



УДК 622.245.422

СПОСОБЫ КОМПЕНСАЦИИ КОНТРАКЦИИ ПРИ ТВЕРДЕНИИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ

METHODS OF CONTRACTION COMPENSATION WHILE PORTLAND CEMENT HARDENING

Белей Иван Ильич

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник отдела крепления скважин,
ООО «ТюменНИИгипрогаз»
Beley@tngg.ru

Beley Ivan Iliich

Senior Researcher,
Candidate of Science in Engineering,
LLC TyumenNIIgiprogaz
Beley@tngg.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований контракции в сопоставлении с изменением прочности камня при твердении портландцементных растворов. Рассмотрены способы компенсации контракции и развития вакуума путем использования минеральной или газогенерирующей добавок. Установлена возможность получения систем с низкой контракцией за счет повышения порового давления в растворе/камне газогенерирующей добавкой.

Annotation. Survey results of contraction compared to cement strength while hardening of Portland cement slurries. Methods of contraction compensation and vacuum development with use of mineral or gas generating agents are considered. Possibility of receiving low contraction systems by increase of pore pressure with the gas generating agent in the slurry/rock is determined. Their potential for casing cementing is shown.

Ключевые слова: контракция; снижение давления; твердение; портландцементный раствор; газогенерирующая добавка.

Keywords: contraction; pressure decline; hardening; Portland cement slurry; gas generating agent.

Характерным для процессов гидратации портландцементов является наличие контрактных явлений, влияние которых на качество разобщения пластов может быть существенным. Контракция вызывает уменьшение внешнего объема изолированной пробы цементной суспензии лишь в начальный период твердения. После образования структуры, контракция приводит к увеличению пористости и развитию вакуума в цементном камне, а процесс твердения системы «цемент-вода» происходит уже без изменения размеров образца цементного камня [1, 2].

Развитие вакуума обуславливает обезвоживание фильтрационной корки бурового раствора, ее усадку, растрескивание и образование флюидопроводящих каналов. В результате снижения давления в затрубном пространстве возникает опасность «подтягивания» пластового флюида в скважину и его фильтрации по образовавшимся каналам в вышележащие пласты или даже до устья скважины.

В случае цементирования в интервале межколонного пространства (отсутствия связи камня с водонасыщенными породами) эффект контракции может быть причиной снижения напряженности контакта камня с обсадными трубами.

Исследования контракции тампонажных растворов применительно к условиям твердения в скважине наиболее полно были выполнены во ВНИИКРнефти под руководством Булатова А.И. [3]. Количество поглощаемой твердеющим цементным раствором воды определялось косвенно, по снижению давления в автоклаве. Поэтому перед опытами производилась калибровка манометра автоклава с целью установления количества удаляемой через вентиль воды при снижении давления от 40 до 0 МПа, при температурах от комнатной до 90 °С. В результате были получены зависимости количества поглощенной воды цементными растворами от времени при различных температурах.

Известно, что величина контракции зависит от степени гидратации цемента («чем больше воды связывается при гидратации, тем больше контракция», а «кинетика контракции соответствует кинетике гидратации» [4]), состава образующихся продуктов и их физического состояния. Косвенно об этом можно судить по сопоставлению характера временных изменений контракции и прочности камня, которая является одним из основных показателей степени гидратации портландцемента. Такие данные ранее не публиковались, но представляют интерес для понимания контрактных явлений.

Связь величины и кинетики контракции с процессом формирования камня (т.е. степенью гидратации вяжущего), при твердении в условиях атмосферного и избыточного давления, исследовалась нами путем параллельных испытаний тампонажного раствора одного состава на приборе расширения/усадки типа 4268 ES и ультразвуковом анализаторе прочности камня (УЗА) модель 5265 SGSA. В опытах использовался раствор на основе тампонажного портландцемента ПЦТ I-50 (производства ОАО «Сухоложскцемент»), приготовленный по ГОСТ 26798.1-96 с в/ц = 0,5.

Прибор 4268 ES (рис. 1) позволяет в автоматическом режиме, при заданных термобарических условиях, изучать изменения во времени объема тампонажного раствора/камня при наличии изоли-



рующей резиновой диафрагмы или объема раствор/камень при твердении с возможностью подпитки водой. В нашем случае контракция определялась в условиях твердения раствора с доступом воды, для чего вместо резиновой диафрагмы устанавливалась фильтровальная бумага. Объем тампонажного раствора составлял 200 см^3 , а объем контактируемой воды – 52 см^3 .

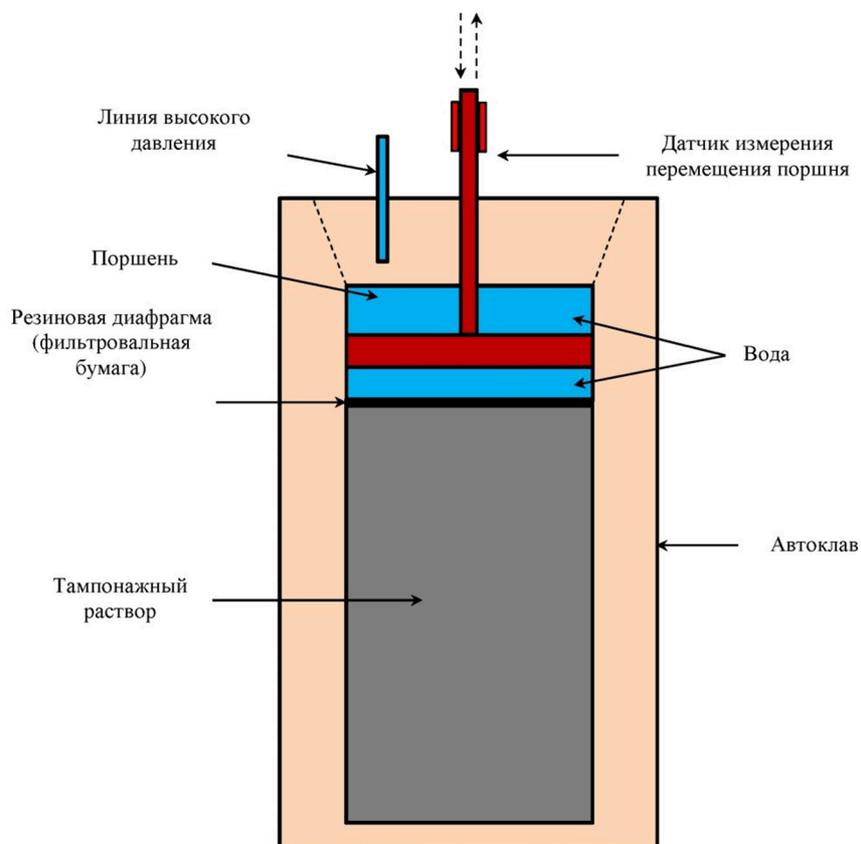


Рисунок 1 – Принципиальная схема прибора 4268 ES

Твердение тампонажного раствора происходило в одном случае при постоянном избыточном давлении $20 \pm 0,1 \text{ МПа}$, а во втором – после создания в автоклаве начального избыточного давления $20\text{--}21 \text{ МПа}$, автоклав прибора отключался от источника давления и фиксировались значения контракции и изменения давления в процессе твердения раствора в замкнутом объеме. Поскольку электронным манометром прибора регистрируются величины давления выше атмосферного, то значения разрежения при контракции не были определены.

Кроме того, аналогичные опыты по определению контракции были выполнены при твердении раствора в условиях атмосферного давления.

Преимуществом ультразвукового анализатора является возможность определять время начала формирования камня и развитие прочности камня во времени в непрерывном режиме с заданной дискретностью в задаваемых термобарических условиях. Несмотря на косвенность метода ультразвукового тестирования (расчет прочности камня по скорости прохождения ультразвукового сигнала), получаемые данные (в т.ч. время начала и окончания схватывания раствора, как время достижения системой определенной прочности при сжатии) характеризуют действительное состояние раствора (каменя) и соответствуют показателям сроков схватывания, определяемых на приборе Вика.

Как показали наши исследования, окончанию схватывания тампонажного раствора по прибору Вика соответствует момент достижения прочности камня при сжатии по ультразвуковому анализатору, равной $0,1\text{--}0,14 \text{ МПа}$.

На рисунке 2 приведены сравнительные графики изменения во времени объема тампонажного раствора/камня (по прибору 4268ES) и прочности камня при сжатии (по прибору 5265 SGSA), в случае твердения в контакте с водой тампонажного раствора при нормальной температуре, в условиях атмосферного и избыточного давлений.

Можно видеть, что к моменту окончания схватывания стандартного раствора «ПЦТ 1-50 + 0,5 в», величины контракции образцов при различных давлениях имеют близкие значения ($0,47 \%$ и $0,42 \%$), но начало формирования камня в случае избыточного давления происходит в более ранние сроки. После этого процесс контракции интенсифицируется и соответствует характеру набора прочности, определяе-



тому степень гидратации вяжущего материала. Вполне закономерным является превышение временных значений контракции и прочности камня образца, формируемого при избыточном давлении, по отношению к образцу, твердевшему при атмосферном давлении.

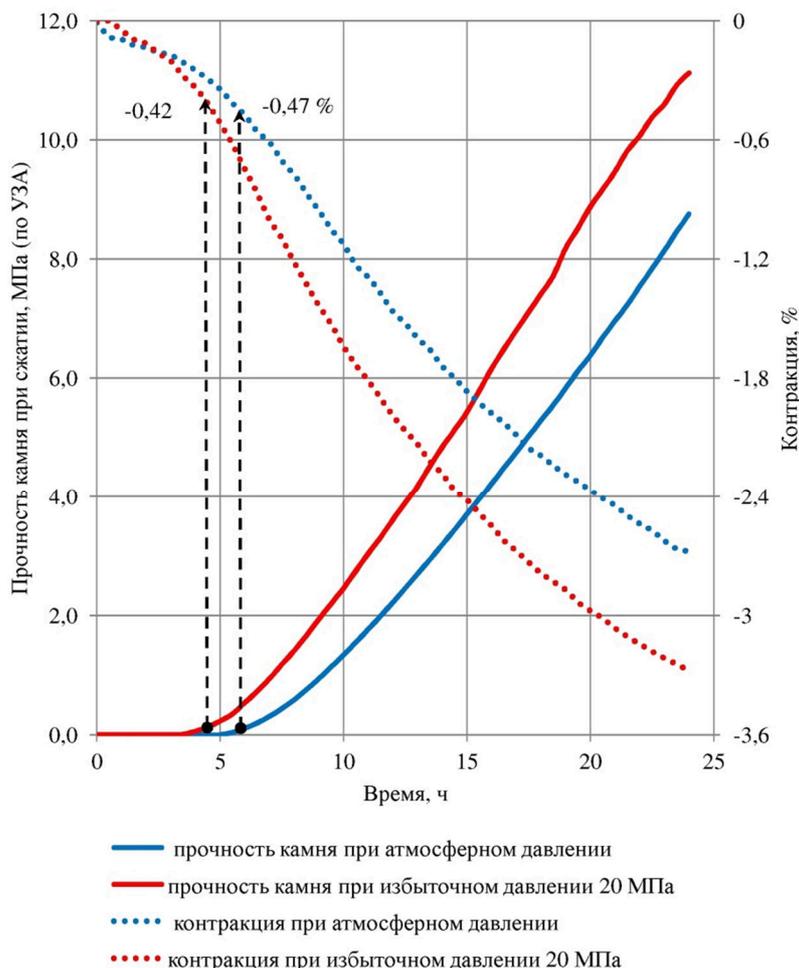


Рисунок 2 – Изменение во времени прочности камня и контракции при твердении тампонажного раствора состава «1,0 ПЦТ 1-50 + 0,5 в» в условиях атмосферного и избыточного давления 20 МПа

Таким образом, основной процесс контракции при твердении стандартного раствора «ПЦТ 1-50 + 0,5 в» происходит после завершения начального этапа формирования кристаллизационной структуры и обусловлен поглощением воды в результате возникновения дополнительного разрежения при гидратации и интенсивном формировании структуры новообразованиями, объем которых меньше объемов исходных материалов. В целом указанные результаты соответствуют данным, приведенным работе [3], но нами были получены более высокие значения контракции, что обусловлено, очевидно, различием методик определения объемных изменений, типов и активности применяемых портландцементов.

Поскольку для портландцемента с аналогичным минералогическим составом степень гидратации даже через 48 ч твердения при 20 °С составляет 0,56 [4], следует ожидать дальнейшего увеличение значений контракции по мере продолжения гидратации вяжущего материала.

Установлено, что в случае герметизированного образца значения контракции через 24 ч твердения являются наименьшими (рис. 3). Данный факт объясняется снижением общего давления в системе «тампонажный раствор/камень + вода», в результате возникающего вакуума, и отсутствием возможности компенсационной подпитки камня водой.

В то же время при постоянном избыточном давлении происходит компенсация возникающего контракционного разрежения и, благодаря процессу выравнивания внешнего и порового давлений, обеспечивается дополнительное (как-бы принудительное) поступление воды в образец камня.

В случае испытания при атмосферном давлении на тампонажный раствор также действует перепад давления и происходит компенсирующее вакуум поглощение воды в большем объеме, нежели для полностью изолированного образца.

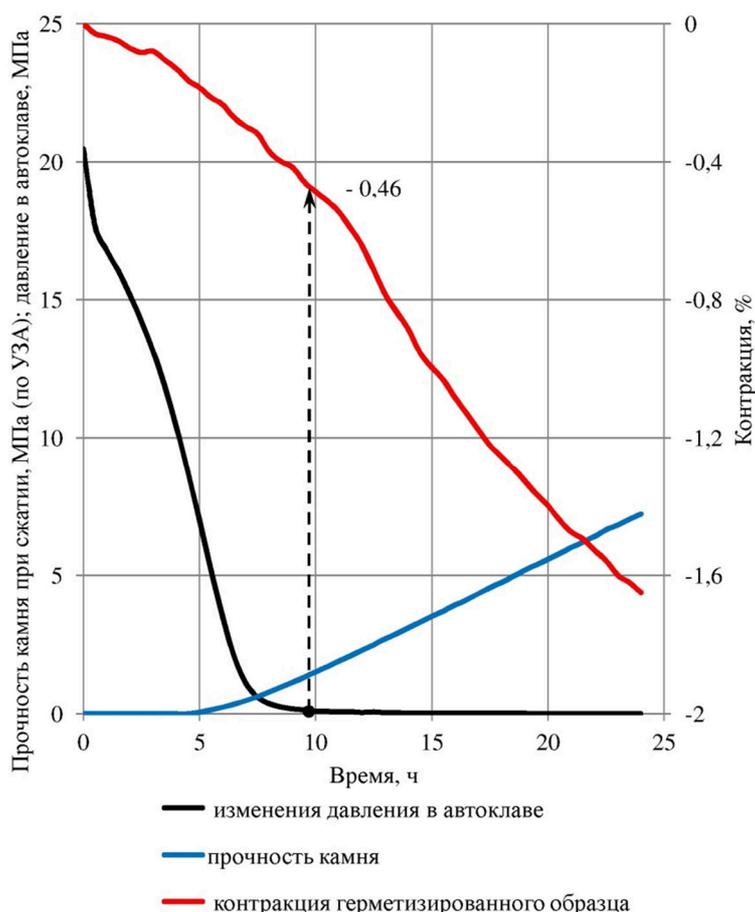


Рисунок 3 – Изменение во времени давления в автоклаве, прочности камня и контракции при твердении изолированного образца тампонажного раствора состава «1,0 ПЦТ 1-50 + 0,5 в»

На рисунке 3 также приведены результаты тестирования на УЗА изолированного образца раствора, когда создавалось лишь начальное избыточное давление 20–21 МПа, которое в последующем не поддерживалось. Можно видеть, что при значении контракции 0,46 % давление в автоклаве анализатора снижается практически до нулевых значений и с этого момента, очевидно, и происходит разрезание.

Сравнивая данные на рисунках 2 и 3, следует отметить более позднее окончания схватывания для изолированного образца раствора и более низкие расчетные значения прочности камня через 24 ч твердения. Последнее свидетельствует о формировании в условиях возникающего разрежения менее плотной и выкристаллизованной структуры из-за невозможности стяжения объема для компенсации вакуума.

Очевидно, что задача снижения контрактационного разрежения сводится как к снижению доли вяжущего в составе раствора, как основной причины контракции, так и к применению способов компенсации снижения давления, в частности за счет реакций газообразования и создания дополнительного порового давления.

В качестве газогенерирующих добавок могут использоваться различные материалы, которые при реакции со щелочной средой тампонажного раствора или взаимодействии с другими добавками выделяют газообразные продукты [5, 6, 7]. В практике цементирования скважин наиболее часто в качестве химического газообразователя в цементных растворах применяют высокодисперсный металлический алюминий (т.н. алюминиевая «пудра» АП), который взаимодействует с гидроксидом кальция с выделением водорода.

Основным назначением таких систем является получение аэрированных облегченных тампонажных растворов для цементирования обсадных колонн в условиях аномально низких пластовых давлений, выполнение изоляционных работ по ликвидации поглощений в процессе бурения скважин, создание напряженного контакта с ограничивающими поверхностями.

Компанией «Halliburton» для повышения степени изоляции затрубного пространства в интервалах продуктивных пластов разработаны и используются тампонажные системы с добавкой Super CBL, которая в одних случаях позиционируется как добавка для предотвращения миграции газа, а в других – указывается как расширяющаяся добавка. Согласно представляемым данным, благодаря реакции газообразования,



которая может регулироваться во времени за счет состава Super CBL, обеспечивается поддержание порового давления в тампонажном растворе/камне в период ОЗЦ и предотвращается поступление пластового флюида в скважину. Однако при этом указывается, что это необходимо лишь для компенсации снижения гидростатического давления в затрубном пространстве, обусловленного «зависанием» тампонажного раствора, а не для компенсации контракционного разрежения.

В связи с этим нами были проведены исследования по оценке возможности использования аналогичных систем для снижения контракционного эффекта путем компенсации снижения давления и развития вакуума при твердении стандартного тампонажного раствора на основе портландцемента ПЦТ I-50 (ОАО «Сухоложскцемент»). В качестве газообразователя применялась алюминиевая пудра типа ПАП-2 (по ГОСТ 5494-71). С целью улучшения смачивания, получения однородной, стабильной газонасыщенной системы алюминиевая пудра вводилась в жидкость затворения, содержащую неионогенное ПАВ и гидроксипропилцеллюлозу (ГЭЦ) (рис. 4).

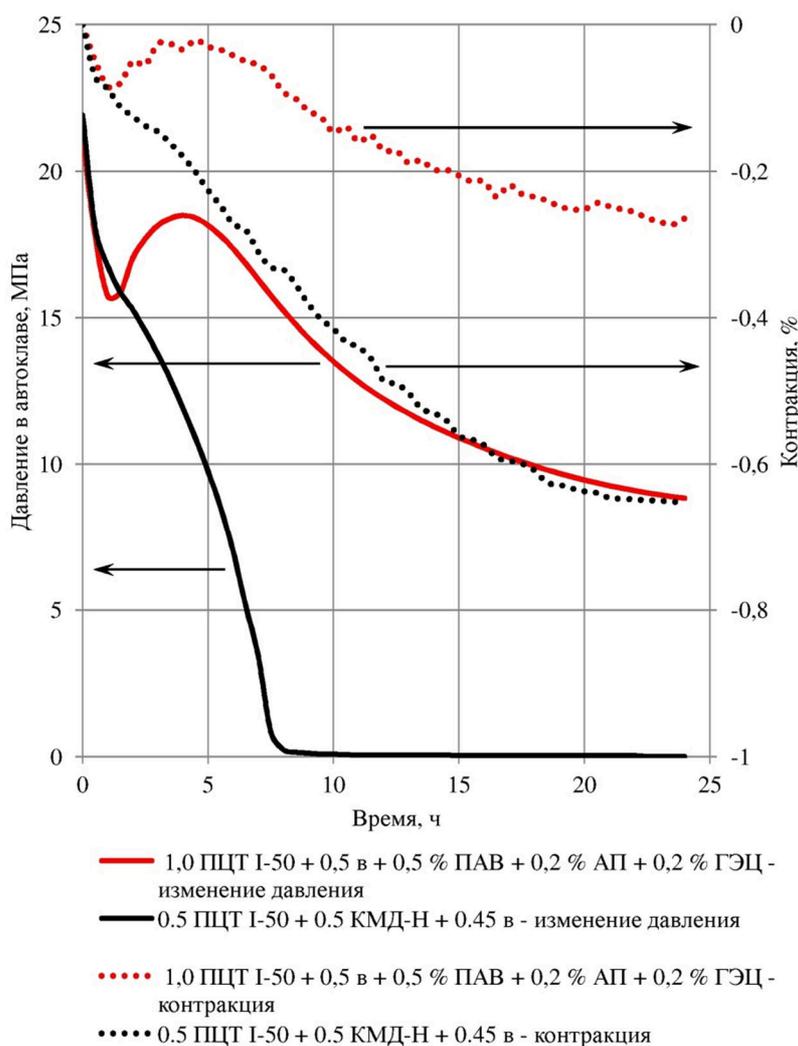


Рисунок 4 – Изменения давления в автоклаве и контракции при твердении тампонажных растворов на основе смеси ПЦТ I-50 и газогенерирующей добавки, а также смеси ПЦТ I-50 и минеральной добавки

Для оценки эффективности способа снижения контракции и контракционного разрежения путем замены части вяжущего материала активной минеральной добавкой КМД-Н испытывался также состав с соотношением «цемент : добавка» = 1 : 1.

Можно видеть, что замена 50 % тампонажного портландцемента на активную минеральную добавку приводит к существенному снижению контракции, по сравнению со стандартным раствором при твердении в замкнутом объеме (0,64 % и 1,65 %), однако даже при таких низких значениях контракции происходит разрежение, и давление все равно снижается ниже атмосферного. Отличием характера изменения давления состава с добавкой КМД-Н является лишь более медленное его снижение в период до начала формирования камня, но время достижения минимальных (фиксируемых прибором) значений давления в автоклаве прибора совпадает со временем для стандартного раствора. Это



объясняется тем, что независимо от типа тампонажного раствора уменьшение объема системы «тампонажный раствор + вода» в результате контракции на 0,4 % и более приводит к снижению давления в автоклаве до нулевых значений.

Если судить по характеру изменения контракции во времени состава с минеральной добавкой, то можно предположить возможность возникновения меньшего разрежения по сравнению с тампонажным раствором, содержащим только портландцемент.

Для тампонажного раствора с газогенерирующей добавкой отмечается иной характер изменения давления и контракции, поскольку в начальный период одновременно происходят два процесса: контракционное уменьшение объема и, соответствующее ему, снижение давления в автоклаве; реакция газообразования, обуславливающая повышение давления в автоклаве и увеличение объема тампонажного раствора. Очевидно, что в течение первых 60 мин твердения процесс начальной контракции превалирует, а объема продуктов газообразования и создаваемого давления недостаточно, для компенсации контракционного снижения давления.

По истечении указанного периода интенсифицируется процесс выделения водорода, что обеспечивает повышение давления в автоклаве от 15,8 МПа до 18,5 МПа и некоторое увеличение объема системы «тампонажный раствор + вода», фиксируемое как уменьшение контракции. Реакция газовыделения завершается спустя 3 ч, что видно по прекращению увеличения и последующей стабилизации давления в автоклаве. Результатом дальнейшей гидратации цемента и соответствующей ей контракции, является снижение давления, которое к моменту окончания опыта составляет 8,8 МПа при величине контракции всего лишь 0,26 %.

Учитывая тот факт, что в данном составе содержание тампонажного портландцемента сопоставимо с содержанием его в стандартном растворе без АП, то конечные значения контракции должны быть также сопоставимы, поскольку влияние ПАВ и гидроксиэтилцеллюлозы сводится лишь к некоторому замедлению начала интенсивной гидратации цемента, но не к снижению степени гидратации. Однако, несмотря на гидратацию цемента и наличие процесса контракции, дополнительное поглощение водной фазы твердеющим раствором происходит в существенно меньшем объеме, что связано с компенсацией возникающего контракционного разрежения избыточным поровым давлением.

Поскольку степень гидратации цемента определяет величину контракции и объем поглощаемой воды, то факт уменьшения поглощения воды должен свидетельствовать об уменьшении степени гидратации цемента, поскольку в системе создается повышенное поровое давление и отсутствует перепад давления для проникновения воды к поверхности зерен цемента для продолжения процесса гидратации.

На самом деле это не так, поскольку той воды, которая была введена при затворении стандартного раствора, вполне достаточно для полной гидратации цемента, а поглощаемая впоследствии вода, в результате контракции, является избыточной, обусловленной возникновением вакуума. Как отмечается в работе [8], «согласно данным Пауэрса, водоцементное отношение 0,227 для портландцементов характеризует максимальное количество воды, которое может быть химически связано цементом при полной гидратации». Поэтому в случае системы с газогенерирующей добавкой низкие значения объема поглощаемой воды не сказываются существенно на прочностных характеристиках камня.

Следует иметь в виду, что формирование камня происходит в условиях избыточного давления, создаваемого за счет реакции газообразования и насыщения раствора/камня водородом. Соответственно, к моменту окончания опыта камень характеризуется повышенным поровым давлением, которое никак не сказывается на его состоянии (прочности) в условиях замкнутого объема и избыточного давления.

Однако если происходит снижение избыточного давления в автоклаве, то проявляется отрицательное действие порового давления, заключающееся в интенсивном выделении водорода («пузырение» на поверхности образца) и возможном разрушении камня, если его прочность меньше порового давления. В большей степени это отмечалось при создании больших поровых давлений и непродолжительном твердении раствора до снижения давления в автоклаве. Для состава, указанного на рисунке 4, после окончания опыта через 24 ч, снижения давления в автоклаве до атмосферного и извлечения образца, произошло его разрушение в горизонтальной плоскости на несколько частей.

При более продолжительном твердении и формировании камня большей прочности, с замкнутой структурой пор, указанные эффекты проявляется в меньшей степени.

Очевидно, что в условиях скважины не будет происходить такого чрезмерного снижения давления и вероятность саморазрушения камня, за счет действия высокого порового давления, практически исключена. Более того, положительным свойством газогенерирующих тампонажных систем является возможность получения напряженного контакта за счет уплотняющего действия камня в отношении удаленной фильтрационной корки бурового раствора, которая не будет подвержена усадке и разрушению ввиду минимального контракционного обезвоживания при твердении раствора в камень.

Тем не менее, требуется обоснованный подход к выбору дозировки газогенерирующей добавки с учетом необходимости создания порового давления в растворе, достаточного лишь для компенсации контракционного снижения давления или незначительного его превышения. Кроме того, реакция газовыделения должна происходить в период до формирования жесткой структуры камня, а свойства



тампонажного раствора должны обеспечивать равномерное распределение по объему выделяющегося водорода и исключать его миграцию.

Учитывая особые свойства водорода, целесообразно рассмотреть другие типы добавок, генерирующие менее опасные газообразные продукты и обеспечивающие создание достаточного избыточного давления.

Таким образом, выполненные исследования подтвердили возможность предотвращения контракционного снижения давления и исключения развития вакуума при твердении портландцементного раствора за счет создания дополнительного порового давления газогенерирующей добавкой.

Литература:

1. Булатов А.И., Данюшевский В.С. Тампонажные материалы : Учебн. пособие для вузов. – М. : Недра, 1987. – 280 с.
2. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов. – М. : Недра, 1978. – 287 с.
3. Булатов А.И. Формирование и работа цементного камня в скважине. – М. : Недра, 1990. – 409 с.
4. Данюшевский В.С., Алиев Р.М., Толстых И.Ф. Справочное руководство по тампонажным материалам. – М. : Недра, 1987. – 373 с.
5. Ахрименко В.Е., Дьяченко П.А. Химические газообразователи для получения легких цементных растворов // НТЖ Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М. : ОАО «ВНИИОЭНГ», 2007. – № 12. – С. 39–42.
6. Тагиров К.М., Перейма А.А. Газоцементный состав для укрепления рыхлых пород призабойной зоны пласта // Геология, бурение и разработка газовых и газоконденсатных месторождений и ПХГ: Сб. науч. трудов СевКавНИПИгаз. – Ставрополь. – Вып. 37. – 400 с.
7. Пат. № 2082872 Российская Федерация, E21B33/138. Тампонажный раствор / Борцов В.П., Балуев А.А., Бастриков С.Н. № 94007861/03; заявл. 05.03.1994; опубл. 27.06.1997, Бюл. №10.
8. Булатов А.И. Тампонажные материалы и технология цементирования скважин. – М. : Недра, 1977. – 325 с.

References:

1. Bulatov A.I., Danyushevsky V.S. Grouting materials : education institutions. – M. : Nedra, 1987. – 280 p.
2. Danyushevsky V.S. Design of optimum compositions of grouting cements. – M. : Nedra, 1978. – 287 p.
3. Bulatov A.I. Formation and work of a cement stone in the well. – M. : Subsoil, 1990. – 409 p.
4. Danyushevsky V.S., Aliyev R.M., Tolstykh I.F. The reference guide on grouting materials. – M. : Nedra, 1987. – 373 p.
5. Akhrimenko V.E., Dyachenko P.A. Chemical gazoobrazovatel for receiving light cement solutions // NTZh Construction of oil and gas wells by land and by sea. – M. : JSC VNIIOENG, 2007. – № 12. – P. 39–42.
6. Tagirov K.M., Pereyma A.A. Gas-cement structure for strengthening of friable breeds of a bottomhole zone of layer // Geology, drilling and development of gas and gas-condensate fields and UGS: collection of scientific works of SevKavNIPGaz. – Stavropol. – Is. 37. – 400 p.
7. Patent № 2082872 Russian Federation, E21B33/138. Grouting solution / Bortciv V.P., Baluyev A.A., Batrikov S.N. № 94007861/03; declared 3/5/1994; publ. 27.06.1997, Bulletin № 10.
8. Bulatov A.I. Grouting materials and technology of cementation of wells. – M. : Nedra, 1977. – 325 p.