



УДК 622.245

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТОВ

ABOUT SOME FEATURES OF RECEIVING AND APPLICATION THE EXTENDING CEMENTS

Агзамов Фарит Акрамович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин»,
Уфимский государственный нефтяной технический
университет
faritag@yandex.ru

Agzamov Farit Akramovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of «Drilling oil and gas wells»
department,
Ufa State Petroleum Technological University
faritag@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается применение расширяющихся тампонажных цементов для повышения качества крепления скважин. Показаны принципы получения расширяющихся цементов и факторы, влияющие на эффективность их применения. Обосновываются требования к кинетике расширения цемента и рациональная величина расширения.

Annotation. Use of the extending grouting cements for upgrading of fastening of wells is considered. The principles of receiving the extending cements and the factors affecting effectiveness of their application are shown. Requirements to a kinetics of expansion of cement and the rational size of expansion are proved.

Ключевые слова: цементирование скважин, качество крепления, цементы, контракция, расширение.

Keywords: cementation of wells, quality of fastening, cements, a contraction, expansion.

Основной целью цементирования обсадных колонн при строительстве нефтяных и газовых скважин является получение качественной и долговечной изоляции между породой, цементным камнем и колонной [1]. Естественно, что вопросы повышения качества крепления скважин и разобщения пластов всегда зависят от применяемой технологии цементирования и качества применяемых тампонажных материалов. При ухудшении качества крепи или возникновения ее негерметичности большинство экспертов всегда делают упор на тампонажные материалы. К сожалению, в этом есть определенная справедливость, поскольку применяемые в настоящее время тампонажные цементы не могут обеспечить надежной герметизации затрубного пространства за обсадными колоннами из-за присущих им недостатков.

Одним из перспективных направлений повышения герметичности крепи скважин явилось применение расширяющихся тампонажных цементов, и нефтяные компании стали широко практиковать использование данных материалов [2–7]. Данная идея не нова, и она начала активно разрабатываться и пропагандироваться с 70-х годов прошлого века [5, 6].

Пионерами в широком применении расширяющихся цементов на производстве были строители, которые на двадцать лет раньше нефтяников разработали много рецептур расширяющихся и напрягающихся цементов [8–11].

Однако в указанные выше годы расширяющиеся тампонажные материалы не получили широкого распространения, главным образом, из-за того, что ввод расширяющих добавок необходимо было проводить в условиях буровой, или, в лучшем случае, на базе бурового предприятия.

Заводское приготовление расширяющихся тампонажных цементов началось в нынешнем столетии с появлением небольших независимых производителей специальных цементов, имеющих гибкие технологические линии с необходимыми дозаторами и узлами смешения готовой продукции.

В то же время, известно критическое отношение А.И. Булатова к данному виду тампонажных материалов, высказанное им в одной из последних своих публикаций [12]. Частично принимая замечания Анатолия Ивановича, мы полагаем, что при использовании расширяющихся цементов есть несомненная польза, но при этом очень важно их правильное применение.

Если посмотреть причины, от которых зависит качество крепления скважин, то опытные специалисты легко могут назвать 10–15 факторов, причем невыполнение какого-то одного из них может негативно сказаться на качестве цементирования обсадной колонны в целом.

Многофакторность процесса крепления предполагает, что каждый из многих влияющих факторов будет учтен, как в процессе операции цементирования, так и на этапе подготовки скважины к спуску обсадной колонны, а также в период ОЦЗ. К сожалению, многие отечественные буровые компании в погоне за скоростями бурения, часто игнорируют даже стандартные правила. Можно отметить оставление толстых фильтрационных корок на стенках скважины, игнорирование проработки и шаблонировки скважины перед спуском колонн, отсутствие нижней разделительной пробки, не выдерживание требуемого времени ОЗЦ и др.



Во многом, из-за подобных «мелких» нарушений страдает качество крепления и создается негативное мнение относительно применяемых тампонажных материалов, и в том числе, расширяющихся цементов.

В общем случае, принцип получения любого расширяющегося цемента достаточно прост и основан на вводе в цемент добавок, образующих при взаимодействии с водой или продуктами гидратации базового вяжущего новые вещества, объем которых больше объема веществ, вступивших в реакцию гидратации [8, 9, 13]. В результате увеличения объема расширяющей добавки происходит раздвижка кристаллов твердеющего цементного раствора (камня), выражающаяся в увеличении его внешнего объема.

При получении расширения цементов широко используется кристаллизационное давление гидросульфата алюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (трехсульфатная форма) или $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (моносulfатная форма). Для кристаллизации этих соединений необходимо присутствие ионов Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} в водном растворе при достаточно pH среды. В качестве расширяющих добавок могут использоваться гипс и гипсосодержащие вещества, смесь гипса с высокоглиноземистым вяжущим, высокоглиноземистые шлаки, безводный сульфат алюмината кальция, глиноземистый и гипсоглиноземистый цементы, алунит и др. Цементы такого типа являются быстро твердеющими, имеют позднее расширение, эффективны при температурах 20–80 °С и нашли применение в строительной индустрии [2, 8, 11].

Хорошую перспективу при изготовлении расширяющихся цементов могут иметь хромат-алюминатные добавки, расширение которых обеспечивается высокохроматной формой гидроалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCrO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), образование которого сопровождается большим увеличением объема твердой фазы по сравнению с C_3AH_6 [5].

Другим способом получения расширяющихся цементов, наиболее часто применяемым при креплении скважин, является использование добавок, имеющих оксидное расширение. Оно обеспечивается малорастворимым гидроксидом кальция, образующимся при гидратации пережженной извести. Также в качестве расширяющей добавки может использоваться оксид магния. Расширяющиеся цементы на оксидной основе получают смешением портландцемента с добавками оксидов кальция или магния, предварительно обожженных при необходимой температуре [2, 4, 14]. Скорость гидратации указанных оксидов может регулироваться температурой обжига и дисперсностью добавок.

Получение расширения за счет применения газовыделяющих добавок в практике строительства скважин не приемлемо, поскольку при высоких давлениях образующийся газ сжимается и может растворяться в поровой жидкости цементного камня [14].

Расширение в процессе твердения можно получить и у традиционных портландцементов при затворении их растворами с небольшими концентрациями некоторых солей, например, хлорида натрия (1–3 %). Причиной расширения является отрицательная контракция, сопровождающаяся выпадением в осадок кристаллических солей из жидкости затворения в процессе твердения цемента [14].

Обобщая составы большинства расширяющихся тампонажных материалов, можно отметить, что природа расширения всех типов цементов состоит в кристаллизационном давлении новой твердой фазы, образующейся после гидратации базового вяжущего, и не способной при этом разместиться в поровом пространстве твердеющей системы.

В то же время, расчеты показывают имеющееся несоответствие, состоящее в том, что объем продуктов, обеспечивающих расширение, существенно меньше, чем объем пор, имеющихся в цементном камне даже при полной гидратации цемента.

Противоречие исключается, если принять, что изменение объема твердеющего цементного раствора, а в дальнейшем, и камня, будет определяться как перераспределением объемов твердой фазы, жидкости затворения и порового пространства, так и расположением в поровом пространстве расширяющих компонентов.

Возможность прорастания кристаллов в порах определяется величиной пересыщения жидкой фазы и соотношением размера кристаллов пор. Условие роста кристаллов выражается уравнением

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{2\sigma_{1,2} \cdot V_m}{RT \cdot r}, \quad (1)$$

где $\sigma_{1,2}$ – поверхностное натяжение, V_m – молярный объем, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, r – радиус пор.

Из уравнения следует, что кристаллогидраты расширяющей добавки будут прорастать в порах размером

$$r > \frac{2\sigma_{1,2} \cdot V_m}{RT \cdot \ln(C/C_0)}. \quad (2)$$

При постоянном пересыщении C/C_0 , чем меньше V_m , тем больше вероятность прорастания пор новыми кристаллогидратами. Кроме того, до гидратации расширяющей добавки необходимо



формирование пространственного каркаса твердеющего цемента. Если образовавшийся каркас будет состоять из пор, радиус которых удовлетворяет уравнению (2), основная часть энергии расширяющихся кристаллогидратов будет затрачена на заполнение порового пространства, т.е. не будет достигнуто желаемое расширение.

Анализ уравнений показывает, что при получении расширяющихся цементов молярному объему каждого типа расширяющей добавки должен соответствовать определенный размер пор твердеющего цементного раствора и до начала кристаллизации расширяющей фазы в камне должны сформироваться поры соответствующего размера.

Размер пор можно регулировать изменением водоцементного отношения, скоростью твердения цемента, вводом добавок, заполняющих поровое пространство. Именно из-за увеличения водоцементного отношения и роста размера пор в цементном камне получение расширяющихся облегченных цементов представляет серьезную проблему.

Перспективным может быть применение комбинированных добавок, образующих кристаллогидраты с различным молярным объемом. Такого же эффекта можно достичь затворением расширяющихся цементов на растворах солей, кристаллизующихся в порах раньше, чем расширяющие добавки, и уменьшающих их размер.

Применение дисперсного армирования (добавления в цемент фибры) также будет повышать эффект расширения за счет передачи кристаллизационного давления к цементной матрице через каркас, образованный фиброй [15].

Реагенты, замедляющие гидратацию расширяющей добавки, так же как и малоактивные добавки – расширители, могут быть эффективны при разработке рецептур расширяющихся композиций. Однако при применении последних возникает проблема их своевременной активации, поскольку некоторые из них (например, высоко обожженные CaO и MgO) начинают гидратировать уже после затвердевания цемента и могут привести к разрушению камня за счет внутренних напряжений. В этом смысле процесс аналогичен процессам, происходящим при твердении цементов, содержащих в своем составе свободные окислы CaO и MgO [2].

Таким образом, для получения расширяющихся цементов с заданной величиной расширения, обеспечивающего давление на ограничивающие поверхности, необходимо регулировать геометрию пор вяжущих систем в начальный период структурообразования, скорость и количество образовавшихся кристаллогидратов.

Важным условием эффективного применения расширяющихся цементов является согласование кинетики гидратации базового цемента и кинетики гидратации (увеличения объема) расширяющей добавки. Необходимо, чтобы основная часть расширения происходила после доставки тампонажного раствора в заколонное пространство, после того, как в растворе (суспензии) начнется формирование структуры цементного камня. Если гидратация расширяющей добавки будет происходить в процессе цементирования (во время закачки цемента и его продавки), когда раствор (суспензия) находится в жидком состоянии, то вполне очевидно, что расширение не окажет положительного влияния на качество разобщения пластов. С другой стороны, поздняя гидратация расширяющей добавки может привести к разрушению цементного камня, поскольку в цементном камне возникает прочная кристаллизационная структура, которая может не выдержать внутренних напряжений при увеличении объема расширяющего компонента.

Поскольку при креплении скважин процесс приготовления, закачки и продавки тампонажного раствора составляет несколько часов, то при определении расширения цементного камня, необходимо моделировать вышеуказанные процессы, проводя измерения расширения только через несколько часов перемешивания тампонажного раствора.

Поэтому для тампонажных цементов считается оптимальным получать расширение в период 1–3 суток, когда структура базового вяжущего еще мало прочная [16].

Несколько слов об одном заблуждении относительно кинетики расширения цементов. В литературе часто встречается мнение о том, что расширение цементного камня должно происходить в ранние сроки твердения, обосновывая это «эластичностью» структуры камня. Вообще, это выражение надо признать некорректным, поскольку структура твердеющего камня образуется при срастании кристаллогидратов (продуктов твердения), т.е. происходит образование жестких химических связей. При этом в результате расклинивающего давления расширяющей добавки в цементном камне неизбежно возникают микротрещины, пример которых приведен на рисунке 1. Внешне они могут быть не видны, но при увеличении их можно обнаружить.

В ранние сроки твердения, когда процессы гидратации протекают наиболее активно, образующиеся микротрещины «залечиваются» новыми продуктами гидратации, т.е. корректней говорить о расширении цементов не в период «эластичности структуры», а в период, когда их структура способна к максимальному «самозаживлению».

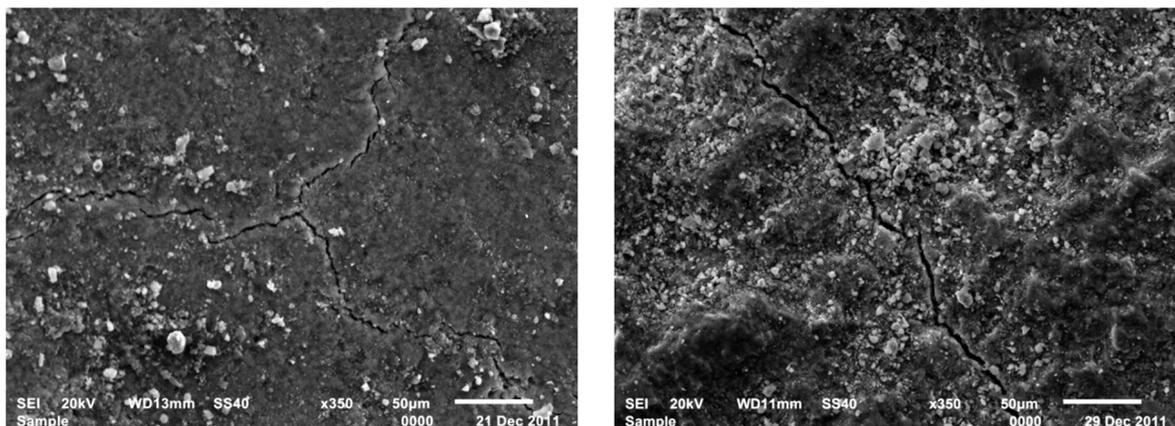


Рисунок 1 – Образование микротрещин при твердении расширяющихся цемента

К сожалению, значительная часть расширяющих добавок гидратирует в процессе закачки цементного раствора в скважину, и эффект от их использования практически нулевой. На рисунке 2 показана кинетика расширения цементного раствора (камня), содержащего различные расширяющие добавки при нормальной температуре. Из рисунка видно, что практически половина исследуемых добавок прогидратировала в течение 1,0–2,0 часов, и дальнейшего расширения цемента уже не происходит.

Естественно, что при повышении температуры и ускорении твердения цемента, скорость гидратации добавок будет возрастать, и активный период расширения должен сокращаться.

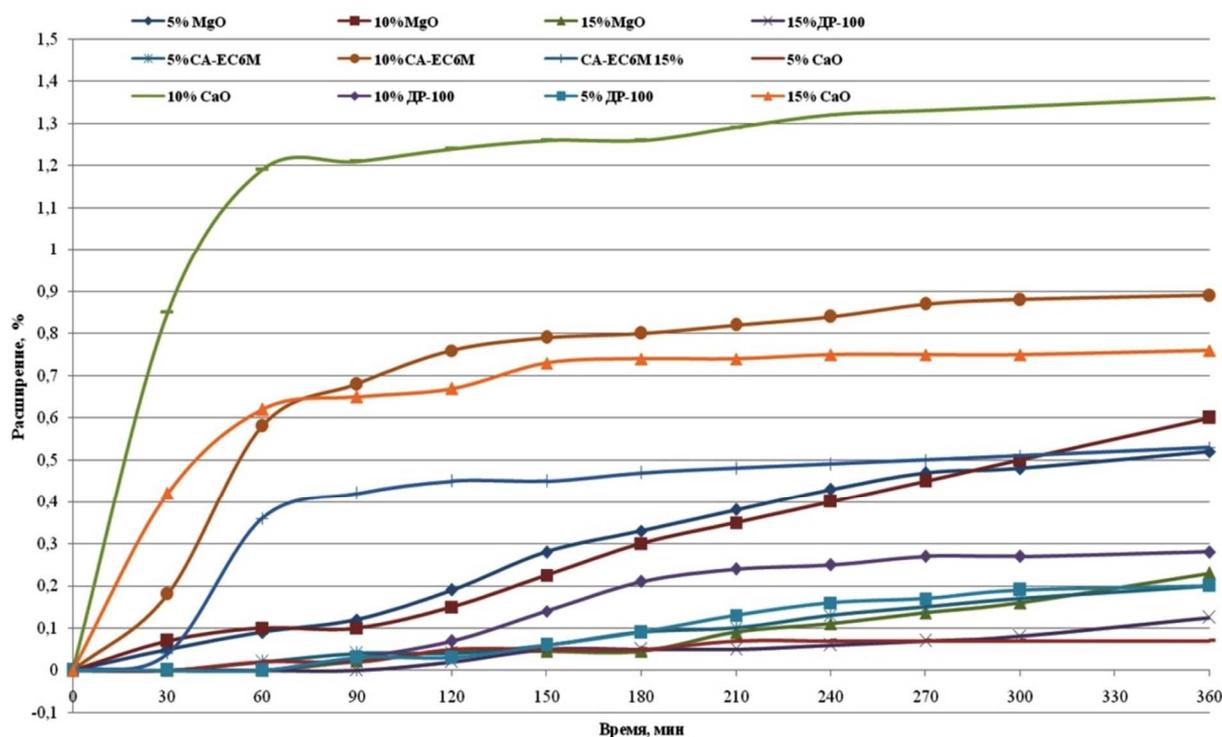


Рисунок 2 – Влияние расширяющих добавок на кинетику расширения цементного камня при твердении

Необходимо учитывать, что расширяющиеся цементы это особый вид вяжущих материалов, которые изначально не укладываются в требования ГОСТ. Например, ни один хороший расширяющийся цемент не должен выдерживать контроля на равномерность изменения объема, определяемый кипячением образцов – лепешек.

В литературе имеются сведения о получении тампонажных материалов с самыми различными величинами расширения. Например, Данюшевский В.С. приводит пример цемента с расширением более 15 % [17]. Немало публикаций с описанием цемента, имеющих расширение 7–8 % [2, 4, 18]. Однако в этих публикациях отсутствуют данные о кинетике расширения и методике проведения исследований. Есть основания предполагать, что расширение происходило в первые часы после затворения цемента, а измерения проводились без предварительного кондиционирования цементных растворов.



Применительно к креплению скважин, применение расширяющихся цементов рассматривается как способ повышения качества крепи за счет лучшей герметизации контактных зон цементного камня (обсадная колонна и стенка скважины). При этом очевидно, что их применение не даст положительных результатов в интервалах с толстой глинистой коркой или интервалах каверн, т.е. там, где пространство для расширения больше чем величина самого расширения.

В межколонном пространстве или в интервалах плотных пород расширяющиеся цементы, несомненно, повысят напряженность контакта с сопредельными поверхностями, поскольку свободно пространства для расширения не будет.

В этом случае внутри цементного камня будут возникать дополнительные внутренние напряжения, которые не смогут релаксироваться, залечиваться дополнительно гидратирующим цементом, и эти напряжения будут сохраняться внутри камня, повышая его хрупкость. Причем, чем выше величины расширения, тем больших значений достигают опасные внутренние напряжения.

Поэтому в скважинах, зацементированных цементами с большой величиной расширения, через некоторое время (несколько месяцев) или после проведения работ внутри обсадной колонны возможно ухудшение герметичности крепи по сравнению со скважинами, зацементированными нерасширяющимися цементами.

В этой связи следует более осмотрительно подходить к величине расширения цементного камня. Необходимо, чтобы расширение, обеспечивая герметичный контакт, создавало небольшие внутренние напряжения, а образовавшиеся микротрещины могли быть залечены при продолжающейся гидратации цемента.

В этой связи полагаем, что расширение 1,5–2,5 % должно быть достаточным для расширяющихся тампонажных цементов. Для высокотемпературных скважин, в которых образуется более прочный цементный камень, расширение не должно превышать 1,0–1,5 % [16].

Исследования, проведенные нами на специально разработанной установке [19], показали, что давление расширения составляло 2,5–4,0 МПа.

Помимо свойств расширяющей добавки, на величину и кинетику расширения цементного камня существенно влияние оказывают и другие факторы.

По данным Каримова Н.Х [4], для цементов с добавкой СаО увеличение внешнего давления до 50 МПа уменьшило величину расширения на 30 %, а повышение давления до 100 МПа уменьшило расширение уже на 70 %. Для цементов хромат-алюминатного расширения при росте давления с 10 до 100 МПа расширение снизилось на 30 %, а при затворении этого цемента раствором NaCl – на 25 %.

По мнению [20, 21] это связано с тем, что при ограничении расширения цементного камня кристаллизационное давление совершает работу, расходуемую на необратимое изменение положения отдельных структурных элементов камня и на упругую деформацию скелета, создающую внутреннее напряжение, выражающееся в давлении расширения. Причем напряжение, развиваемое расширяющимся цементом, прямо пропорционально величине его относительного расширения и коэффициенту упругости крепи. При снятии ограничения расширения эти напряжения должны привести к упругой внешней деформации скелета, имеющей важное практическое значение для компенсации деформации обсадной колонны при снижении в ней внутреннего давления, поскольку при использовании обычных цементов подобная операция приводит к образованию зазора [21].

Выше отмечалось, что из-за контракционных эффектов, вероятность образования усадочных (контракционных) пор существенно возрастает при твердении цементного камня в межколонном пространстве. Однако в ряде публикаций указывалось, что применение расширяющихся цементов уменьшит контракцию цементного камня при твердении [22].

Следует отметить, что это абсолютно неверно, поскольку контракция это уменьшение суммарного объема продуктов твердения (цемент + вода), а расширяющие добавки раздвигают структурный каркас (продукты твердения цемента). Проведенные нами исследования показали, что расширяющиеся цементы обладают такой же, а иногда, и большей контракцией по сравнению с бездобавочными цементами.

Применительно к процессам гидратации портландцемента контракция означает то, что объем продуктов гидратации меньше суммы объемов продуктов, вступивших в химическую реакцию (цемент и вода) [13, 14]. Это связано с двумя причинами. Первое – вода, вступая в реакцию с клинкерными минералами, переходит в связанное состояние в образовавшихся кристаллогидратах (продуктах твердения) и уменьшает свой объем. Второе – образовавшийся при гидратации минералов цементный гель содержит около 30 % пор размером менее 10^{-7} см, называемых гелевыми, всегда заполненными водой, плотность которой может достигать до 1200 кг/м^3 , и естественно, эта вода имеет меньший объем [23]. При гидратации расширяющей добавки происходит увеличение объема твердой фазы, и именно это обеспечивает расширение цемента. Однако контракция при этом не уменьшается, поскольку, говоря о гидратации расширяющихся цементов, часто забывают о втором компоненте химической реакции – воде, объем которой уменьшается вследствие указанных выше процессов.

Доказательством сказанного могут служить результаты определения контракции при твердении различных цементных растворов, проведенные на приборе «Контрактометр ВМ-7.7» (табл. 1). Испытания проводились с использованием портландцемента ПЦТ-1-50 с В/Ц = 0,5.

**Таблица 1** – Влияние различных добавок на контракцию при твердении цементных растворов

Исследуемые составы	Контракция, % во времени, ч						
	1	4	8	12	16	20	24
ПЦТ	0,28	0,61	1,07	1,61	2,36	2,87	3,15
ПЦТ + 0,03 % НТФ	0,09	0,28	0,45	0,94	1,77	2,31	2,53
ПЦТ + 7 % РД	0,31	0,54	0,94	1,56	2,41	2,84	3,05
ПЦТ + 2,5 % NaCl	0,31	0,63	0,96	1,64	2,34	2,57	2,73

Примечание: РД – расширяющая добавка на основе СаО.

Из таблицы видно, что при гидратации бездобавочного цемента и цемента с расширяющей добавкой контракция практически одинакова. Добавка НТФ является замедлителем твердения, поэтому на один и тот же момент времени степень гидратации этого цемента меньше чем бездобавочного, и в результате этого, ниже и контракция при его твердении.

Следствием контракции может явиться усадка цементного камня и трещинообразование. Вполне возможно, что и усадка цементного камня способствовало образованию трещин, показанных на рисунке 1. Во время проведения исследований нам не удалось выделить роль каждого из этих факторов.

При этом может сложиться парадоксальная ситуация, заключающаяся в том, что цементный камень будет иметь плотный контакт с ограничивающими поверхностями, но его пористость при этом будет увеличиваться. Причем, по данным [23], размер усадочных (контракционных) пор будет близок к размерам капиллярных пор, способных пропускать через себя газ и жидкости.

Эти процессы могут проходить в межколлонном пространстве, или против плотных непроницаемых пород, поскольку на гидратацию цемента и расширяющей добавки будет расходоваться вода, использованная для затворения цементного раствора. При твердении цементного раствора против водоносных горизонтов вакуум, образующийся при гидратации вяжущего и расширяющей добавки, будет компенсироваться пластовой жидкостью.

Однако если против твердеющего цементного раствора будут находиться пласты, содержащие агрессивные пластовые флюиды, например, сероводород, то последний будет попадать внутрь твердеющей системы на самых ранних стадиях, когда камень наиболее уязвим к действию коррозионно-активной среды [24].

Рассмотренные выше аспекты проектирования и применения расширяющихся цементов указывают на целесообразность их применения, важность правильного проектирования состава цемента и подбора рецептуры тампонажного материала с тем, чтобы получить наилучшее качество крепления скважин.

Литература:

1. Nelson Erick B., Guillot Dominique. Well cementing. Second Edition. Schlumberger, 2006. – 799 p.
2. Данюшевский В.С., Алиев Р.М., Толстых И.Ф. Справочное руководство по тампонажным материалам. – 2-е изд. – М.: Недра, 1987.
3. Ghofrani Reza and HeikoPlack. CaO- and/or MgO-Swelling Cements: A Key for Providing a Better Annular Sealing? – SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 1993.
4. Каримов Н.Х., Данюшевский В.С., Рахимбаев Ш.М. Разработка рецептур и применение расширяющихся тампонажных цементов: Обзорная информация. – М.: ВНИИОЭНГ, 1980. – 50 с.
5. Опыт цементирования скважин расширяющимися тампонажными смесями с добавкой хроматного шлама // Бурение. – 1977. – № 7. – С. 36–41. : Т.К. Рахматуллин [и др.]. – 1963. – № 16.
6. Паркер П.Н., Уол В.В. Применение расширяющихся цементов для цементирования скважин // Экспресс информация нефтегазодобывающей промышленности. – 1966. – № 34. – С. 8–12.
7. Кривошей А.В. Разработка расширяющихся тампонажных смесей для низких и умеренных температур // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 4. – С. 36–37.
8. Химия и технология специальных цементов / Т.В. Кузнецова [и др.]. – М.: Стройиздат, 1979. – 207 с.
9. Кузнецова Т.В. Напрягающие цементы // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – М., 1982. – XXVII. – № 5. – С. 500–503.
10. Кравченко И.В. Расширяющиеся цементы. – М.: Госстройиздат, 1962.
11. Кузнецова Т.В., Кривобородов Ю.Р. Состав и применение специальных цементов // Технологии бетонов. – 2014. – № 2. – С. 8–11.
12. Булатов А.И. Миф о «расширяющихся цементах» // Бурение и нефть. – 2016. – № 2.
13. Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Токунова Э.Ф. Химия тампонажных и буровых растворов. – С-Пб.: Недра, 2011. – 268 с.
14. Ахмадеев Р.Г., Данюшевский В.С. Химия промывочных и тампонажных жидкостей. – М.: Недра, 1981. – 152 с.



15. Бекбаев А.А., Агзамов Ф.А., Лягов А.В. Исследование армированных облегченных тампонажных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 131–148. – DOI: dx.doi.org/10.15828/20758545-2017-9-4-131-148.
16. Агзамов Ф.А., Бабков В.В., Каримов И.Н. О необходимой величине расширении тампонажных материалов // Территория Нефтегаз. – 2011. – № 8. – С. 14–15.
17. Данюшевский В.С., Бакшутлов В.С., Чжао-Пинь-Хуан. Тампонажный цемент с большой величиной расширения на основе оксида кальция // Цемент. – 1972. – № 1. – С. 14–16.
18. Данюшевский В.С. Пути получения расширяющихся тампонажных цементов // Газовая промышленность. – 1973. – № 11. – С. 13–15.
19. Агзамов Ф.А., Бекбаев А.А., Нурғалиев М.Ф. и др. Установка для определения давления расширения тампонажных материалов. Патент РФ на полезную модель № 165375. Оpubл. 20.10.2016, бюлл. 29.
20. Каримов Н.Х., Данюшевский В.С., Хахаев Б.Н. Вяжущие материалы, изготавливаемые из промышленных отходов и их применение при креплении скважин // Бурение: Обзор. информ. / ВНИИОЭНГ. – 1982. – Вып. 7 (25). – 72 с.
21. Каримов Н.Х., Бакиров Н.К. Условия повышения контактных напряжений в заколонном пространстве скважин // Технология бурения нефтяных и газовых скважин : Межвуз. научно-тематич. сб. – УНИ, 1990. – С. 258.
22. Чернышов С.Е., Куницких А.А., Вотинов М.В. Исследование динамики гидратации и разработка составов расширяющих добавок к тампонажным растворам // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 42–44.
23. Neville А.М. Свойства бетона: Пер. с англ. – М.: Изд-во лит-ры по стр-ву, 1972. – 344 с.
24. Крепление высокотемпературных скважин в коррозионно-активных средах / В.М. Кравцов [и др.]. – М.: Недра, 1987. – 190 с.

References:

1. Nelson Erick B., Guillot Dominique. Well cementing. Second Edition. Schlumberger, 2006. – 799 p.
2. Danyushevskiy V.S., Aliev R.M., Tolstoykh I.F. Reference guide on plugging materials. – 2nd edition. – М.: Недра, 1987.
3. Ghofrani Reza and Heiko Plack. CaO- and/or MgO-Swelling Cements: A Key for Providing a Better Annular Sealing? – SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 1993.
4. Karimov N.H., Danyushevskiy V.S., Rakhimbayev S.M. Formulation development and application of expanding plugging cements: Overview information. – М.: ВНИОЭНГ, 1980. – 50 p.
5. Experience of well cementing with expanding cement slurry mixtures with chrome slurry addition // Drilling. – 1977. – № 7. – P. 36–41. : T.K. Rakhmatullin [et al.]. – 1963. – № 16.
6. Parker P.N., Wal V.V. Application of the expanding cements for the well cementing // Express information of the oil and gas industry. – 1966. – № 34. – P. 8–12.
7. Krivoshey A.V. Development of the expanding plugging mixtures for low and moderate temperatures // Oil industry. – 2005. – № 4. – P. 36–37.
8. Chemistry and technology of the special cements / T.V. Kuznetsova [et al.]. – М.: Stroyizdat, 1979. – 207 p.
9. Kuznetsova T.V. Tensioning cements // Journal of the Mendeleev All-Union Chemical Society. – М., 1982. – XXVII. – № 5. – P. 500–503.
10. Kravchenko I.V. Expanding Cements. – М.: Gosstroyizdat, 1962.
11. Kuznetsova T.V., Krivoborodov Yu.R. Composition and application of the special cements // Concrete technologies. – 2014. – № 2. – P. 8–11.
12. Bulatov A.I. Myth about «expanding cements» // Drilling and oil. – 2016. – № 2.
13. Agzamov F.A., Izmukhambetov B.S., Tokunova E.F. Chemistry of plugging and drilling fluids. – St-Pb.: Nedra, 2011. – 268 p.
14. Akhmadeev R.G., Danyushevskiy V.S. Chemistry of the flushing and plugging liquids. – М.: Nedra, 1981. – 152 p.
15. Bekbaev A.A., Agzamov F.A., Lyagov A.V. Research of the reinforced lightweight plugging materials // Nanotechnologies in construction. – 2017. – V. 9. – № 4. – P. 131–148. – DOI: dx.doi.org/10.15828/20758545-2017-9-4-131-148.
16. Agzamov F.A., Babkov V.V., Karimov I.N. About the necessary expansion of plugging materials // Territory of Neftgaz. – 2011. – № 8. – P. 14–15.
17. Danyushevskiy V.S., Bakshutov V.S., Zhao-Pin-Huang. Tamponazhny cement with a large expansion value on the basis of calcium oxide // Cement. – 1972. – № 1. – P. 14–16.
18. Danyushevskiy V.S. Ways of obtaining the expanding plugging cements // Gas industry. – 1973. – № 11. – P. 13–15.
19. Agzamov F.A., Bekbaev A.A., Nurgaliev M.F., etc. Installation for determining the expansion pressure of plugging materials. Russian Federation patent for useful model № 165375. Table 20.10.2016, Bulletin. 29.
20. Karimov N.Kh., Danyushevskiy V.S., Khaev B.N. Binders made of the industrial wastes and their application at well fastening // Drilling: Overview. // ВНИОЭНГ. – 1982. – Issue 7 (25). – 72 p.
21. Karimov N.Kh., Bakirov N.K. Conditions of contact stress increase in the borehole's under-bore space // Oil and gas well drilling technology: Interuniversity scientific and thematic collection. – УНИ, 1990. – P. 258.
22. Chernyshov S.E., Kunitskikh A.A., Votinov M.V. Investigation of the hydration dynamics and development of the compositions of the expanding additives to the plugging solutions // Oil industry. – 2015. – № 8. – P. 42–44.
23. Neville A.M. Concrete Properties: Per, from English. – М.: construction publishing, 1972. – 344 p.
24. Fastening of the high-temperature wells in the corrosive-active media / V.M. Kravtsov [et al.]. – М.: Nedra, 1987. – 190 p.