

УДК 622.245

DOI. 10.37878.2708–0080/2020.004

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КРЕПЛЕНИЯ СКВАЖИН



Б.С. ИЗМУХАМБЕТОВ,
доктор технических наук,
академик Национальной инженерной академии,
депутат Мажилиса Парламента РК

Дом Мажилиса Парламента,
Республика Казахстан, 010000, г. Нур-Султан, ул. Мәңгілік Ел, 2

Рассматривается применение расширяющихся тампонажных цементов для повышения качества крепления скважин. Показаны особенности расширяющихся цементов, пути управления их свойствами и факторы, влияющие на эффективность их применения. Обоснованы требования к величине расширения и скорости изменения объемных деформаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: крепление скважин, качество цементирования, расширяющиеся цементы, добавки, механизм и кинетика расширения.

ҰҢҒЫМАЛАРДЫ БЕКІТУДІҢ САПАСЫН АРТТЫРУҒА АРНАЛҒАН ҰЛҒАЙТҚЫШ ЦЕМЕТТІҢ ҚОЛДАНЫСЫ

Б.С. ИЗМУХАМБЕТОВ, ғылымдардың докторы, ҚР Ұлттық инженерлік академиясының академигі, Қазақстан Республикасы Парламент Мәжілісінің депутаты

Парламент Мәжілісінің үйі,
Қазақстан Республикасы, 010000, Нұр-Сұлтан қ., Мәңгілік Ел к., 2

*Автор для переписки. E-mail: mukhanov@parlam.kz

Ұңғымаларды бекітудің сапасын арттыру үшін ұлғайтқыш тампонажды цемент қолданысы қарастырылып жатыр. Ұлғайғыш цементтің ерекшеліктері, олардың қолданыстағы тиімділігіне әсер ететін, қасиеттері мен факторларын басқару жолдары көрсетілген. Ұлғайтудың көлеміне қатысты талаптар мен ауқымды деформациялардың өзгеру жылдамдығы негізделді.

НЕГІЗГЕ СӨЗДЕР: ұңғымаларды бекіту, цементтеу сапасы, ұлғайғыш цемент, қоспалар, ұлғаю механизмі және кинетикасы.

APPLICATION OF EXPANDING CEMENTS TO INCREASE THE QUALITY OF WELL CASING

B.S. IZMUKHAMBETOV, Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan, Deputy of Mazhilis of Parliament of the Republic of Kazakhstan

House of the Parliament,
Republic of Kazakhstan, 010000, Nur-Sultan, Mangilik El, 2

The application of expanding grouting cements to improve the quality of well casing. The features of expanding cements, ways to control their properties and factors affecting the effectiveness of their application are shown in the paper. The requirements for the magnitude of expansion and the rate of change of volumetric deformations are explained.

KEY WORDS: well casing, cementing quality, expanding cements, additives, expansion mechanism and kinetics.

Крепление скважин традиционно считается одним из наиболее серьезных этапов строительства скважин, а качество крепления всегда было болевой точкой этого процесса. Утверждения относительно важности качества крепления нужно признать вполне справедливыми, поскольку от его результативности часто зависит судьба скважины. В свою очередь результаты цементирования обсадных колонн зависят от множества различных факторов, причем несоблюдение одного какого-либо сложно исправить даже при блестящем исполнении оставшихся показателей [1–3].

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность работ по креплению скважин, является качество применяемых тампонажных материалов, растворов на их основе и свойств получаемого камня.

Общепризнанно, что целью цементирования обсадных колонн при строительстве нефтяных и газовых скважин является получение качественной и долговечной крепи между породой и колонной. Естественно, что вопросы повышения качества крепления скважин и разобщения пластов всегда зависят от применяемой технологии цементирования и качества применяемых тампонажных материалов, поскольку большинство применяемых в настоящее время тампонажных цементов не могут обеспечить надежной герметизации затрубного пространства за обсадными колоннами из-за присутствующих им недостатков.

Одним из перспективных направлений повышения герметичности крепи скважин явилось применение расширяющихся тампонажных цементов и нефтяные

компании стали широко практиковать использование этих материалов [4–8]. Данная идея не нова, она начала активно разрабатываться и пропагандироваться с 70–х гг. прошлого века.

В Казахстане впервые на территории бывшего Советского Союза началась разработка, промышленный выпуск и широкое применение расширяющихся цементов. Огромный вклад в это направление внес лауреат государственной премии Казахстана **Н.Х. Каримов**. Его работы в Актюбинском отделении КазНИГРИ позволили расширить сырьевую базу для производства расширяющихся цементов различной плотности и широкого температурного интервала [8–11]. Сотрудниками АО КазНИГРИ были проанализированы практически все отходы металлургической и горнорудной промышленности Казахстана, показана их перспективность для получения расширяющихся цементов.

Важнейшим достижением **Н.Х. Каримова** было строительство в г. Актюбинске дезинтеграторного цеха по производству сухих тампонажных материалов, который полностью закрывал потребности в тампонажных материалах предприятий не только министерства геологии Казахстана, но и разведчиков других республик СССР [11, 12].

Принцип получения любого расширяющегося цемента основан на вводе добавок, образующих при взаимодействии с водой или продуктами гидратации базового вяжущего новые вещества, объем которых больше объема веществ, вступивших в реакцию гидратации [13–15]. В результате увеличения объема расширяющей добавки происходит раздвижка кристаллов твердеющего цементного раствора (камня), выражающаяся в увеличении его внешнего объема. Схема увеличения объема получаемого камня показана на *рисунке 1*.

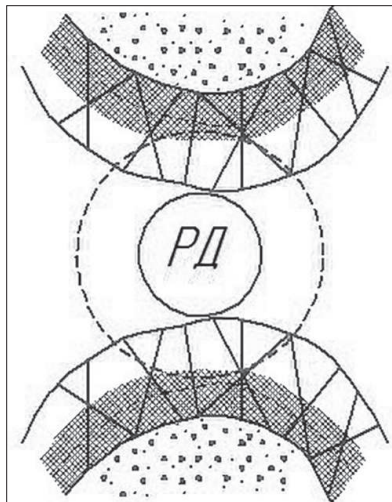


Рисунок 1 – Схема, поясняющая механизм расширения цементного камня при твердении:
 1 – негидратированный цемент; 2 – продукты твердения;
 3 – расширяющая добавка (РД), первоначальный объем;
 4 – расширяющая добавка после увеличения объема

По мнению *Ф.А. Агзамова*, природа расширения всех типов цементов состоит в кристаллизационном давлении новой твердой фазы, полученной при гидратации расширяющей добавки и образующейся после гидратации базового вяжущего, и не способной при этом разместиться в поровом пространстве твердеющей системы [16].

При получении расширения цементов широко используется кристаллизационное давление гидросульфатоалюмината 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 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (моносulfатная форма). Для кристаллизации этих соединений необходимо присутствие ионов Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} – в водном растворе при достаточно рН среды. В качестве расширяющих добавок могут использоваться гипс и гипсосодержащие вещества, смесь гипса с высокоглиноземистым вяжущим, высокоглиноземистые шлаки, безводный сульфатоалюминат кальция, глиноземистый и гипсоглиноземистый цементы, алуни́т и др. Цементы такого типа являются быстротвердеющими, имеют позднее расширение, эффективны при температурах 20–80°C и нашли применение в строительной индустрии [4, 13–14].

Хорошие результаты при изготовлении расширяющихся цементов имели хроматалюминатные добавки, расширение которых обеспечивается высокохроматной формой гидроалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$), образование которого сопровождается большим увеличением объема твердой фазы по сравнению с C_3AH_6 [9].

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 [4, 7, 11, 15]. Скорость гидратации указанных оксидов может регулироваться температурой обжига и дисперсностью добавок.

Получение расширения за счет применения газовыделяющих добавок в практике строительства скважин неприемлемо, поскольку при высоких давлениях образующийся газ сжимается и может растворяться в поровой жидкости цементного камня [15].

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 [15].

Впервые расширяющиеся цементы начали применять в строительной отрасли. При этом было разработано много рецептов расширяющихся и напрягающихся цементов [13–14]. Однако эти цементы не нашли применения при креплении скважин из-за специфических свойств цементов и растворов, присущих только тампонажным материалам и растворам. В первую очередь это относится к более высоким водоцементным отношениям тампонажных растворов: 0,45–0,55 против 0,25–0,35 у строительных растворов и бетонов, более высоким температурным условиям

применения, длительному периоду сохранения подвижности и прокачиваемости растворов, реологическим свойствам и др.

Именно поэтому при креплении скважин расширяющиеся цементы начали широко применяться только в последние 15–20 лет.

Одной из причин того, что расширяющиеся тампонажные материалы не получили широкого распространения, являлась необходимость ввода расширяющих добавок в условиях буровой или, в лучшем случае, на базе бурового предприятия.

Широкое применение расширяющихся цементов в настоящее время во многом связано с развитием технологии заводского приготовления, начавшимся с появлением независимых производителей специальных цементов, имеющих гибкие технологические линии с необходимыми дозаторами и узлами смешения готовой продукции.

Следует отметить различные мнения среди специалистов относительно применения расширяющихся цементов при креплении скважин. В частности, известно критическое отношение одного из авторитетнейших специалистов бывшего СССР *А.И. Булатова* к данному виду тампонажных материалов, высказанное им в одной из последних своих публикаций [17]. С частью этих замечаний можно согласиться, а относительно других можно поспорить.

В тоже время производственники положительно воспринимают расширяющиеся цементы, поскольку при их применении повышается качество контакта цементного камня с ограничивающими поверхностями по данным акустической цементометрии (АКЦ), что значительно упрощает процедуры расчетов с заказчиками.

При этом многие исследователи отмечают, что твердение цементного раствора с расширением в ограниченном объеме может привести к росту внутренних напряжений в камне, повышает его хрупкость и может привести к трещинообразованию при перфорации в интервалах находящиеся выше и ниже перфорируемого интервала.

Частично принимая замечания *Анатолия Ивановича Булатова* [17], мы полагаем, что при использовании расширяющихся цементов есть несомненная польза, но при этом очень важно их правильное применение.

Известно, что качество крепления скважин и герметичность затрубного пространства зависит от множества показателей (можно легко показать 15–20 факторов) и некачественное исполнение любого из них может, в той или иной степени, негативно сказаться на качестве цементирования обсадной колонны в целом.

Многофакторность процесса крепления предполагает, что каждый из многих факторов должен быть учтен при подготовке скважины, спуске обсадной колонны, операции цементирования и в период ОЗЦ. К сожалению, даже стандартные правила часто недостаточно хорошо исполняются. Можно отметить наличие фильтрационных корок на стенках скважины, игнорирование проработки и шаблонировки скважины перед спуском колонн, отсутствие нижней разделительной пробки, невыдерживание требуемого времени ОЗЦ и др.

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

По мнению *Н.Х. Каримова*, возможность прорастания кристаллов в порах опре-

деляется величиной пересыщения жидкой фазы и соотношением размера кристаллов пор [18]. 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 прорасти 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 парового пространства, т. е. не будет достигнуто желаемое расширение.

Это означает, 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 паровое пространство.

При повышении водоцементного отношения в облегченных тампонажных растворах увеличивается расстояние между зернами цемента и, даже при максимальной гидратации расширяющей добавки, она не будет достигать продуктов твердения цементов, и расширения камня при твердении не будет. 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 (добавление в цемент фибры) также будет повышать эффект расширения за счет передачи кристаллизационного давления к цементной матрице через каркас, образованный фиброй [19].

Таким образом, для получения расширяющихся цементов с заданной величиной расширения, обеспечивающего давление на ограничивающие поверхности, необходимо регулировать геометрию пор образующегося цементного камня, скорость и количество образовавшихся расширяющих продуктов.

Кроме того, по мнению *Ф.А. Агзамова, В.В. Бабкова и И.Н. Каримова* [20], при использовании расширяющихся цементов условием их эффективного применения является согласование кинетики гидратации цемента и кинетики гидратации рас-

ширяющей добавки. Необходимо, чтобы основная часть расширения происходила после получения «стоп» и после начала формирования кристаллизационной структуры цементного камня. Если гидратация расширяющей добавки будет происходить во время закачки цемента и его продавки, это не скажется на качестве разобщения пластов, поскольку раствор будет находиться в жидком состоянии и не сможет передавать давление на ограничивающие поверхности [20]. Поэтому для тампонажных цементов считается оптимальным получать расширение в период 1–3 суток, когда структура образованного цементного камня еще малопрочная (рисунок 2).

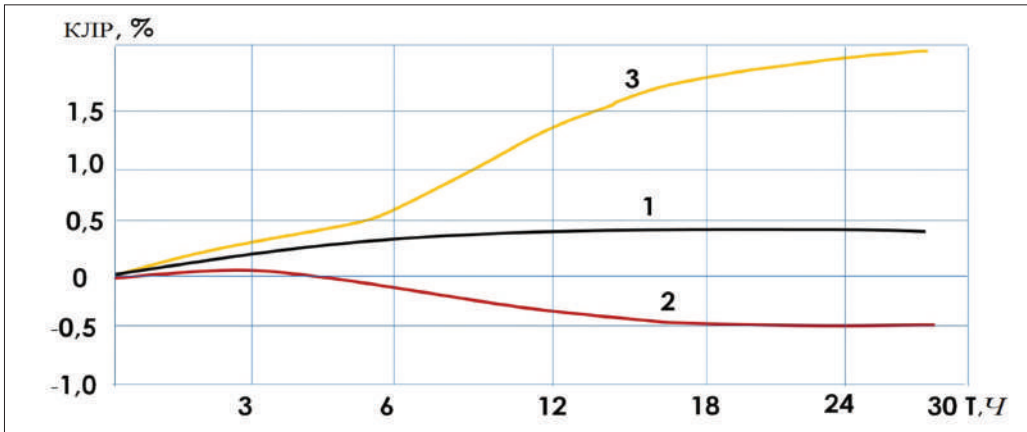


Рисунок 2 – Кинетика изменения объема цементного камня при твердении: 1 – в воде; 2 – на воздухе; 3 – в воде с расширяющей добавкой

Позднее расширение может привести к растрескиванию цементного камня из-за того, что его структура не выдерживает растягивающих напряжений при увеличении объема расширяющей добавки. Внутренние напряжения исключают функцию самозалечивания гидратирующим цементом и приводят к повышению хрупкости камня и снижению его удароустойчивости, что может явиться причиной преждевременного обводнения скважин после их перфорации. В этой связи надо признать правильными предложения по оптимизации времени проведения работ по перфорации скважин [21], причем, в случае применения расширяющихся цементов, эти сроки должны обязательно корректироваться.

По данным [20], расширение 1,5–2,5% должно быть достаточным для расширяющихся тампонажных цементов. Следует отметить, что в строительной практике не используют цементы с большой величиной расширения, хотя их получение для строительной промышленности не представляет больших проблем. Для высокотемпературных скважин, в которых образуется более прочный цементный камень, расширение не должно превышать 1,0–1,5%.

При гидратации цемента, после перехода от коагуляционной структуры к кристаллизационной структуре (после начала схватывания цементного раствора), в системе образуются жесткие химические связи, которые частично разрушаются в результате расклинивающего давления расширяющей добавки, и в цементном камне неизбежно возникают микротрещины (рисунок 3).

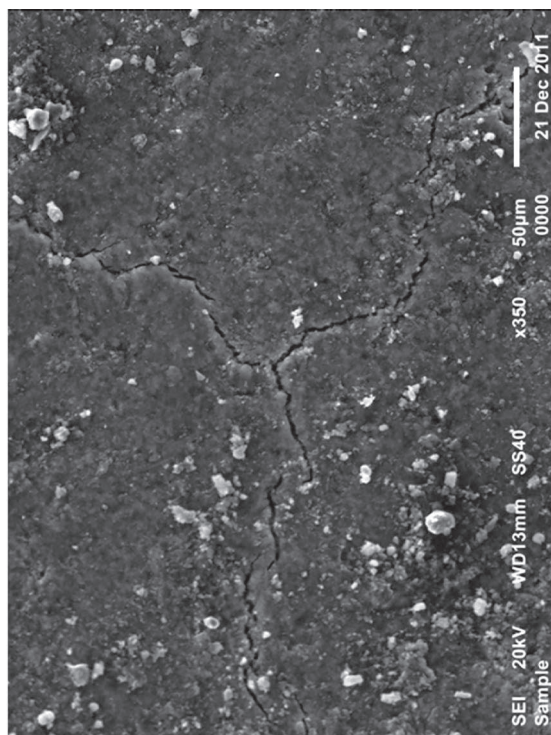
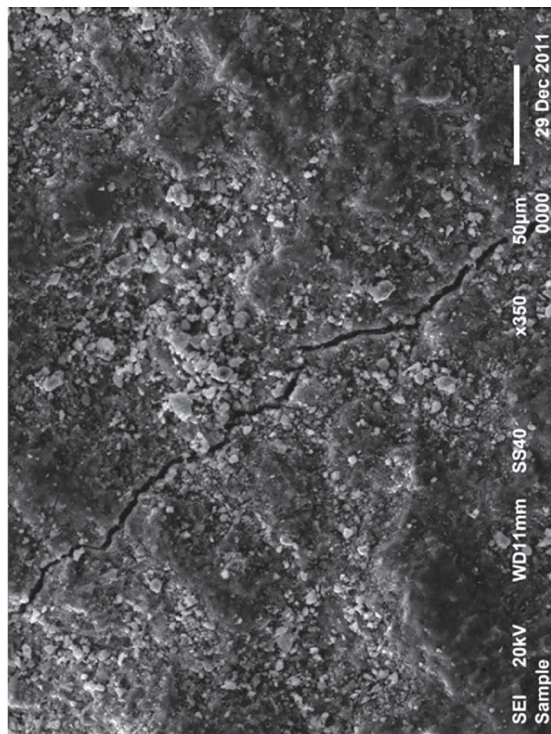


Рисунок 3 – Образование микротрещин при твердении расширяющихся цементов

В ранние сроки твердения (несколько суток) микротрещины «залечиваются» новыми продуктами гидратации и это не сказывается на ранней прочности цементного камня. При поздней гидратации расширяющей добавки, когда количество новых продуктов гидратации цемента и скорость их образования существенно меньше, «заживления» микротрещин не происходит и они остаются в камне в роли инициаторов образования крупных трещин при внешних воздействиях на цементный камень (перфорация, углубление скважины, гидроразрыв пластов и др.).

К сожалению, при оценке качества расширяющихся добавок, в первую очередь оценивают создаваемую ими величину расширения цементного камня, практически не оценивая кинетику расширения. В тоже время значительная часть расширяющих добавок гидратирует в ранние сроки в процессе закачки цементного раствора в скважину, и эффект от их использования будет очень низкий. В работе [16] показана кинетика расширения цементного раствора (камня), содержащего различные расширяющие добавки (рисунком 4), из которого видно, что практически половина исследуемых добавок прогидратировала в течение 1,0–2,0 часов, и дальнейшего расширения цементов уже не происходит. Естественно, что при повышении температуры и ускорении твердения цементов скорость гидратации добавок будет возрастать и активный период расширения будет сокращаться.

Выше отмечалось, что применение расширяющихся цементов рассматривается как способ повышения герметизации контактных зон цементного камня (обсадная колонна и стенка скважины). Однако надо учитывать, что их применение не даст положительных результатов в интервалах с толстой глинистой коркой или интервалах каверн, где пространство для расширения цементного камня за счет деформации фильтрационной корки больше чем величина самого расширения.

В межколонном пространстве или в интервалах плотных пород расширяющиеся цементы повысят напряженность контакта с сопредельными поверхностями, поскольку свободного пространства для расширения не будет. Однако внутри цементного камня будут возникать дополнительные внутренние напряжения, которые будут сохраняться, повышая его хрупкость. Причем, чем выше величина расширения камня в условиях жесткого ограничения объема, 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.

Именно поэтому следует тщательно подходить к величине расширения цементного камня и кинетике его расширения с тем, чтобы обеспечивался герметичный контакт, создавались небольшие внутренние напряжения, а образовавшиеся микротрещины могли залечиваться при продолжающейся гидратации цемента.

Помимо свойств расширяющей добавки, на величину и кинетику расширения цементного камня существенное влияние оказывают и другие факторы и, в первую очередь, внешнее давление.

По данным *Н.Х. Каримова*, для цементов с расширяющей добавкой СаО увеличение внешнего давления до 50 МПа снизило расширение на 30%, а повышение

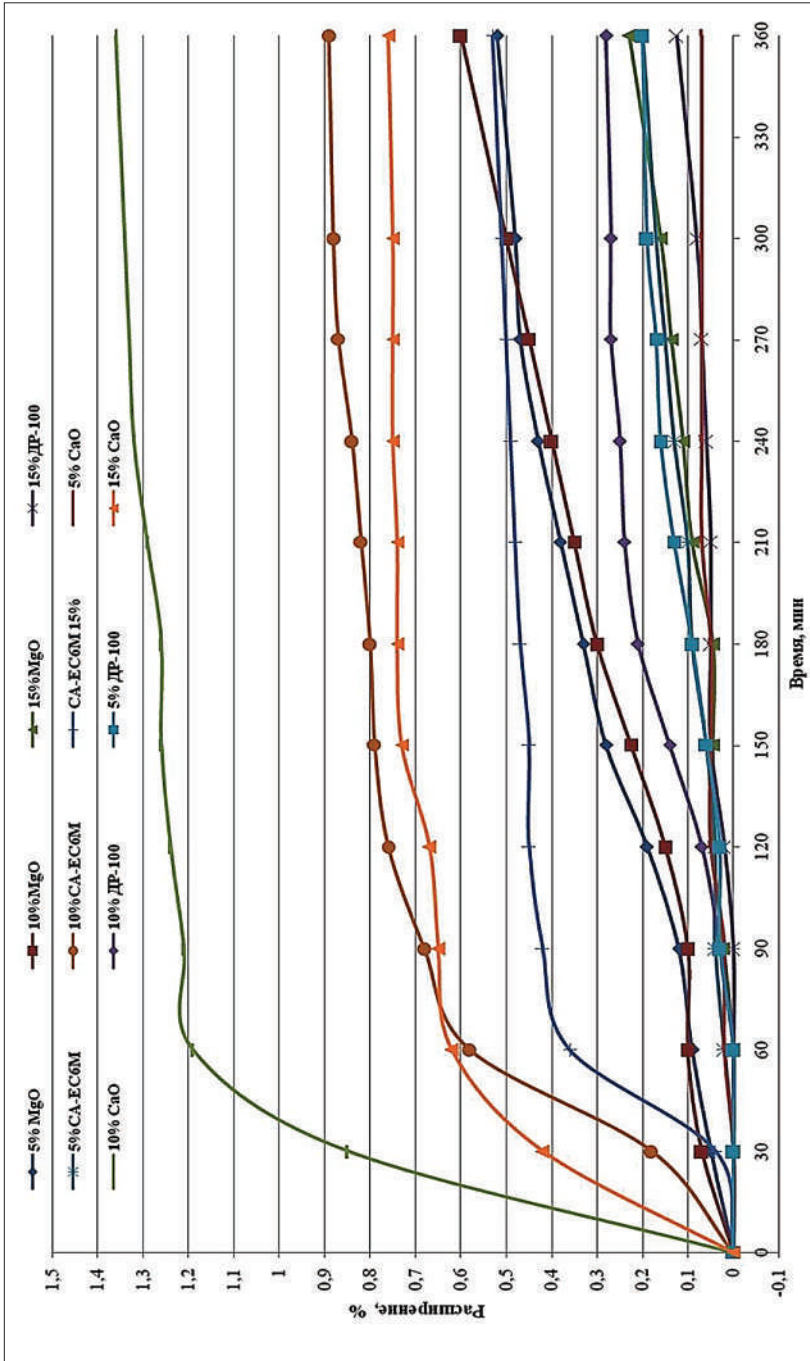


Рисунок 4 – Влияние расширяющих добавок на кинетику расширения цементного камня при твердении

давления до 100 МПа уменьшило расширение уже на 70%. Для цементов хроматалюминатного расширения при росте давления с 10 до 100 МПа расширение снизилось на 30%, а при затворении этого цемента раствором NaCl – на 25%.

По мнению [18], 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.

При гидратации портландцемента, также как и при гидратации других вяжущих, неизбежно происходит контракция, обусловленная тем, что объем продуктов гидратации всегда меньше суммы объемов продуктов, вступивших в химическую реакцию (вяжущее и вода) [4, 15]. Причин здесь две – первая связана с тем, что вода, вступая в реакцию с минералами цемента, переходит в связанное состояние в образовавшихся продуктах твердения и уменьшает свой объем. Вторая причина связана со структурой цементного камня. По данным [22], на гидратацию цемента необходимо только 20% воды от веса цемента, а остальная вода находится в порах различного размера, причем образовавшийся при гидратации цементный гель содержит около 30% пор размером менее 10^{-7} см, (гелевые поры), которые всегда заполнены водой, плотность которой может достигать до 1200 кг/м^3 , имеющей объем менее первоначального объема. При гидратации расширяющей добавки происходит увеличение объема твердой фазы и, именно это обеспечивает расширение цемента. Однако контракция при этом не уменьшается, поскольку одновременно с гидратацией цементов происходит гидратация расширяющей добавки, в результате чего также уменьшается первоначальный объем воды. Доказательством сказанного могут служить результаты определения контракции при твердении цементных растворов на основе «чистых» и расширяющих цементов (таблица). Испытания проводились с использованием портландцемента с $V/C = 0,5$.

Таблица – Влияние различных добавок на контракцию при твердении цементных растворов


Исследуемые составы	Контракция, % во времени, ч						
	1	4	8	12	16	20	24
ПЦТ-I-50	0,28	0,61	1,07	1,61	2,36	2,87	3,15
ПЦТ-I-50+0,03%НТФ	0,09	0,28	0,45	0,94	1,77	2,31	2,53
ПЦТ-I-50+7%РД	0,31	0,54	0,94	1,56	2,41	2,84	3,05
ПЦТ-I-50+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.

Если твердение цементов будет происходить в межколонном пространстве или против плотных непроницаемых пород, а на гидратацию цемента и расширяющей добавки будет расходоваться вода – жидкость затворения цементного раствора, то пористость камня может увеличиваться даже при плотном контакте цементного камня с обсадными колоннами. Причем, по данным [22], размер усадочных (контракционных) пор будет близок к размерам капиллярных пор, способных пропускать через себя газ и жидкости. Кроме этого, внутри цементного камня (при большом количестве расширяющей добавки) сохранятся высокие напряжения, которые впоследствии могут привести к образованию трещин. Однако применяемые при креплении скважин цементные растворы имеют очень большие водоцементные отношения и, при оптимальном количестве расширяющей добавки (3–7%), вероятность нарушения целостности цементного камня в межколонном пространстве в результате гидратационных процессов невелика.

Если в затрубном пространстве скважины 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 [23].

В заключение следует отметить, что расширяющиеся цементы целесообразно применять, но с учетом правильного подбора рецептуры тампонажного материала и с учетом рациональной области применения. 

REFERENCES

- [1] Булатов А.И. *Детективная биография герметичности крепи нефтяных и газовых скважин*. Краснодар: просвещение Юг; 2009. 934 с. [Bulatov A. I. Detective a biography of the tightness of a lining of oil and gas wells. Krasnodar: prosveshchenie Yug; 2009. (In Russ.)]
- [2] Nelson Erick B., Guillot Dominique. *Well cementing. Second Edition*. Schlumberger; 2006.
- [3] Овчинников В.П. *Технология бурения нефтяных и газовых скважин*. Тюмень: ТИУ; 2017. 584 с. [Ovchinnikov V.P. *Technology of drilling oil and gas wells*. Tyumen: TIU; 2017. (In Russ.)]
- [4] Данюшевский В.С., Алиев Р.М., Толстых И.Ф. *Справочное руководство по тампонажным материалам*. Москва: Недра; 1987. 250 с. [Danyushevsky V.S., Aliyev R.M., Tolstykh I.F. *Reference manual for plugging materials*. Moscow: Nedra; 1987. (In Russ.)]
- [5] Ghofrani Reza and HeikoPlack. CaO- and/or MgO-Swelling Cements: A Key for Providing a Better Annular Sealing? – SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 1993.
- [6] Паркер П.Н., Уол В.В. Применение расширяющихся цементов для цементирования скважин. *Экспресс информация нефтегазодобывающей промышленности*. 1966;

- 34:8–12. [Parker P. N., Wal V. V. Application of expanding cements for well completion. *Express information for the oil and gas industry*. 1966; 34:8–12. (In Russ.)]
- [7] Данюшевский В.С. Пути получения расширяющихся тампонажных цемента. *Газовая промышленность*. 1973;11:13–15. [Danyushevsky V.S. Ways of obtaining expanding grouting cements. *Gas industry*. 1973; 11:13–15. (In Russ.)]
- [8] Каримов Н.Х., Данюшевский В.С., Рахимбаев Ш.М. *Разработка рецептур и применение расширяющихся тампонажных цемента: Обзорная информация*. Москва: ВНИИОЭНГ; 1980. 50 с. [Karimov N.H., Danyushevsky V.S., Rakhimbaev Sh.M. *Development of re-circuits and application of expanding grouting cements: Overview*. Moscow: VNIIOENG; 1980. (In Russ.)]
- [9] Каримов Н.Х., Рахматуллин Т.К., Мукашева Т.В. Исследование промышленных отходов Западного Казахстана для разработки облегченных тампонажных материалов. *Информационный сборник*. Алма-Ата; 1985. 32 с. [Karimov N.H., Rahmatullin T.K., Mukasheva T.V. Research of industrial waste in Western Kazakhstan for the development of lightweight plugging materials. *Informacionnyj sbornik*. Alma-Ata; 1985. (In Russ.)]
- [10] Каримов Н.Х., Данюшевский В.С., Хахаев Б.Н. *Вязущие материалы, изготавливаемые из промышленных отходов и их применение при креплении скважин*. Москва; 1982. 72 с. [Karimov N.H., Danyushevsky V.S., Khakhaev B. N. *Binding materials made from industrial waste and their use in well construction*. Moscow; 1982. (In Russ.)]
- [11] Измухамбетов Б.С., Агзамов Ф.А., Умралиев Б.Т. *Применение дезинтеграторной технологии при получении порошкообразных материалов для строительства скважин*. Санкт-Петербург: Недра; 2007. 464 с. [Izmukhambetov B.S., Agzamov F.A. Umralliev B.T. *Use of the design- tegrating technology of obtaining powder materials for the construction of wells*. Saint Petersburg: Nedra; 2007. (In Russ.)]
- [12] Каримов Н.Х., Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С. Состояние и перспективы применения дезинтеграторной технологии при строительстве скважин. *Нефтяное хозяйство*. 2003; 3:40–43. [Karimov N.H., Agzamov F.A., Izmuhambetov B.S. State and prospects of application of disintegrator technology in the construction of wells. *Oil industry*. 2003; 3:40–43. (In Russ.)]
- [13] Кузнецова Т.В., Кравченко И.В., Власова Н.Г., Юдович Б.Э. Химия и технология специальных цементов. Москва: Стройиздат; 1979. 207 с. [Kuznetsova T.V., Kravchenko I.V., Vlasova N.G., Yudovich B.E. *Chemistry and technology of special cements*. Moscow: Stroizdat; 1979. (In Russ.)]
- [14] Кузнецова Т.В. Напрягающие цементы. *Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева*. 1982; 5:500–503. [Kuznetsova T.V. Straining cements. *Zhurnal vsesoyuznogo himicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva*. 1982; 5:500–503. (In Russ.)]
- [15] Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С., Токунова Э.Ф. *Химия тампонажных и буровых растворов*. Санкт-Петербург: Недра; 2011. 268 с. [Agzamov F.A., Izmukhambetov B.S., Tikunova E.F. *Chemistry Tampa and withdrawal of drilling fluids*. Saint Petersburg: Nedra; 2011. (In Russ.)]
- [16] Agzamov F.A. [Some features of the production and use of expanding cements]. *Materialy 3 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii "Bulatovskie Chteniya"* [International scientific and practical conference "Bulatov readings"]. Краснодар, 2019, pp. 26–33. (In Russ.)
- [17] Булатов А.И. Миф о «расширяющихся цементах». *Бурение и нефть*. 2016; 2:25. [Bulatov A.I. The myth of "expanding cements". *Burenie i neft'*. 2016; 2:25.]
- [18] Каримов Н.Х., Бакиров Н.К. Условия повышения контактных напряжений в заколонном

- пространстве скважин. Уфа, 1990. 258 с. [Karimov N.H., Bakirov N.K. The conditions of increasing contact stresses in the annular space of wells. Ufa, 1990.]
- [19] Bekbaev A.A., Agzamov F.A., Lyagov A.V. Research of reinforced lightweight plugging materials. *Nanotechnologies in construction*, 2017, vol. 9. no. 4. pp. 131–148. doi: dx.doi.org/10.15828/20758545–2017–9–4–131–148. [20] Агзамов Ф.А., Бабков В.В., Каримов И.Н. О необходимой величине расширении тампонажных материалов. *Территория Нефтегаз*. 2011; 8:14–15. [Agzamov F.A., Babkov V.V., Karimov I.N. On the required amount of expansion of plugging materials. *Oil and gas territory*. 2011; 8:14–15. (In Russ.)]
- [21] Агзамов Ф.А., Белоусов А.О. Результаты расчета нагрузок, возникающих при динамическом и ударном воздействии в обсадной колонне, как обоснование требований к прочности цементного камня. *Нефть. Газ. Новации*. 2017; 10:60–64. [Agzamov F.A., Belousov A.O. Results of calculation of loads arising from dynamic and shock effects in the casing as a justification of requirements for the strength of cement stone. *Neft'. Gaz. Novacii*. 2017; 10:60–64. (In Russ.)]
- [22] Невилль А. М. Свойства бетона. М., 1972. 344 с. [Nevill' A. M. *Property of concrete*. Moscow, 1972.]
- [23] Агзамов Ф.А., Измухамбетов Б.С. *Долговечность тампонажного камня в коррозионно-активных средах*. Санкт-Петербург: Недра; 2005. 318 с. [Agzamov F.A., Izmuhambetov B.S. *The durability of the cement stone in corrosive environments*. Saint-Petersburg: Nedra; 2005. (In Russ.)]