

Новые решения в области разработки составов тампонажных смесей для цементирования обсадных колонн при различных температурах

NEW SOLUTIONS IN DEVELOPMENT OF PLUGGING MIXTURES' COMPOSITIONS FOR CEMENTING OF CASSED STRINGS AT VARIOUS TEMPERATURES

I. Beley, «Tyumen'NIIGiprogaz» LLC, N. Shcherbich, «UralNIPIneft» CSC, A. Korostelev, A. Kulyabin, S. Karmatskikh, S. Roder, D. Rechapov, «Tyumen'NIIGiprogaz», Ye. Tsyarkin, L. Volkova, A. Astakhov, Ye. Klochkova, «Granula» CJSC

Приведены результаты исследований новых многокомпонентных тампонажных цементных смесей заводского изготовления для цементирования обсадных колонн в условиях АНПД, АВПД и повышенных температур. Предложенные смеси являются унифицированными материалами, которые не требуют ввода дополнительных компонентов для приготовления тампонажных растворов различной плотности. Произведено тестирование унифицированных цементных смесей на соответствие технологических показателей требованиям основных нормативных документов, даны рекомендации по практическому применению.

There are given survey results of plant-made plugging cement mixtures for cementing of cased strings in conditions of anomalously low and high layer pressures and higher temperatures. Mixtures don't need introduction of additional components to prepare plugging slurries of various density.

Приведены результаты исследований новых многокомпонентных тампонажных цементных смесей заводского изготовления для цементирования обсадных колонн в условиях АНПД, АВПД и повышенных температур. Предложенные смеси являются унифицированными материалами, которые не требуют ввода дополнительных компонентов для приготовления тампонажных растворов различной плотности. Произведено тестирование унифицированных цементных смесей на соответствие технологических показателей требованиям основных нормативных документов, даны рекомендации по практическому применению.

В настоящее время при цементировании обсадных колонн различного назначения в большинстве случаев применяются многокомпонентные тампонажные растворы с различными функциональными технологическими характеристиками, определяемыми назначением растворов и условиями их применения. Как правило, такие тампонажные растворы включают в качестве базового вяжущего материала тампонажные портландцементы типа ПЦТ 1-50, ПЦТ 1-100 или ПЦТ 1-G-CC-1 и различные виды добавок: облегчающие, утяжеляющие, понижающие водоотдачу, повышающие стабильность, обеспечивающие расширение камня в процессе твердения, армирующие тампонажный камень, снижающие его проницаемость и т. д. Основная масса добавок в большинстве случаев предварительно смешивается в сухом виде с тампонажным портландцементом, и затем смесь доставляется к месту проведения работ по цементированию обсадных колонн.

С этой целью зарубежными и российскими сервисными компаниями применяется схема приготовления сухих тампонажных смесей с использованием специальных мобильных цехов, оборудованных, как правило, пневматическими системами подачи и смешивания компонентов с последующей загрузкой готовой смеси в цементовозы. Преимуществом данной схемы является возможность оперативной корректировки соотношения компонентов сухой смеси на стадии приготовления в зависимости от условий цементирования.

Применение таких цехов в специфичных условиях Крайнего Севера бывает зачастую

дорогостоящим и оправдано лишь в случае больших объемов работ. При строительстве небольшого количества скважин на отдаленных месторождениях или поисково-разведочных скважин, при наличии дорожного сообщения только в зимний период, использование таких цехов становится нерентабельным. Практикуемая при этом технология покомпонентного затаривания в бункер цементно-смесительных машин (или буллиты) портландцемента и добавок с последующей 2 – 3-разовой перегрузкой шнеками из бункера в бункер (или передувкой из буллита в буллит) достаточно продолжительна по времени, трудоемка и не обеспечивает требуемой однородности сухих смесей при добавке высокодисперсных материалов и нескольких компонентов в небольших количествах.

В то же время при строительстве большого количества скважин на одном месторождении, где при сопоставимых геолого-технических условиях для цементирования колонн одного диаметра предусматривается применение однотипных тампонажных составов, более рентабельным является централизованное изготовление многокомпонентных сухих смесей в районах с более развитой инфраструктурой и существенно меньшими энергетическими затратами.

В связи с этим в последние годы все большее распространение получает технологическая схема обеспечения многокомпонентными тампонажными смесями, предусматривающая доставку на основные базы хранения, месторождения (или отдельные скважины) приготовленных в заводских условиях смесей с необходимым соотношением всех компонентов для затворения тампонажных растворов заданной плотности и технологических характеристик. Как правило, при такой схеме лишь отдельные быстрорастворимые компоненты (типа ускоряющих или замедляющих добавок) вводятся непосредственно на месторождении в жидкость затворения в соответствии с результатами предварительного лабораторного анализа смеси, что обеспечивает требуемую корректировку основных технологических свойств тампонажного раствора в соответствии с условиями цементирования.

Впервые указанная технологическая схема начала применяться при цементировании газовых и газоконденсатных скважин на месторождениях Западной Сибири с 2005 г., когда ООО «ТюменНИИГипрогаз» совместно с ООО «Гранула» (в настоящее время – ЗАО «Гранула») были разработаны составы и отработана технология приготовления многокомпонентных унифицированных облегченных цементных смесей типа ЦТОС (по ТУ 5734-001-74364232-2006) и ЦТРО (по ТУ 5734-003-74364232-2006). В последующие годы были созданы и внедрены специальные цементные смеси типа ЦТРС-50, ЦТРС-100 (по ТУ 5734-007-74364232-2006) для приготовления тампонажных растворов нормальной плотности применительно к условиям низких, нормальных и умеренных температур, а также высокотемпературная цементная смесь типа ЦТТС (по ТУ 5734-004-74364232-2005) для цементирования обсадных колонн в интервалах повышенных температур. Указанные типы цементных смесей прошли промысловую апробацию, включены в проекты на строительство поисково-разведочных и эксплуатационных скважин и к настоящему времени применялись для цементирования более 2500 обсадных колонн.

Более сложные условия цементирования обсадных колонн при строительстве эксплуатационных скважин с низкими пластовыми давлениями на старых месторождениях, а также при строительстве поисково-разведочных скважин на ачимовские и юрские отложения, в условиях повышенных температур и аномально высоких пластовых давлений, обусловили необходимость целенаправленной разработки новых составов сухих многокомпонентных цементных смесей.

В 2011 г. была создана и апробирована модификация цементной смеси ЦТОС-3-100, которая по принятой классификации относится к легким типам смесей для приготовления тампонажных растворов с плотностью 1300 ± 20 кг/м³. Основным назначением данной смеси является цементирование обсадных колонн в одну ступень, в условиях низких пластовых давлений или высоких рисков возникновения поглощений

при большой протяженности колонн. Оптимальное сочетание в ЦТОС-3-100 тампонажного портландцемента и различных видов активных минеральных добавок позволяет получать тампонажный камень с необходимыми прочностными характеристиками не только в диапазоне умеренных, но и низких положительных температур.

Для легких цементов типа ЦТОС-3-50 (100) (ЦТРОС-3-100 Арм) не установлены требования по ГОСТ-1581-96 [1], так как данный нормативный документ не рассматривает облегченные цементы с плотностью менее $1400 \pm 40 \text{ кг/м}^3$. Поэтому в качестве образца сравнения нами использовались цементы ПЦТ III-Об 4-50 (100), требования к которым установлены ГОСТ-1581-96. Кроме этого, учитывались требования РД 39-00147001-769-2000 [2] к прочным характеристикам облегченного тампонажного камня на момент окончания ОЗЦ. Результаты сравнительного анализа легких цементов типа ЦТОС (ЦТРОС) – 3-50 (100) и облегченных цементов типа ПЦТ III-Об 4-50, предусмотренных ГОСТ 1581-96, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительные данные физико-механических показателей растворов и камня легких цементов ЦТОС -3-50 (100) и облегченных цементов ПЦТ III-об4-50 (100)

| Наименование показателя | Требования по ГОСТ 1581-96 для цемента ПЦТ III-об4 при температурах применения | | Требования по РД 39-00147001-767-2000 | Фактические значения для легких цементов при температурах применения | |
|---|--|-----------|---------------------------------------|--|-----------------------|
| | Низких и нормальных | Умеренных | | Низких и нормальных, ЦТОС-3-50 | Умеренных, ЦТОС-3-100 |
| 1. Прочность при изгибе, МПа, не менее (в возрасте 2 сут.) | 0,7 | 1,0 | 0,5 | 0,8 | 1,95 |
| 2. Водоотделение, мл, не более | 7,5 | 7,5 | 2,5 | 1,0 | 0 |
| 3. Растекаемость цементного теста, мм, не менее | 200 | 200 | 200 | 245 | 210 |
| 4. Время загустевания до консистенции 30 Вс, мин., не менее | 90 | 90 | 90 | 430 | 110 |

Несмотря на более низкую плотность, легкие цементы ЦТОС-3-50 позволяют формировать камень, который по прочностным характеристикам при низких и нормальных температурах соответствует требованиям ГОСТ 1581-96, установленным для цементов типа ПЦТ III-Об 4-50. При умеренной температуре прочностные характеристики цементной смеси ЦТОС-3-100 почти в два раза превышают минимальные требования ГОСТ 1581-96, установленные для цементов типа ПЦТ III-Об 4-100. Кроме того, значения прочности камня ЦТОС-3-50 и ЦТОС-3-100 значительно выше допустимых значений, установленных РД 39-00147001-767-2000.

При этом следует особо отметить, что в диапазоне температур от 60°C до 100°C тампонажный камень с плотностью 1300 кг/м^3 имеет показатели прочности, близкие к показателям прочности камня растворов нормальной плотности $1850 - 1900 \text{ кг/м}^3$ (рис. 1). Учитывая указанные свойства, имеется возможность осуществления цементирования обсадных колонн в одну ступень в условиях АНПД с размещением тампонажного раствора одной плотности по всей длине.

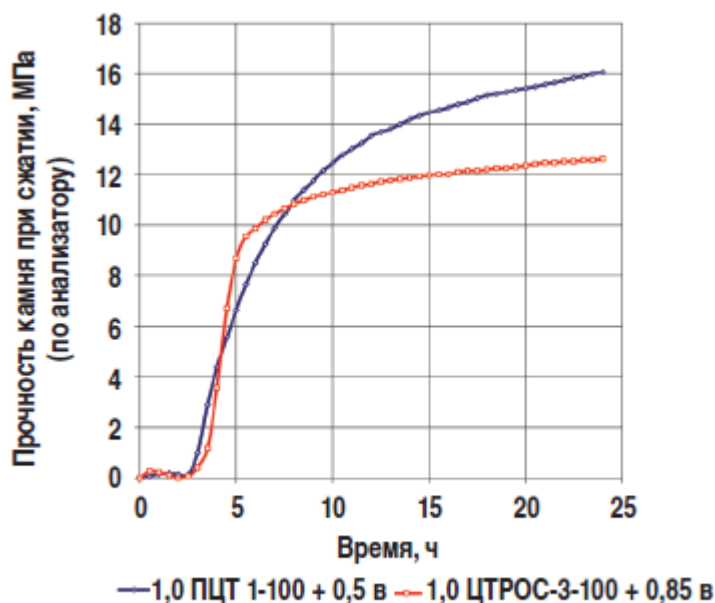


Рис. 1. Изменение прочности камня во времени при твердении тампонажных растворов на основе цемента ПЦТ 1-100 и легкой цементной смеси ЦТРОС-3-100 (температура 75°C, давление 40 МПа)

В настоящее время цементирование большинства обсадных колонн в одну ступень на нефтяных и газовых месторождениях выполняется с использованием двух составов тампонажных растворов: облегченного тампонажного раствора плотностью 1400 – 1500 кг/м³ и тампонажного раствора нормальной плотности – 1850 – 2000 кг/м³.

К основным недостаткам такой технологии цементирования следует отнести: большую дифференциацию физико-механических характеристик камня тампонажных растворов различных составов и, соответственно, различия в степени изоляции по интервалам размещения; вероятность образования больших зон смешивания тампонажных растворов, ввиду достаточно большой разницы плотностей тампонажных растворов. Это обуславливает ухудшение изоляции затрубного пространства в интервале размещения зоны смешивания; недостаточно высокую скорость формирования камня облегченного тампонажного раствора с необходимыми прочностными характеристиками в интервале ММП, что требует устанавливать время ОЗЦ не менее 48 ч.

С целью устранения указанных недостатков и повышения качества крепления обсадных колонн предложено использование другой технологии одноступенчатого цементирования, заключающейся в размещении по всей длине затрубного пространства тампонажного раствора одной промежуточной плотности 1700 кг/м³, и разработан специальный состав цементной смеси [3]. Апробирование на Бованенковском месторождении подтвердило возможность цементирования в одну ступень всех обсадных колонн с применением тампонажных растворов с плотностью 1700 кг/м³, приготовленных на основе одного состава цементной смеси типа ГранЦЕМ-7 (ТУ 5734-003-80338612-2010).

Тампонажный материал ГранЦЕМ-7

Тампонажный материал ГранЦЕМ-7 представляет собой смесь тампонажного портландцемента, комплексной минеральной добавки КМД-О, стабилизирующих компонентов и специальных добавок для регулирования тампонажно-технических свойств – армирующих, кольматирующих, расширяющих, пластификаторов, газоблокаторов и др.

В зависимости от вида специальных добавок (армирующих, кольматирующих, расширяющих) предусмотрен выпуск цементных смесей следующих марок:

ГранЦЕМ-7 – без ввода специальных добавок;

ГранЦЕМ-7-Арм – с армирующими добавками;

ГранЦЕМ-7- К – с кольматирующими добавками;

ГранЦЕМ-7- Р – с расширяющими добавками;

ГранЦЕМ-7 БГ – с газоблокирующими добавками.

Особенностью цементных смесей ГранЦЕМ-7 является возможность ввода в заводских условиях всех компонентов, в том числе и специальных газоблокирующих добавок, с сохранением технологичности смесей при транспортировке, затаривании и затворении. При этом полностью исключается необходимость выполнения дополнительных работ на месторождении или в цехах по смешиванию компонентов.

По прочностным характеристикам состав плотностью 1700 кг/м^3 превышает аналогичные показатели тампонажного раствора нормальной плотности и облегченного тампонажного раствора, что позволяет сократить сроки ОЗЦ до 12 – 24 ч (рис. 2 и 3). Уверенный набор прочности в широком диапазоне температур (от -5 до 400С) позволяет использовать сухую цементную смесь ГранЦЕМ-7 для крепления направлений, кондукторов, промежуточных и эксплуатационных колонн.

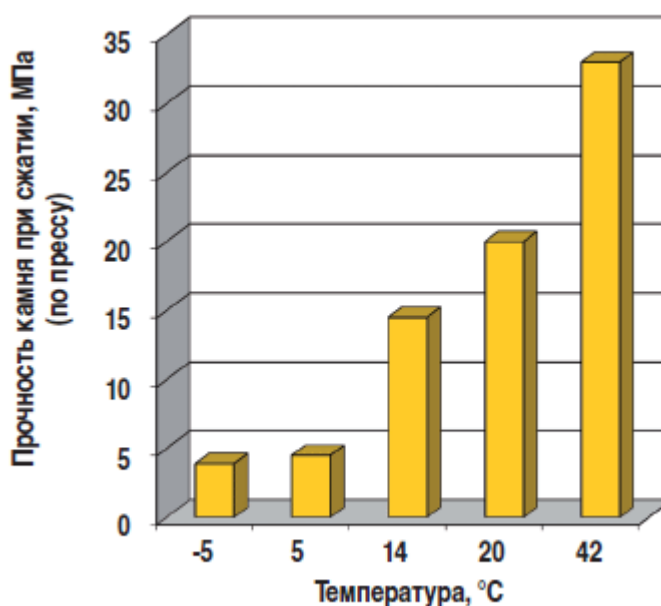


Рис. 2. Прочность камня ГранЦЕМ-7 при различных температурах

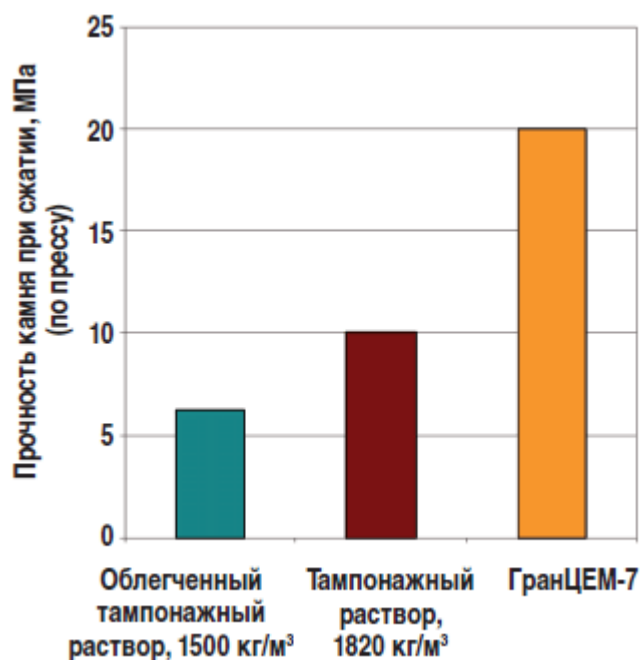


Рис. 3. Сравнение прочности камня облепченного, нормальной плотности и тампоноажного раствора с плотностью 1700 кг/м³ (на основе ГранЦЕМ-7) при температуре 20°C

С целью предотвращения газопроявлений в период ОЗЦ модификация смеси ГранЦЕМ-7 БГ имеет в составе газоблокирующие добавки, которые в сочетании с ускоряющей добавкой обеспечивают быстрый набор структуры геля. Критический период гидратации тампоноажного раствора на основе ГранЦЕМ-7 БГ даже в условиях низких и умеренных температур не превышает 30 мин.

Сухая цементная смесь ГранЦЕМ-7 не содержит в своем составе гигроскопичных компонентов и материалов, чувствительных к резкому перепаду окружающих температур, влажности и реакционно-способных к атмосферному кислороду и окиси углерода, что делает возможным ее продолжительное хранение в неотопляемых складах, контейнерах или под навесом в условиях контакта с открытым воздухом продолжительное время.

Высокотемпературные утяжеленные цементы типа ЦТТС-Ут

Применительно к условиям цементирования обсадных колонн в скважинах, пробуренных на ачимовские и юрские отложения, дополнительно разработаны составы высокотемпературных утяжеленных цементов типа ЦТТС-Ут-0-150, ЦТТС-Ут-1-150, ЦТТС-Ут-2-150 и ЦТТС-Ут-3-150. Данные типы утяжеленных высокотемпературных цементов являются новой модификацией высокотемпературных смесей ЦТТС [4] и помимо вяжущего материала и компонентов для повышения термостойкости содержат утяжеляющие добавки и корректирующие материалы, позволяющие готовить тампоноажные растворы с плотностью от 2000 кг/м³ до 2300 кг/м³ (± 30 кг/м³). Основные физико-механические показатели высокотемпературных утяжеленных цементов ЦТТС-Ут-0-150, ЦТТС-Ут-1-150, ЦТТС-Ут-2-150 и ЦТТС-Ут-3-150 при испытаниях по техническим условиям приведены в табл. 2.

Табл. 2. Сравнительные данные физико-механических показателей растворов и камня термостойких утяжеленных цементов ЦТТС-Ут-0 (1, 2, 3)-150 и цементов ПЦТ III-Ут 0 (1, 2, 3) (температура 120°C, давление 40 МПа)

| Наименование показателя | Требования по ГОСТ 1581-96 для цементов ЦТТ III-Ут 0 (1, 2, 3) при умеренных и повышенных температурах | Требования по РД 39-00147001-767-2000 | Фактические значения для термостойких утяжеленных цементов при повышенных температурах | | | |
|---|--|---------------------------------------|--|---------------|---------------|---------------|
| | | | ЦТТС-Ут-0-150 | ЦТТС-Ут-1-150 | ЦТТС-Ут-2-150 | ЦТТС-Ут-3-150 |
| 1 Прочность при изгибе, МПа, не менее (в возрасте 2 сут.) | 2,0 | 1,5 | 4,3 | 4,3 | 4,1 | 4,7 |
| 2 Водоотделение, мл, не более | 10,0 | 2,5 | 1,2 | 0 | 0,5 | 1,0 |
| 3 Растекаемость цементного теста, мм, не менее | 180 | 180 | 225* | 195* | 190* | 190* |
| 4 Время застывания до консистенции 30 Вс, мин., не менее | 90 | 90 | 150* | 130* | 205* | 220* |

* Растекаемость и время застывания определялись с добавкой 0,03 % НТФ (к массе ЦТТС) и 0,1 % Натросол EXR-250

Помимо испытаний по определению прочности камня высокотемпературных утяжеленных цементов разрушающим методом производилось тестирование этих же составов на ультразвуковом анализаторе 5265 SGSA в течение 120 ч при сопоставимых термобарических условиях. Некоторые результаты дополнительных исследований приведены на рис. 4.

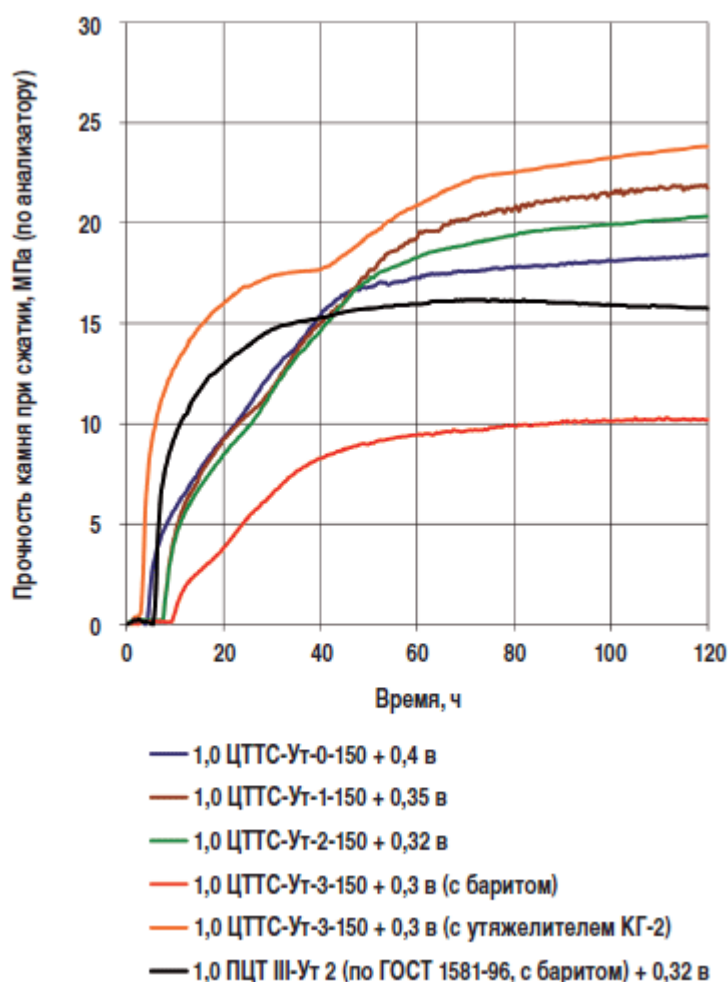


Рис. 4. Изменение во времени прочности камня утяжеленных термостойких цементов ЦТТС-Ут-0 (1, 2, 3)-150 и ПЦТIII-Ут 2 (по ГОСТ 1581-96) (температура 120°C, давление 40 МПа)

Для тампонажных растворов на основе цементов ЦТТС-Ут-0-150, ЦТТС-Ут-1-150 и ЦТТС-Ут-2-150 характер изменения расчетной прочности камня в начальный период твердения (48 ч) идентичен, а величины $R_{СЖ}$ имеют достаточно близкие значения (рис. 4). По истечении 48 ч происходит разветвление графиков $R_{СЖ} = f(t)$ и их выполаживание с сохранением тенденции к дальнейшему росту прочности камня даже после 120 ч твердения. Сравнивая значения прочности камня, полученные по анализатору и по прессу через 48 ч, для всех испытанных составов отмечается

определенное отличие, обусловленное особенностями определения $R_{сж}$ на анализаторе и, очевидно, некоторое несоответствие коэффициентов расчетной формулы, которая не рассчитана на все варианты применяемых на практике утяжеленных систем. Тем не менее несмотря на заниженные значения прочности камня утяжеленных термостойких систем по ультразвуковому анализатору, данный вид испытаний позволяет более корректно оценивать характер изменения прочности камня во времени в непрерывном режиме, в имитируемых скважинных условиях для различных составов и определять наличие или отсутствие термодеструкции камня по перегибу графиков $R_{сж} = f(t)$.

Анализируя приведенные на рис. 4 графики, можно отметить явное отличие как по интенсивности изменения прочности камня в начальный период, так и по конечным значениям $R_{сж}$ составов ЦТТС-Ут-3-150 в зависимости от типа применяемой утяжеляющей добавки. Более низкие значения прочности камня для состава с баритом обусловлены слишком высоким содержанием утяжелителя, необходимым для получения растворов с плотностью 2300 кг/м³. Более высокая плотность утяжелителя КГ-2 позволила оптимизировать соотношение компонентов смеси и обеспечить значительно более высокие прочностные характеристики камня и его термостойкость. Тем не менее, прочность камня термостойкого состава с баритом через 48 ч удовлетворяет требованиям, установленным ГОСТ 1581-96 к цементам типа ПЦТ III-Ут 3 и отраслевыми нормативными документами.

На рис. 4 приведены также результаты сравнительных испытаний стандартного утяжеленного состава с сопоставимой плотностью раствора, представляющего смесь ПЦТ I-G-CC-1 с баритом (типа ПЦТ III-Ут 2 по ГОСТ1581-96).

Как видно (рис. 4), для смесей тампонажного портландцемента и барита после первоначального быстрого набора прочности в течение первых 24 ч твердения в дальнейшем происходят стабилизация и последующее снижение $R_{сж}$. Такой характер изменения прочности свидетельствует о недостаточной термостойкости камня в результате реакций перекристаллизации при воздействии повышенной температуры и давления. Замена половины вяжущего материала на инертную добавку барит в какой-то мере способствует обеспечению лишь начальной термостойкости камня, но не позволяет формировать камень, стойкий к термокоррозии при длительном воздействии повышенной температуры. Для тампонажного раствора на основе ЦТТС-Ут-2-150 характерен менее интенсивный набор прочности камня в начальный период твердения (24 ч), однако по истечении 48 ч его прочность сопоставима с $R_{сж}$ камня на основе смеси портландцемента и барита. Но основным и принципиальным отличием системы ЦТТС-Ут-2-150 являются отсутствие спада прочности камня в течение испытания и сохранение тенденции к дальнейшему росту прочности.

Недостаточная термостойкость камня из смесей портландцемента с баритом проявляется в явной форме при более высоких температурах. Испытаниями на ультразвуковом анализаторе установлено, что уже при 150°C стабильные значения прочности камня цементно-баритовой смеси сохраняются только в течение 42 ч, а затем отмечается более интенсивное (нежели при 120°C) снижение $R_{сж}$ с сохранением тенденции к снижению прочности и в дальнейшем. Это подтверждает предположение о временном характере замедления процессов термодеструкции камня составов с повышенным (до 60 – 70%) содержанием барита, т. к. увеличение температуры до 150°C в данном случае можно рассматривать как увеличение продолжительности испытания при температуре 120°C.

В отличие от цементно-баритовой смеси тампонажный камень ЦТТС-Ут-2 (3)-150 не только сохраняет прочностные свойства при температуре 150°C в течение всего периода испытания, но и сохраняется тенденция к увеличению значений $R_{сж}$ в дальнейшем.

На основании выполненных исследований и промысловых испытаний разработанные многокомпонентные цементные смеси заводского изготовления рекомендованы для цементирования обсадных колонн на месторождениях севера Тюменской области и могут быть использованы в других регионах с сопоставимыми условиями.

Литература

- 1.ГОСТ 1581-96. Портландцементы тампонажные. Технические условия. М.: Минземстрой, ГУП ЦПП, 1998.
- 2.РД 39-00147001-767-2000. Инструкция по креплению нефтяных и газовых скважин. Москва–Краснодар: ООО «Просвещение Юг», 2000. 277 с.
- 3.Коростелев А.С., Белей И.И. Новые тампонажные растворы для цементирования кондукторов и направлений в интервалах многолетнемерзлых пород // Газовая промышленность. 2011. № 5. С. 35 – 38.
- 4.Белей И. И., Щербич Н. Е., Цыпкин Е. Б., Вялов В. В. Специальные тампонажные материалы для цементирования обсадных колонн в скважинах с различными термобарическими условиями // [Бурение и нефть. 2007. № 6.](#)