атмосферном давлении, тем выше, чем меньше облегчителя содержится в растворе. Растворы, приготовленные с использованием 12% глинопорошка, имеют наиболее благоприятные сроки загустевания, а газопроницаемость их находится на одном уровне с проницаемостью растворов, содержащих 23 и 42% глинопорошка.

На рис. 28 показано изменение прочности диатомитоцементного камня в зависимости от удельного веса раствора при различных значениях водопотребности. Из рис. 28 следует, что оптимальной водопотребностью диатомита для растворов плотностью более $1,52 \text{ г/см}^3$ является $1,5 \text{ см}^3/\text{г}$, для растворов плотностью $1,52—1,38 \text{ г/см}^3$ $K_d = 2,0 \text{ см}^3/\text{г}$, а для растворов плотностью менее $1,38 \text{ г/см}^3$ $K_d = 2,5 \text{ см}^3/\text{г}$. Эти данные получены на растворах, которые твердели в течение двух суток при температуре 75°C и атмосферном давлении.

На основании обстоятельного изучения диатомитоцементных растворов (табл. 35) построена номограмма (рис. 29) для определения оптимальной величины дозирования диатомита и его водопотребности в зависимости от удельного веса раствора и условий его твердения. Пользование данной номограммой сводится к следующей-

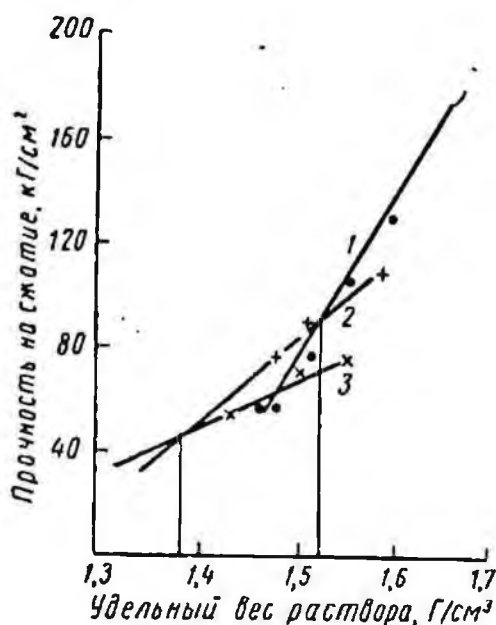


Рис. 28. Изменение прочности диатомито-цементного камня в зависимости от удельного веса раствора.
1 — при $K_d=1,5$; 2 — при $K_d=2,0$; 3 — при $K_d=2,5$.

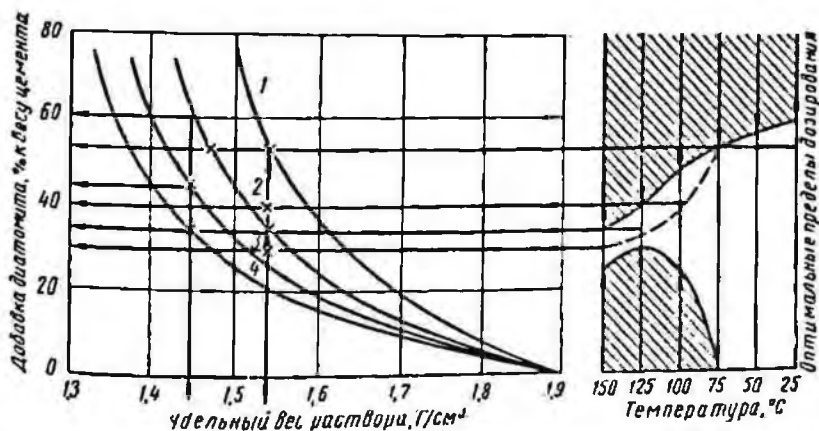


Рис. 29. Номограмма для установления оптимальной добавки диатомита и его водопотребности в зависимости от удельного веса и условий твердения раствора.

1 — $K_d=1,5$; 2 — $K_d=2,0$; 3 — $K_d=2,5$; 4 — $K_d=3,0$.

Таблица 35

Влияние водопотребности диатомита на состав раствора и прочность при сжатии цементного камня, приготовленного из цемента для «горячих» скважин

Диатомит		В:Ц	Удель- ный вес, г/см ³	Условия опыта		Длитель- ность хра- нения об- разцов, сутки	Прочность при сжа- тии, кг/см ²
количест- во, % к ве- су цемента	водопот- ребность, см ³ /г			t, °C	p, кг/см ²		
25	2,0	0,95	1,58	75	1	2	110
40	1,5	1,05	1,59	75	1	2	132
40	2,0	1,25	1,51	75	1	2	87
75	1,5	1,55	1,51	75	1	2	75
50	2,0	1,45	1,48	75	1	2	77
100	1,5	1,90	1,48	75	1	2	54
20	2,0	0,85	1,63	100	300	1	76
30	1,5	0,90	1,63	100	300	1	130
20	2,5	0,95	1,59	100	300	1	83
30	2,0	1,05	1,57	100	300	1	85
40	1,5	1,05	1,58	100	300	1	155
30	2,5	1,20	1,52	100	300	1	77
40	2,0	1,25	1,52	100	300	1	107
30	3,0	1,35	1,47	100	300	1	43
40	2,5	1,45	1,46	100	300	1	120
50	2,0	1,45	1,48	100	300	1	92
20	2,5	0,95	1,59	150	300	1	112
30	2,0	1,05	1,57	150	300	1	209
40	1,5	1,05	1,58	150	300	1	96
30	2,5	1,20	1,52	150	300	1	215
40	2,0	1,25	1,52	150	300	1	64
50	1,5	1,20	1,55	150	300	1	69
30	3,0	1,35	1,47	150	300	1	112
40	2,5	1,45	1,46	150	300	1	43
50	2,0	1,45	1,48	150	300	1	60

му. Пусть по условию цементирования надо приготовить облегченный диатомито-цементный раствор плотностью 1,54 г/см³, который бы после твердения при температуре 150°C превращался в камень наибольшей прочности. Из этой номограммы видно, что раствор, предназначенный для цементирования забоя скважины (150°C), должен содержать в своем составе 30% диатомита от веса цемента. Водопотребность диатомита в этом случае может быть найдена методом экстраполяции между кривыми 2 и 3 и будет равна 2,25 см³/г.

Аналогичным образом может быть найден оптимальный состав раствора плотностью $1,45 \text{ г/см}^3$, предназначенный для цементирования скважины с забойной температурой 125°C .

Незаштрихованная правая часть номограммы представляет собой область оптимального дозирования диатомита для растворов, твердеющих при температурах $150\text{--}25^\circ\text{C}$. Пунктирная кривая указывает процентное содержание диатомита, при котором облегченный це-

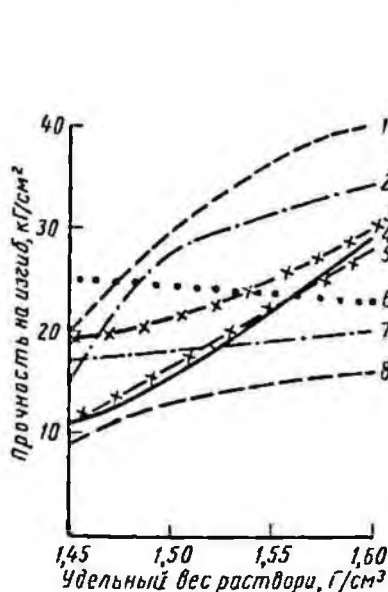


Рис. 30. Изменение прочности цементного камня в зависимости от удельного веса раствора. Образцы выдерживались двое суток при $t=75^\circ\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$.

- 1 — растворы с добавкой диатомита;
2 — растворы с добавкой ОДП;
3 — растворы с добавкой асбозурита;
4 — растворы с добавкой часовьярского глинопорошка; 5 — растворы с добавкой асбеста; 6 — ППЦ-м 400;
7 — растворы с добавкой трепела;
8 — растворы с добавкой глины.

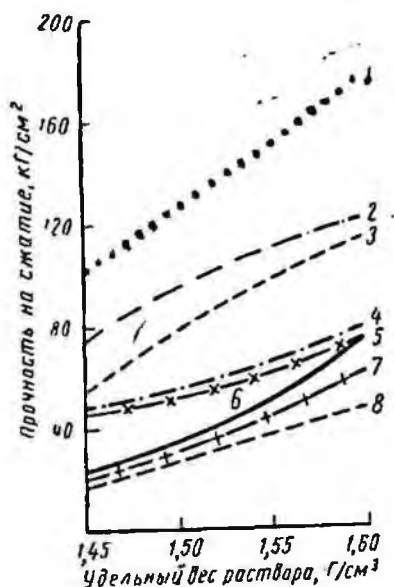


Рис. 31. Изменение прочности цементного камня в зависимости от удельного веса раствора. Образцы выдерживались двое суток при $t=75^\circ\text{C}$ и $p=1 \text{ кг/см}^2$.

- 1 — растворы из ППЦ-м 400; 2 — растворы из ЦГС+трепел; 3 — растворы из ЦГС+диатомит; 4 — растворы из ЦГС+ОДП; 5 — растворы из ЦГС+асбозурит; 6 — растворы из ЦГС+асбест; 7 — растворы из ЦГС+глинопорошок; 8 — растворы из ЦГС+глина.

ментный раствор затвердевает в камень с максимальной прочностью на сжатие для температуры твердения выше 75°C .

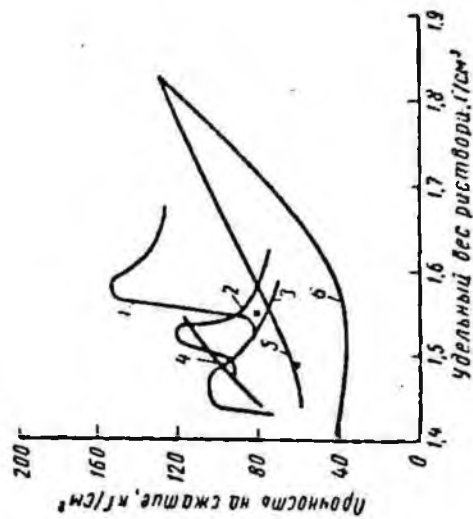


Рис. 32. Изменение прочности цементного камня в зависимости от удельного веса раствора. Образцы выдерживались один сутки при $t=100^{\circ}\text{C}$ и $p=300 \text{ кг/см}^2$.
 1 — ЦГС+диатомит, $K_d=1.5$; 2 — ЦГС+диатомит, $K_d=2.0$; 3 — ЦГС+диатомит, $K_d=2.5$; 4 — ЦГС+диатомит, $K_d=3.0$; 5 — ЦГС+ОДП; 6 — ЦГС+асбозурит.

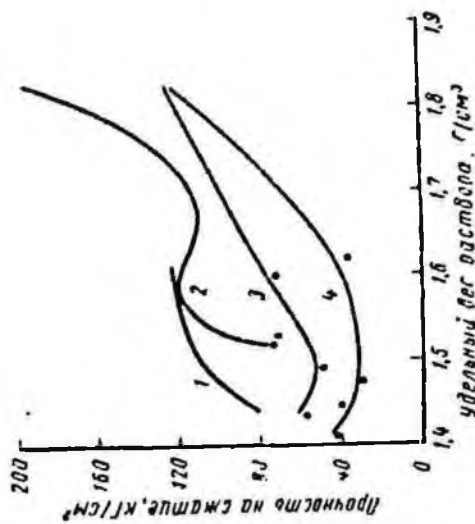


Рис. 33. Изменение прочности цементного камня в зависимости от удельного веса раствора. Образцы выдерживались один сутки при $t=125^{\circ}\text{C}$ и $p=300 \text{ кг/см}^2$.
 1 — ЦГС+диатомит, $K_d=1.5$; 2 — ЦГС+диатомит, $K_d=2.0$; 3 — ЦГС+ОДП; 4 — ЦГС+асбозурит.

Поскольку прочность цементного камня считается важнейшим свойством, определяющим пригодность тампонажного цемента для разобщения пластов, были построены графические зависимости между удельным весом раствора и прочностью его камня для различных условий твердения. Эти зависимости позволяют установить область применения облегченных цементных растворов и ориентировочно определить наиболее оптимальный их состав. Из данных, приведенных на рис. 30—34, видно, что не все облегченные цементные растворы удельного веса ниже $1,5 \text{ Г/см}^3$ затвердевают в камни с прочностью на сжатие более 50 кг/см^2 (рис. 31), кривые 6, 7, 8, рис. 32, кривая 6, рис. 33, кривая 4, рис. 34, кривая 6).

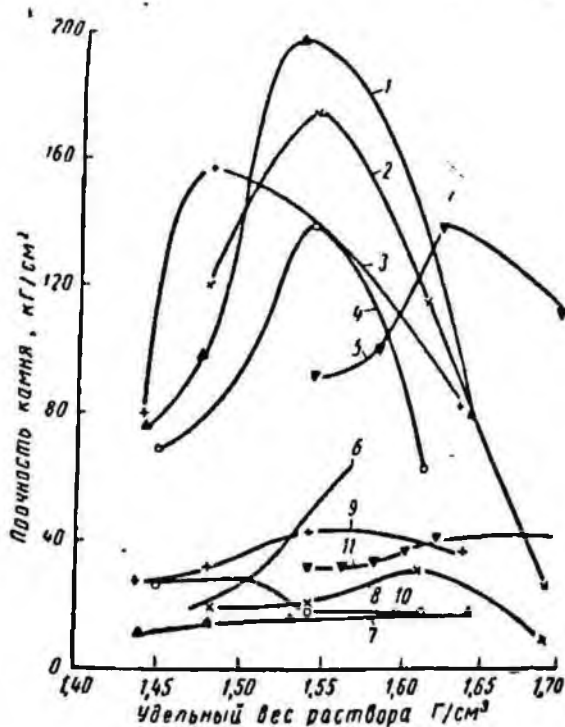


Рис. 34. Изменение прочности цементного камня в зависимости от удельного веса раствора и вида облегчающей добавки. Образцы выдерживались одни сутки при $t=150^\circ\text{C}$ и $p=300 \text{ кг/см}^2$.

1, 2, 3, 4, 5, 6 — прочность на сжатие, 7, 8, 9, 10, 11 — прочность на изгиб; 1, 7 — ЦГС+диатомит; 2, 8 — ЦГС+трепел; 3, 9 — ЦГС+молотый ВПП; 4, 10 — ЦГС+молотый ОДП; 5, 11 — ЦГС+городыщенский глинопорошок; 6 — ЦГС+глина.

Таблица 36

Данные для определения оптимального состава облегченных тампонажных смесей на основе портландцемента и различных добавок в зависимости от удельного веса и температуры твердения раствора

Облегчающая добавка	Температура твердения раствора, °C	Удельный вес раствора, Г/см ³									
		1,65		1,60		1,55		1,50		1,45	
		K _д	m _д	K _д	m _д	K _д	m _д	K _д	m _д	K _д	m _д
Асбозурит	<100	3,2	0,08	3,2	0,11	3,2	0,16	3,2	0,22	3,2	0,29
Диатомит	<80	1,5	0,21	1,5	0,31	1,5	0,45	2,0	0,41	2,0	0,58
Трепел	100	1,5	0,21	1,5	0,31	1,5	0,45	2,0	0,41	2,5	0,41
	125	1,5	0,21	1,5	0,31	2,0	0,30	2,0	0,41	2,5	0,41
ОДП	150	1,5	0,21	1,5	0,31	2,0	0,30	2,5	0,30	3,0	0,32
	<100	1,5	0,20	1,5	0,30	1,5	0,44	1,5	0,62	1,5	0,94
ВПП*	130—150	—	—	—	—	1,5	0,44	1,5	0,62	1,5	0,94
	<100	4,0	0,06	4,0	0,09	4,0	0,12	4,0	0,16	4,0	0,22
Бентонит	130—150	—	—	1,5	0,31	1,5	0,45	2,0	0,41	2,5	0,41
	<100	4,5	0,06	4,5	0,08	4,5	0,11	4,5	0,15	4,5	0,20
Глина	<100	3,0	0,09	3,0	0,13	3,0	0,18	3,0	0,25	3,0	0,34
	130—150**	1,0	0,47	1,0	0,77	1,0	1,35	—	—	—	—

* Вспученный перлитовый песок, рекомендуемый для приготовления облегченных цементных растворов, предназначенных для цементирования скважин с забойной температурой 130—150°С, должен быть предварительно помолот.

** Имеется в виду глинопопорошок Городыщенского месторождения, позволяющий получать термостойкие глино-цементные камни. Разработчик Н. И. Марухняком.

На основании анализа экспериментального материала составлена табл. 36 для определения величины дозирования конкретных облегчителей в долях единицы от веса цемента m_d в зависимости от заданного удельного веса раствора и условий его твердения. Данную таблицу можно рассматривать как основу для определения состава облегченной тампонажной смеси, предназначенной для приготовления растворов удельного веса 1,65, 1,60, 1,55, 1,50 и 1,45 Г/см³. В расчетах удельный вес цемента был принят равным $\gamma_d = 3,13$, а водопотребность $K_d = 0,5$.

В зависимости от ряда причин водопотребность цемента и облегчителя может иметь значения, отличные от приведенных в табл. 36. В связи с этим рекомендуем несложные способы расчета состава облегченного цемента.

Расчет состава тампонажных растворов пониженного удельного веса

Широкое применение цементных растворов пониженного удельного веса потребовало выработать простую и удобную в работе методику определения состава тампонажной смеси. По мнению авторов, отправными пунктами данной методики могут быть удельный вес и водопотребность исходных компонентов смеси. Ниже приводятся два способа определения состава облегченного тампонажного раствора в зависимости от его удельного веса.

I способ. Расчет состава компонентов смеси для получения 1 м³ цементного раствора пониженной плотности.

Известно, что удельный вес цементного раствора γ равен суммарному весу всех его компонентов, деленному на их полный объем, т. е.

$$\gamma = \frac{q_d + q_d + q_v}{\frac{q_d}{\gamma_d} + \frac{q_d}{\gamma_d} + \frac{q_v}{\gamma_v}} \quad (17)$$

Поскольку установлено, что $q_v = q_d K_d + q_d K_d$, и учитывая, что на практике приходится пользоваться облегчающими материалами повышенной влажности (асбозурит,

диатомит и др.), уравнение (17) записываем в следующем виде:

$$\gamma = \frac{q_{\text{ц}}(1 + K_{\text{ц}}) + q_{\text{д}}\left(\frac{100 - W}{100}\right)(1 + K_{\text{д}})}{q_{\text{ц}}\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}}\right) + q_{\text{д}}\left(\frac{100 - W}{100}\right)\left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}\right)}, \quad (18)$$

где $q_{\text{ц}}$, $q_{\text{д}}$ — количество цемента и облегчающей добавки, необходимое для приготовления 1 м³ облегченного цементного раствора удельного веса γ , в т; $\gamma_{\text{ц}}$, $\gamma_{\text{д}}$, $\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес цемента, облегчающей добавки и воды затворения в т/м³; $K_{\text{ц}}$, $K_{\text{д}}$ — водопотребность цемента и облегчающей добавки в м³/т; W — влажность облегчающей добавки, определяемая по формуле:

$$W = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%,$$

где Q_1 — вес влажной пробы облегчающей добавки (100 г) в г; Q_2 — вес той же пробы обогачителя, высушенной до постоянного веса, в г.

В том случае, когда знаменатель в уравнении (18) равен 1 м³ тампонажного раствора, для определения $q_{\text{ц}}$ и $q_{\text{д}}$ можно записать два уравнения:

$$\begin{aligned} \gamma &= q_{\text{ц}}(1 + K_{\text{ц}}) + q_{\text{д}}\left(\frac{100 - W}{100}\right)(1 + K_{\text{д}}); \\ 1 &= q_{\text{ц}}\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}}\right) + q_{\text{д}}\left(\frac{100 - W}{100}\right)\left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}\right). \end{aligned}$$

Решая эти уравнения относительно $q_{\text{ц}}$ и $q_{\text{д}}$, находим

$$\begin{aligned} q_{\text{ц}} &= \frac{\gamma\left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}\right) - (1 + K_{\text{д}})}{(1 + K_{\text{ц}})\left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}\right) - (1 + K_{\text{д}})\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}}\right)}; \quad (19) \\ q_{\text{д}} &= \frac{100\left[\gamma\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}}\right) - (1 + K_{\text{ц}})\right]}{(100 - W)\left[(1 + K_{\text{д}})\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}}\right) - (1 + K_{\text{ц}})\left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}}\right)\right]} \quad (20) \end{aligned}$$

Обозначив удельный вес чистого цементного раствора при $B : Ц = K_{\text{ц}}$ через $\gamma_{\text{цф}}$, а удельный вес облегчающе-

го раствора в случае, когда водопотребность облегчителя равна K_d , через $\gamma_{ор}$ и записав, что

$$\gamma_{цр} = \frac{1 + K_{ц}}{\frac{1}{\gamma_{ц}} + \frac{K_{ц}}{\gamma_{в}}}, \quad \text{а} \quad \gamma_{ор} = \frac{1 + K_d}{\frac{1}{\gamma_d} + \frac{K_d}{\gamma_{в}}},$$

получим в окончательном виде

$$q_{ц} = \frac{\gamma_{цр}(\gamma + \gamma_{ор})}{(1 + K_{ц})(\gamma_{цр} + \gamma_{ор})}; \quad (21)$$

$$q_d = \frac{100 \gamma_{ор} (\gamma_{цр} - \gamma)}{(100 - W)(1 + K_d)(\gamma_{цр} - \gamma_{ор})}. \quad (22)$$

Зная $q_{ц}$ и q_d , нетрудно найти и количество воды $q_{в}$, необходимое для приготовления 1 м³ облегченного цементного раствора заданного удельного веса:

$$q_{в} = \gamma - (q_{ц} + q_d). \quad (23)$$

Определив потребность в исходных материалах для получения 1 м³ облегченного раствора, легко найти необходимое количество цемента, облегчающей добавки и воды для приготовления заданного объема V_p раствора из уравнений:

$$G_{ц} = q_{ц} V_p;$$

облегчающей добавки

$$G_d = q_d V_p;$$

воды

$$G_{в} = q_{в} V_p.$$

В частном случае, когда облегченный цементный раствор готовится из смеси заводского приготовления (пуццолановый портландцемент, различные виды цементных пылей и др.), расчет значительно упрощается. Так, количество цементной смеси удельного веса γ_c , необходимой для получения 1 м³ раствора удельного веса γ , определится из уравнения

$$q_c = \frac{\gamma_c (\gamma - 1)}{\gamma_c - 1},$$

а количество воды $q_{в}$, необходимой для приготовления 1 м³ раствора заданного удельного веса, — из уравнения

$$q_{в} = \gamma - q_c.$$

Дальнейшая часть расчета производится аналогично ранее рассмотренной.

II способ. Определение состава компонентов тампонажной смеси из расчета на 1 т цемента.

В этом случае удельный вес облегченного цементного раствора γ может быть записан в следующем виде

$$\gamma = \frac{(1 + K_{\text{ц}}) + m_{\text{д}} \left(\frac{100 - W}{100} \right) (1 + K_{\text{д}})}{\left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) + m_{\text{д}} \left(\frac{100 - W}{100} \right) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right)}, \quad (24)$$

где $m_{\text{д}}$ — количество облежителя на единицу веса цемента; остальные значения те же, что и в формуле (18).

Решая данное уравнение относительно $m_{\text{д}}$ находим

$$m_{\text{д}} = \frac{100 \left[(1 + K_{\text{д}}) - \gamma \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) \right]}{(100 - W) \left[\gamma \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) - (1 + K_{\text{д}}) \right]}, \quad (25)$$

а подставляя значения $\gamma_{\text{пр}}$ и $\gamma_{\text{ор}}$, получаем

$$m_{\text{д}} = \frac{100 \gamma_{\text{ор}} (1 + K_{\text{ц}}) (\gamma_{\text{пр}} - \gamma)}{(100 - W) (1 + K_{\text{д}}) (\gamma - \gamma_{\text{ор}})}. \quad (26)$$

Определив $m_{\text{д}}$, нетрудно найти количество воды $m_{\text{в}}$, необходимое для приготовления облегченного цементного раствора из 1 т цемента:

$$m_{\text{в}} = K_{\text{ц}} + K_{\text{д}} m_{\text{д}} \left(\frac{100 - W}{100} \right).$$

Зная $m_{\text{д}}$ и $m_{\text{в}}$, легко отыскать выход облегченного тампонажного раствора на 1 т цемента V по формуле

$$V = \frac{1 + m_{\text{д}} + m_{\text{в}}}{\gamma} \quad (27)$$

или из уравнения (28), правая часть которого является знаменателем в формуле (24):

$$V = \left(\frac{1}{\gamma_{\text{ц}}} + \frac{K_{\text{ц}}}{\gamma_{\text{в}}} \right) + m_{\text{д}} \left(\frac{100 - W}{100} \right) \left(\frac{1}{\gamma_{\text{д}}} + \frac{K_{\text{д}}}{\gamma_{\text{в}}} \right). \quad (28)$$

Если известна зависимость между компонентами смеси и выходом облегченного раствора заданного удельного веса на 1 т цемента, легко можно определить по-

требность в исходных материалах для приготовления необходимого объема раствора V_p из следующих соотношений:
цемента

$$G_c = \frac{V_p}{V};$$

облегчающей добавки

$$G_d = m_d G_c;$$

воды

$$G_a = m_a G_c.$$

Физико-механические характеристики цементного раствора и камня должны быть исследованы в промышленной лаборатории в условиях, приближенных к скважинным.

В промышленных условиях не всегда возможно выдерживать то дозирование добавки, которое получено согласно расчету. Это объясняется тем фактом, что тампонажная смесь, как правило, готовится на буровой вручную, а вес облегчителя в мешках колеблется в широких пределах. Так, если вес мешка тампонажного цемента в среднем составляет 50 кг, то вес мешка асбозурита — 20—25 кг, ОДП — 25—30 кг, глинопорошка — 20—35 кг, ВПП — 3—10 кг и т. д. В связи с этим в каждом конкретном случае после определения усредненного веса мешка облегчителя необходимо корректировать состав смеси. При значительных отклонениях фактического состава смеси от расчетного следует произвести перерасчет как по количеству цемента и облегчителя, так и по объему воды затворения.

Приготовление тампонажных смесей

Приготовление многокомпонентных тампонажных смесей в промышленных условиях осуществляется путем подачи на воронку загрузочного шнека цементосмесительной машины одновременно цемента и облегчающей добавки. Причем для получения однородной смеси необходимо строгое соблюдение соотношения между цементом и облегчающей добавкой. Практика показывает, что при равномерной и одновременной засыпке исходных компонентов смесь получается достаточно однородной.

В ряде случаев для приготовления однородной смеси рекомендуется ее повторное перезатаривание из одного бункера смесителя в другой.

Для контроля качества многокомпонентной смеси необходимо отбирать пробы из бункера смесителя. Смесь следует считать пригодной для получения облегченного тампонажного раствора, если объемный вес ее колеблется в пределах $\pm 5\%$ от нормы, устанавливаемой опытным путем в промысловой лаборатории.

Затаривание СМН-20 многокомпонентной смесью должно производиться не более чем за сутки до начала заливки. В случае, когда облегчитель имеет повышенную влажность (асбозурит, диатомит), авторами установлено, что разрыв во времени между окончанием затаривания и началом цементирования скважин должен быть минимальным (не более 3—4 ч).

При длительном хранении в бункерах 2СМН-20 тампонажных смесей, содержащих облегчитель с влажностью до 10—15%, наблюдается нарушение режима работы смесителей. Это происходит в связи с ухудшением поступления смеси из 2СМН-20 за счет ее зависания и сводообразований в бункере.

В последнее время для получения наиболее однородных смесей применяются специальные дозирующие устройства. Однако для улучшения качества цементировочных работ необходимо, чтобы многокомпонентные тампонажные смеси различного назначения готовились на специализированных предприятиях.

Затворение облегченных тампонажных смесей

Затворение тампонажных смесей на буровой следует производить на доброкачественной технической воде, предварительно проверенной в промысловой лаборатории.

В связи с тем, что выход раствора на 1 т облегченной смеси значительно выше, чем у чистого цементного раствора, закачивание его в скважину должно осуществляться двумя цементировочными агрегатами, а чтобы устранить закупоривание смеси в штуцере цементосмесителя, рекомендуется давление поступающей воды поддерживать в пределах 12—15 кг/см² [7].

Поскольку качество тампонажного раствора и цементировочных работ во многом зависит от содержания воды в смеси, необходимо, чтобы ее количество было близко к оптимальному. Единственным показателем оптимального содержания воды в растворе в процессе цементирования является удельный вес раствора. Поэтому во время затворения необходимо тщательно следить за изменением удельного веса раствора и своевременно корректировать работу цементосмесительных машин и агрегатов. Замер удельного веса раствора во время его закачивания в скважину по каждому смесителю следует производить не реже, чем через 30—60 сек. Особенно внимательно следует замерять удельный вес закачиваемого раствора при затворении перлито-цементных смесей, так как при недостаточном водо-цементном отношении этот раствор в скважине может быстро загустеть и вызвать преждевременное повышение давления. В процессе затворения следует считать допустимым отклонение удельного веса от заданной величины не более чем на $0,03 \text{ Г/см}^3$.

Для получения в скважине наиболее однородного по удельному весу и консистенции раствора желательно затворять и закачивать облегченную тампонажную смесь с использованием возможно большего количества одновременно работающих цементосмесительных машин. Для этой же цели процесс затворения и закачивания облегченного тампонажного раствора желательно производить с разрывом во времени в 2—5 мин, для чего затворяемый раствор перед закачиванием в скважину необходимо помещать в специальную емкость объемом 5—10 м³, а уже оттуда подавать в скважину.

При обработке раствора замедлителями или ускорителями схватывания следует учитывать, что большая часть реагента адсорбируется на поверхности облегчителя, а это снижает действие реагента. Поэтому при обработке облегченных растворов следует брать повышенное количество химических реагентов — регуляторов схватывания [7].

Учитывая то обстоятельство, что прочность камней из облегченных растворов в большинстве случаев ниже, чем из обычных, цементирование низа колонн в интервале 100—300 м от башмака следует производить чистыми портландцементными растворами. В тех случаях,

когда забойная температура превышает 100°C , низ колонны можно цементировать и растворами пониженного удельного веса. Однако в качестве облегчителя в таких растворах должны использоваться активные минеральные добавки (диатомит, трепел, опока и др.). В этом случае механическая прочность цементных камней будет не ниже, чем у чистых тампонажных растворов.

Оценка качества цементировочных работ

Завершающим этапом цементирования скважины является оценка качества цементировочных работ. В настоящее время еще не разработаны достаточно надежные средства и методы проведения наиболее полной оценки результатов цементирования.

В комплекс геолого-геофизических исследований по определению качества цементировочных работ в скважинах входят: термометрический метод, метод радиоактивных изотопов, гамма-гамма-каротаж и др. В последние годы за рубежом качество цементирования скважин проверяется с помощью так называемого акустического каротажа сцепления [18].

В производственной практике чаще всего контроль качества цементировочных работ сводится к определению высоты подъема тампонажного раствора в затрубном пространстве и проверке колонны на герметичность методом нагнетания жидкости и снижения уровня.

✓ При цементировании скважины с использованием облегченных тампонажных растворов не всегда удается определить верхнюю границу цементного камня, устанавливаемую по характерному для чистых цементных растворов резкому изгибу кривой на термограмме, так как термические свойства тампонажных растворов пониженной плотности значительно ниже. Снижение термических свойств облегченных тампонажных растворов объясняется тем фактом, что в единице объема облегченного раствора портландцемента содержится в 1,5—2,0 раза меньше, чем у чистого цементного. Это и вызывает трудности, которые встречаются при отбивке цементного кольца термометрическим методом, производимым по аналогии с чистыми цементными растворами через 20—30 ч после окончания заливки. В то же время известно, что наиболее благоприятные сроки проведения ОЦК тер-

мометрическим методом следует привязывать ко времени максимума тепловыделения раствора, которое зависит как от состава смеси, так и от температуры окружающей среды: чем она выше, тем быстрее наступает время максимума выделения тепла. Н. И. Шацовым [33] установлено, что максимум тепловыделения для обычного портландцемента, твердеющего в нормальных условиях, находится в пределах 10—12 ч. Очевидно, что с повышением температуры и давления, т. е. с интенсификацией процессов гидратации и гидролиза портландцемента, период тепловыделения заметно сократится. Это подтверждается данными американских ученых [38], которыми установлено, что наиболее оптимальные сроки ОЦК термометрическим методом зависят от условий твердения раствора и находятся в пределах 4—12 ч после окончания заливки (табл. 37).

Таблица 37

Влияние вида цементного раствора и температуры твердения его на оптимальные сроки проведения ОЦК

Состав смеси, % вес			Время проведения ОЦК после конца заливки в ч при температуре твердения раствора, °С			
цемент	добавка		38	49	60	71
	наименование	количес- во, % от веса цемента				
Портландцемент класса А	—	—	8—12	8—12	6—9	4—8
То же	Бентонит	4	8—12	8—12	6—9	4—8
»	»	8	9—12	9—12	6—9	6—9
»	Пуццолана	50	8—12	8—12	6—9	4—8
»	Бентонит + ВПП (пер- лит)	4 14	9—12	9—12	9—12	9—12
Медленно схваты- вающийся	—	—	—	16—24	16—24	16—24

При цементировании скважин облегченными цементными растворами на Октябрьской и Джанкойской площадях треста Крымнефтегазразведка также трудно было установить место нахождения верхней части цементного раствора. Первоначально для повышения качества ОЦК на двух буровых до закачивания облегченной смеси*

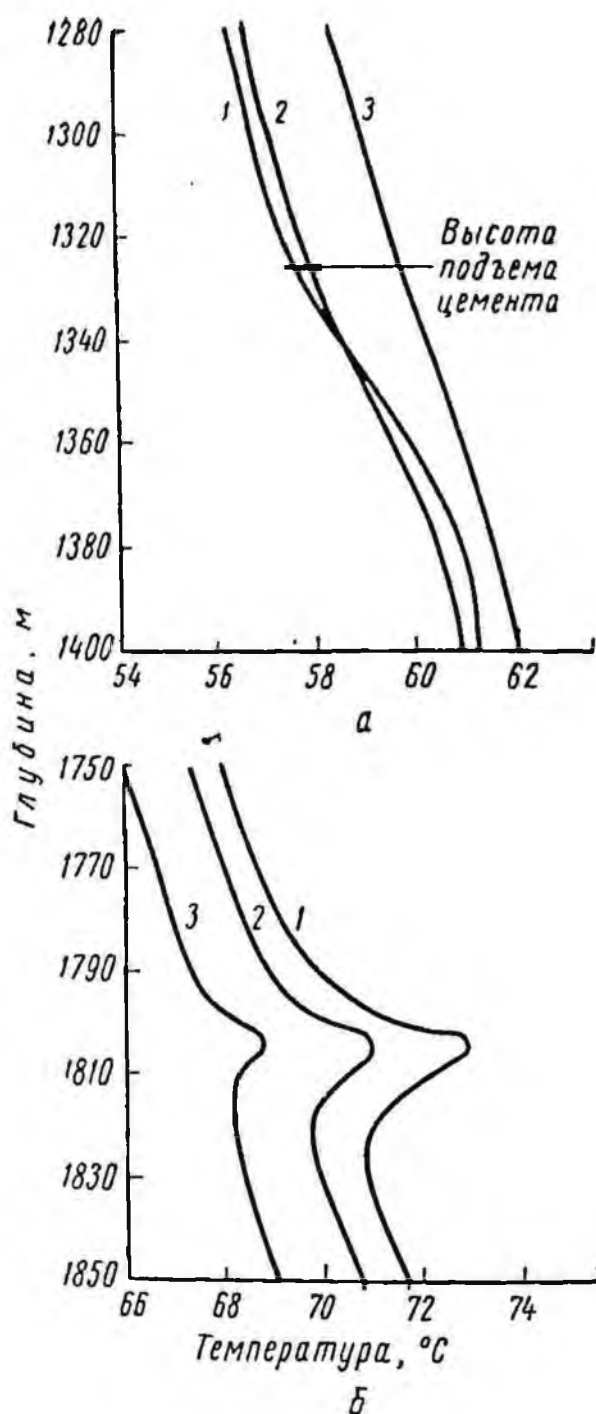


Рис. 35. Характер изменения кривых на термограммах в зависимости от сроков проведения ОЦК.

а — без макроаварии; б — при наличии макроаварии.
 1 — ОЦК через 15 ч после окончания заливки; 2 — ОЦК через 22 ч; 3 — ОЦК через 30 ч.

си в скважину нагнеталось 3 т чистого цемента, однако четкой отбивки кольца не получено. В связи с этим было рекомендовано произвести опытную ОЦК облегченного перлита-глино-цементного раствора через 15, 22 и 30 ч после окончания заливки.

Удовлетворительные результаты при проведении ОЦК термометрическим методом получено через 15 ч (рис. 35, а, кривая 1). Из рис. 35, а видно, что замер температуры, производимый в скважине через 30 ч (кривая 3), значительно осложняет расшифровку термограммы. Еще нагляднее влияние времени проведения ОЦК прослеживается по термограммам, снятым через те же промежутки времени в интервале макроаверны (рис. 35, б). Отклонение от средней расчетной величины при замере температуры через 15 ч составляет $2,8^{\circ}\text{C}$, через 22 ч — $1,7^{\circ}\text{C}$, а через 30 ч — только 1°C . Из этих опытных данных, полученных на скв. 20 Октябрьская, хорошо видно, что качество термометрических работ неразрывно связано со сроками их проведения. Особое внимание на время проведения термометрических работ следует обращать в тех случаях, когда облегчителем является неактивная или слабоактивная в гидравлическом отношении добавка (глина). Если облегчителем является активная минеральная добавка, то выделение тепла увеличивается, по сравнению с инертной добавкой, за счет реакции между известью и пуццоланой. По данным Ф. М. Ли, у растворов, содержащих в своем составе активные минеральные добавки, уменьшение тепловыделения в сравнении с чистым портландцементом составляет около половины процентного содержания введенной добавки.

Таким образом, трудности, встречаемые при проведении ОЦК облегченных цементных растворов, могут быть устранены проведением термокаротажных работ в сроки, близкие по времени к максимуму тепловыделения, т. е. через 6—10 ч после окончания цементирования. В случае, если высота подъема цементного раствора отбивается недостаточно четко, желательно произвести повторный замер через 6—10 ч. Совмещением термограмм различных замеров в зависимости от характера нарастания температуры можно с большой точностью определить высоту подъема цементного раствора в затрубном пространстве.

Эти работы не исключают возможность использования короткоживущих радиоактивных изотопов для улучшения условий отбивки цементного кольца, а также широкого применения цементомеров.

Технико-экономическая эффективность применения тампонажных растворов пониженной плотности

Подсчитать экономическую эффективность применения того или иного вида облегченного цементного раствора довольно сложно в связи с тем, что в ряде случаев невозможно правильно и полно оценить затраты, производимые на качественное разобщение всех продуктивных горизонтов. Однако совершенно очевидно, что широкое использование растворов пониженного удельного веса не только повысит качество цементировочных работ, но и значительно сократит затраты, идущие на крепление, испытание и эксплуатацию скважин.

Экономическая эффективность от применения тампонажных растворов пониженного удельного веса при креплении глубоких нефтяных и газовых скважин может быть получена за счет следующих показателей:

- улучшения качества крепления ствола скважин;
- устранения в значительном объеме аварийно-исправительных работ, связанных с грифообразованием, затрубными давлениями и др.;

- сокращения потерь цементного раствора в процессе заливки скважины при наличии зон поглощения и, особенно, в случае гидравлического разрыва пластов в зонах продуктивных пород, где уход цементного раствора может привести к длительным и безрезультатным работам по испытанию продуктивных горизонтов;

- проведения цементировочных работ без двух- и многоступенчатых заливок;

- экономии на тампонирующих материалах ввиду снижения стоимости 1 м³ облегченного раствора по сравнению с обычным портландцементным.

Для подсчета прямой экономии от применения тампонажных растворов пониженной плотности за исходную расчетную единицу берутся затраты, отнесенные на получение 1 м³ тампонажного раствора.

При определении затрат на приготовление 1 м³ тампонажного раствора были приняты преysкуранные цены, заимствованные из СУСН и ППР на строительство

нефтяных и газовых скважин выпуска 1964 г., а также фактические данные, полученные расчетом прямых расходов с учетом транспортных издержек. В табл. 38 приводится стоимость основных материалов, идущих на приготовление облегченных цементных растворов.

Таблица 38

Наименование материала	Единица измерения	Преискуррантная цена с учетом транспортных расходов, руб.—коп.	Источник
Цемент тампонажный в мешках	т	17—33	СУСН и ППР
Цемент тампонажный навалом	т	15—88	То же
Асбозурит	т	21—92	Инзенский комбинат
Бентонит в порошке	т	31—01	СУСН и ППР
Вспученный перлитовый песок	м ³	4—13	То же
То же	т	51—35	»
Глинопорошок Константиновского завода	т	16—32	»
Диатомит инзенский	т	8—20	Инзенский комбинат
Обожженный диатомитовый песок	т	31—96	То же
Трепел брянский (навалом)	т	4—00	Брянский цементный завод
Трепел брянский (в мешках)	т	8—00	То же
Пуццолановый портландцемент М-400	т	12—70	СУСН и ППР
Пуццолановый портландцемент М-300	т	11—10	То же
Вода	м ³	0—10	Усредненные данные по УССР

Снижение затрат на тампонажные материалы (цемент, облегчитель, вода), предназначенные для получения 1 м³ облегченного цементного раствора показано на рис. 36.

Как видно из рис. 36, по мере снижения удельного веса раствора уменьшаются затраты на материалы, необходимые для приготовления 1 м³ облегченного раствора.

Для сравнительной оценки эффективности использования облегченных цементов и определения прямой экономии, получаемой за счет сокращения затрат на мате-

риалы, отнесенных к 1 м³ тампонажного раствора, авторами предлагается следующая расчетная формула:

$$Z = \left[\frac{\gamma_{цр} (C_{ц} - C_{в})}{(1 + K_{ц}) (\gamma_{цр} - \gamma_{ор})} - \frac{\gamma_{ор} (C_{д} - C_{в})}{(1 + K_{д}) (\gamma_{цр} - \gamma_{ор})} + C_{в} \right] \gamma + \frac{\gamma_{цр} \gamma_{ор}}{(\gamma_{цр} - \gamma_{ор})} \left[\frac{C_{д} - C_{в}}{1 + K_{д}} - \frac{C_{ц} - C_{в}}{1 + K_{ц}} \right],$$

где $K_{ц}$, $K_{д}$ — водопотребность цемента и добавки; $\gamma_{цр}$, $\gamma_{ор}$ — удельный вес обычного цементного и облегчающего раствора; γ — плотность тампонажного раствора пониженного удельного веса; Z — суммарные затраты на материалы; $C_{ц}$, $C_{д}$, $C_{в}$ — преysкурантная цена с учетом транспортных расходов цемента, добавки и воды.

Из уравнения видно, что затраты на материалы, необходимые для приготовления 1 м³ облегченного раствора, изменяются линейно от его плотности, так как в этом

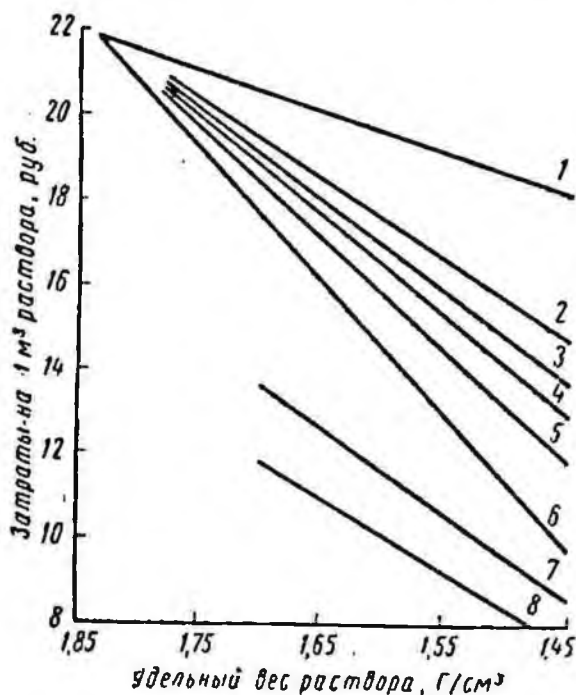


Рис. 36. Изменение стоимости 1 м³ тампонажного раствора с уменьшением его удельного веса.

1 — ЦГС+ОДП; 2 — ЦГС+ВПП; 3 — ЦГС+бентонит; 4 — ЦГС+асбозурит; 5 — ЦГС+глина; 6 — ЦГС+трепел; 7 — ППЦ-м 400; 8 — ППЦ-м 300.

уравнении для каждого конкретного случая все величины постоянны, кроме γ .

На основании приведенной выше расчетной формулы и построен график изменения стоимости 1 м³ различных видов облегченных тампонажных растворов с уменьшением их удельных весов (см. рис. 36). Из этого графика видно, что наиболее экономичные растворы получаются из пуццолановых портландцементов марок 300 и 400 Брянского цементного завода. Их стоимость в 2—2,5 раза ниже стоимости обычных тампонажных растворов нормальной плотности. Высокоэкономичными являются также цементные растворы, где в качестве облегчающей добавки применяются брянский трепел и глинопорошки с водопотребностью более 3—4,5 см³/г.

Однако основной эффект от использования тампонажных растворов пониженной плотности состоит не в экономии на прямых затратах, а в том, что применение этих растворов позволит повысить качество цементировочных работ в нефтяных, газовых и разведочных скважинах.

Промысловые испытания

В результате проведения полного комплекса лабораторных исследований были рекомендованы к промышленному внедрению цементные растворы, получаемые на базе тампонажного цемента с добавками вспученного перлитового песка, асбозурита, инзенского диатомита, обожженного диатомового песка, а также пуццоланового портландцемента Брянского завода. Эти цементные растворы испытывались при цементировании промежуточных и эксплуатационных колонн в нефтяных, газовых и разведочных скважинах [21].

Опытно-промышленные испытания новых видов облегченных цементных растворов преследовали цель выявить особенности их применения при использовании существующего цементировочного оборудования, а также определить степень их эффективности по сравнению с обычными цементами.

При проведении первого цементирования с применением вспученного перлитового песка на скв. 3 Дорогинка (Нежинская контора разведочного бурения) перлитоглино-цементная смесь готовилась с предварительным перемешиванием цемента, перлита и глины в специаль-

ном ящике размером $3,0 \times 1,5 \times 0,5$ м. С одной стороны ящик имел сточный желоб, расположенный над воронкой цементосмесителя. Компоненты смеси засыпались в ящик слоями в соответствии с рецептом, а затем равномерно выгружались через желоб в воронку смесителя. При последующих заливках смесь готовилась непосредственно на воронке загрузочного шпека СМН-20 без предварительного перемешивания.

В соответствии с принятым рецептом (87% цемента, 5% перлита, 8% глинопорошка и $B : Ц = 1,0$) в две цементосмесительные машины было загружено 18,5 т тампонажного цемента для «холодных» скважин, 1,1 т вспученного перлита объемного веса $0,13 \text{ т/м}^3$ и 1,7 т глинопорошка. Для получения более прочного цементного камня у башмака колонны в третью цементосмесительную машину было загружено 8 т тампонажного портландцемента.

Затворение и закачивание перлитоглиноцементного раствора проходили нормально. Удельный вес раствора в процессе затворения поддерживался в пределах $1,46—1,48 \text{ Г/см}^3$. На закачивание облегченного раствора тремя цементировочными агрегатами было затрачено 23 мин, а портландцементного раствора — 8 мин.

Продавливание осуществлялось нормально, и давление в конце продавливания не превышало 70 кг/см^2 . В качестве продавочной жидкости использовался глинистый раствор удельного веса $1,2 \text{ Г/см}^3$.

По результатам ОЦК цементный раствор был встречен на глубине 650 м от устья скважины, что согласуется с расчетными данными.

При цементировании 219-мм промежуточной колонны, спущенной на глубину 2078 м, в скв. 1 Адамовка также была использована перлитоглиноцементная смесь. Соотношение компонентов тампонажной смеси в этом случае было таким: цемент : перлит : глина = $1 : 0,1 : 0,1$. Водоцементное отношение — 1,2. Плотность перлитоглиноцементного раствора при затворении в среднем составила $1,32 \text{ г/см}^3$. В условиях скважины, в связи с поглощением зернами перлита части воды, удельный вес раствора увеличился до $1,48—1,50 \text{ Г/см}^3$.

При цементировании скважин на Рудковском газовом месторождении длительное время отмечались значительные недоподъемы (600—800 м) цементного раство-

ра до расчетных значений. Это приводило к неперекрыванию верхних газовых горизонтов, наличию высоких затрубных давлений и значительным перетокам газа в вышележащие горизонты. Использование обычных цементных и глиноцементных растворов не давало желаемых результатов. В целях ликвидации поглощений цементных растворов и улучшения качества цементировочных работ на этой площади была предложена тампонажная смесь с повышенной закупоривающей способностью. На скв. 195 Рудки Бориславской конторы разведочного бурения была зацементирована 127-мм эксплуатационная колонна с использованием перлитоглиноцементного раствора.

В соответствии с принятым соотношением компонентов облегченная смесь готовилась из расчета на 1 т цемента 0,4 м³ вспученного перлитового песка и 0,15 т глинопорошка при В:Ц=0,9. Для подъема раствора до устья скважины было взято 30 т цемента, 12 м³ перлита и 4,5 т глинопорошка. Вспученный перлитовый песок из г. Калуша был доставлен на буровую в одной цементосмесительной машине СМН-20.

Приготовление тампонажной смеси на буровой осуществлялось путем равномерной и одновременной подачи на воронку смесителя цемента, перлита и глины в заданном соотношении. Разгрузка смесителя с перлитом производилась через боковые люки, что значительно упростило процесс приготовления смеси.

При затворении облегченной смеси получался раствор удельного веса 1,45 Г/см³. В условиях скважины удельный вес раствора увеличился до 1,61 Г/см³. Затворение раствора осуществлялось четырьмя цементировочными агрегатами. Время на затворение составило 28 мин. Низ эксплуатационной колонны был закреплен глиноцементной смесью, содержащей 5% глинопорошка от веса цемента. В качестве продавочной жидкости служил глинистый раствор удельного веса 1,30 Г/см³. В конце продавливания было отмечено сильное повышение вязкости глинистого раствора на выходе из скважины (с 30 сек до «не течет») и обнаружены в нем зерна перлитового песка.

По результатам термокаротажных работ цементное кольцо было отбито на глубине 60 м от устья скважины. Затрубных газопроявлений скважина не имела.

Опыт применения перлитоглиноцементных растворов показал, что процессы затворения, закачивания и продавливания таких растворов проходят нормально и во всех случаях цементирования получены положительные результаты. В дальнейшем перлитоглиноцементные растворы с успехом были испытаны в Черноморской конторе бурения треста Крымнефтегазразведка и в ряде других районов.

Испытания облегченных цементных растворов с добавкой асбозурита и обожженного диатомового песка были проведены на Октябрьской площади (трест Крымнефтегазразведка). При цементировании промежуточных и эксплуатационных колонн на этой площади, как правило, наблюдался значительный недоподъем тампонажного раствора. Использование глиноцементных растворов не давало желаемых результатов в связи с наличием трещиноватых и кавернозных пород, а также пластов, предрасположенных к гидроразрыву. В процессе бурения скважин и в период их цементирования отмечались случаи поглощения растворов удельного веса $1,4 \text{ Г/см}^3$. Поглощение тампонажных растворов приводило к тому, что высота подъема цемента за обсадными трубами не превышала 500—700 м.

Опытно-промышленное испытание асбозуритоцементного раствора было проведено на скв. 11. Объектом цементирования была 219-мм промежуточная колонна, спущенная на глубину 1992 м. Согласно выбранному составу смеси цементосмесительная машина СМН-20 загружалась из расчета: один мешок асбозурита (25 кг) на два мешка цемента. Облегченно-волокнистая смесь затворялась при $B : Ц = 1,08$. Удельный вес асбозуритоцементного раствора в среднем составил $1,46 \text{ Г/см}^3$. На затворение тампонажной смеси четырьмя агрегатами было затрачено 23 мин. Для закрепления нижней части колонны предусматривалось израсходовать 8 т тампонажного цемента для «горячих» скважин. Максимальное давление в конце продавливания составило 75 кг/см^2 , что согласуется с расчетными данными.

В результате термокаротажных работ, проведенных через 13 и 18 ч после окончания заливки, цементное кольцо обнаружено на глубине 760 м от устья скважины.

Для выяснения возможности длительного хранения этой смеси в СМН-20 при влажности асбозурита 25%

Один из смесителей был загружен за 28 ч до начала заливки. При разгрузке этого смесителя отмечалось зависание — сводообразование смеси в бункере СМН-20, что нарушало ритмичную работу агрегатов.

Тампонажные растворы пониженной плотности, содержащие обожженный диатомовый песок, были испытаны при цементировании второй ступени 127-мм эксплуатационной колонны, спущенной в скв. 9 на глубину 2946 м. В связи с тем, что данная скважина рассматривалась как газовая, было принято решение о подъеме цементного раствора до устья. Муфта для двухступенчатого цементирования была установлена на глубине 2494 м от устья скважины. Вторая ступень цементирования была с разрывом во времени 24 ч после первой заливки.

В каждую из двух цементосмесительных машин было загружено по 8 т цемента для «горячих» скважин и 4 т обожженного диатомового песка. На затворение этой смеси было израсходовано 20 м³ воды. Удельный вес раствора в процессе затворения находился в пределах 1,52—1,58 г/см³ и в среднем составил 1,55 г/см³. Третья СМН-20, предназначенная для заливки низа второй ступени колонны в интервале 2100—2494 м, была загружена тампонажным цементом для «горячих» скважин. Затворение облегченного раствора четырьмя цементовочными агрегатами было осуществлено за 35 мин. В процессе продавливания отмечено повышение давления после закачивания 20 м³ продавочной жидкости, что может быть объяснено скоплением на цементовочной муфте крупных частичек диатомового песка. После кратковременного повышения давления оно упало до 50 кг/см², а конечное давление составило 100 кг/см². Цементное кольцо было отбито на глубине 18 м от устья скважины.

Использование обожженного диатомового песка в качестве облегчающей добавки позволило впервые на Октябрьской площади осуществить подъем цементного раствора на высоту более 2500 м.

При цементировании 127-мм эксплуатационной колонны на скв. 32 был использован пуццолановый портландцемент Брянского завода. Колонна длиной 3350 м была зацементирована 20 т пуццоланового цемента. Удельный вес облегченного раствора во время затворения поддерживался в пределах 1,5—1,6 г/см³ и в сред-

нем равнялся $1,55 \text{ Г/см}^3$. Давление в конце продавливания составило 80 кг/см^2 .

Кроме рассмотренных случаев, успешное промышленное испытание тампонажных растворов пониженной плотности осуществлено на разведочных площадях в различных районах Украинской ССР. Эти испытания подтверждают ранее сделанный вывод о целесообразности и большой практической ценности широкого внедрения в практику цементирования глубоких скважин различных видов тампонажных растворов пониженной плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бережной А. И. Промывочные жидкости и цементные растворы в бурении скважин. М., Гостоптехиздат, 1955.
2. Беркович Т. М. и др. Исследование свойств гидросиликатов кальция. Докл. АН СССР, т. 120, № 4, 1958.
3. Бич Х. Дж. Улучшение качества гелцементов с помощью хлористого натрия. Перевод № 7/62Б ИТЭИнефтегаз, М., 1962.
4. Будников П. П., Ключка О. В. К теории твердения известняково-глино-песчаных строительных материалов гидротермальной обработкой. Докл. АН СССР, 1953.
5. Булатов А. И. Цементы для цементирования глубоких скважин. М., Гостоптехиздат, 1962.
6. Булатов А. И. Опыт применения облегченных цементных растворов. НТС «Бурение», № 1, 1963.
7. Булатов А. И. Цементирование глубоких скважин. М., изд-во «Недра», 1964.
8. Булатов А. И., Сидоров Н. А. Осложнения при креплении глубоких скважин. М., изд-во «Недра», 1966.
9. Временная инструкция по облегченным перлитно-глино-цементным растворам для цементирования обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах. Киев, УкрНИИГипронефть, 1963.
10. Временная инструкция по расчету эксплуатационных обсадных колонн нефтяных и газовых скважин. М., ВНИИБТ, 1965.
11. Временные технические правила по применению облегченных цементных растворов при цементировании обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах. Киев, 1965.
12. Гайворонский А. А. Крепление нефтяных и газовых скважин в США. М., Гостоптехиздат, 1962.
13. Гельфман Г. Н. Цементы, применяемые на нефтяных промыслах восточных районов СССР. М., ГОСИНТИ, 1959.
14. Дон Н. С., Титков Н. И. Новые работы в области крепления и цементирования нефтяных и газовых скважин. М., ЦНИИТЭнефтегаз, 1963.
15. Дон Н. С. Новые добавки к цементам для крепления глубоких скважин. М., Гостоптехиздат, 1963.
16. Еременко Т. Е. Крепление нефтяных и газовых скважин. М., изд-во «Недра», 1965.
17. Катенев Е. П. Крепление скважин при высоких температурах и давлениях. М., изд-во «Недра», 1966.

18. Контроль качества цементирования обсадных колонн в скважинах методом акустического каротажа. Перевод. № 264/61Г, ГОСИНТИ, 1961.

19. Ланцевичская С. Л. Вопросы производства тампонажных цементов и технология цементирования нефтяных скважин. М., ГОСИНТИ, 1961.

20. Липовецкий А. Я., Данишевский В. С. Цементные растворы в бурении скважин. Л., Гостоптехиздат, 1963.

21. Луценко И. А., Филигенов И. С., Образцов О. И. Облегченные цементные растворы для бурения нефтяных и газовых скважин. Киев, изд-во «Техника», 1965.

22. Мирзаджаизаде А. Х. и др. Гидравлика глинистых и цементных растворов. М., изд-во «Недра», 1966.

23. Определение качества цементирования скважин с помощью акустического каротажа сцепления и микросейсмометрии. Обзор зарубежной литературы. Сер. «Бурение». М., ЦНИИТЭнефтегаз, 1963.

24. Слегля К. А., Картер Л. Дж. Цементные растворы с добавкой гильсонита. Перевод, № 141/60Б. М., ГОСИНТИ, 1960.

25. Современное состояние заканчивания скважин в США и Канаде. М., ЦНИИТЭнефтегаз, 1965.

26. Стольников В. В., Кинд В. В. Гидротехнический бетон с добавкой топливной золы-уноса. М., Госэнергоиздат, 1963.

27. Стольников В. В., Кинд В. В. Цементы и бетоны с золой-уносом и способы ускорения их твердения. М., Госстройиздат, 1964.

28. Титков Н. И., Дон Н. С. Технология цементирования нефтяных скважин. М., Гостоптехиздат, 1960.

29. Улучшение качества цементирования скважин путем добавления в цементные растворы понизителей водоотдачи и хлористого натрия. М., ЦНИИТЭнефтегаз, 1963.

30. Четвертый международный конгресс по химии цемента. М., Стройиздат, 1964.

31. Шатава В., Шкрдлик Я. Пористый бетон. М., Госстройиздат, 1962.

32. Шадрин Л. Н. Регулирование свойств тампонажных растворов при цементировании скважин. М., изд-во «Недра», 1969.

33. Шацов Н. И. Разобшение пластов в нефтяных и газовых скважинах. М., Гостоптехиздат, 1960.

34. Шацов Н. И., Смирнов А. П. Технология бурения глубоких скважин за рубежом. М., Гостоптехиздат, 1960.

35. Шищенко Р. И. Гидравлика глинистых растворов. Баку, Азнефтеиздат, 1951.

36. Oil well cementing practices in the United States. API, New York, 1959.

37. Powers T. C. Proceedings on the 4-th Intern. Symposium on the Chemistry of Cement. Washington, 1960.

38. Recent Development in the use of Bentonite in Cements. "Drilling and Production Pract.". API, 1953.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	Стр. 3
Краткий обзор исследований тампонажных растворов пониженной плотности	5
Теоретическое и экспериментальное обоснование методов получения тампонажных растворов пониженной плотности	13
Теоретическое обоснование условий получения тампонажных растворов пониженной плотности	13
Исходные материалы	16
Анализ методов подбора оптимального водосодержания тампонажных растворов	22
Влияние перемешивания на некоторые свойства цементных растворов	31
Влияние давления на свойства перлито-цементных растворов	37
Установление оптимальной водопотребности тампонажных материалов	40
Изучение основных свойств тампонажных растворов пониженной плотности	50
Удельный вес	50
Подвижность и загустевание	54
Сроки схватывания	60
Водоотдача	71
Закупоривающая способность	73
Прочность цементного камня	76
Проницаемость цементного камня	103
Коррозионная стойкость	107
Некоторые особенности применения тампонажных растворов пониженной плотности	113
Назначение и область применения	113
Проектирование состава растворов	115
Расчет состава тампонажных растворов пониженного удельного веса	123
Приготовление тампонажных смесей	127
Затворение облегченных тампонажных смесей	128
Оценка качества цементировочных работ	130
Технико-экономическая эффективность применения тампонажных растворов пониженной плотности	134
Промысловые испытания	137
Литература	143

Луценко Николай Александрович,
Образцов Олег Иванович

ТАМПОНАЖНЫЕ РАСТВОРЫ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Редактор издательства Т. А. Ершова, Техн. редактор З. А. Болдырева
Корректор Л. И. Окромгло

Сдано в набор 1/XII 1971 г. Подписано в печать 14/II 1972 г. Т-04203.
Формат 84×108¹/₃₂. Печ. л. 4,5. Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 7,50.
Бумага № 2. Индекс 1-3-1. Заказ № 2140/3673—5. Тираж 2600 экз. Цена 38 коп.

Издательство «Недра», Москва, К-12. Третьяковский проезд, д. 1/19.
Типография № 32 Главполиграфпрома. Москва, Цветной бульвар, 26.

38 коп.

НЕДРА - 1972