

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Обзор

УДК 622.245.422.6

EDN: EDIKSA

Самовосстанавливающиеся цементные системы в нефтегазовом секторе: состояние и перспективы развития

А.В. Медведев ✉, П.О. Колчанов

ООО «Системы телекоммуникаций и информационной безопасности Шлюмберже», Россия, 125171, Москва, Ленинградское шоссе, д. 16А, стр. 3

Аннотация. В статье проведен обзор современных подходов к формированию самовосстанавливающихся цементных систем с акцентом на их применение в нефтегазовой отрасли. Использована классификация самовосстанавливающихся цементных систем, основанная на природе активирующего агента и отражающая специфику операций со скважинами. Особое внимание уделено механизмам самозалечивания в условиях нефтегазовой эксплуатации, где ключевыми факторами являются восстановление гидравлической изоляции и требование самовосстановления системы без проведения дополнительных операций. Также в статье проведен детальный анализ существующих методов создания трещин в лабораторных условиях и обзор лабораторных методов тестирования процессов самовосстановления. Показано, что самовосстанавливающиеся цементные системы представляют значительный интерес для нефтегазовой отрасли, особенно при условии разработки стандартных протоколов тестирования и поиска материалов, эффективно работающих в водной и углеводородной средах. При этом критический анализ показал, что многие подходы по разработке самовосстанавливающегося цементного камня имеют ограниченную применимость в нефтегазовой индустрии. Проведены анализ научной литературы по поиску перспективных материалов для самовосстанавливающихся цементных систем, а также сравнение эффективности активных добавок на основе принципа сохранения массы веществ.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся цемент, цементирование скважин, ремонтно-изоляционные работы, функциональная добавка, активирующий агент, микроазор, гидравлическая изоляция

Финансирование: источники финансирования отсутствовали.

Для цитирования: *Медведев А.В., Колчанов П.О.* Самовосстанавливающиеся цементные системы в нефтегазовом секторе: состояние и перспективы развития // Актуальные проблемы нефти и газа. 2026. EDN: EDIKSA

✉ Медведев Анатолий Владимирович, amedvedev5@slb.ru

© Медведев А.В., Колчанов П.О., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Самовосстанавливающиеся цементы привлекают повышенное внимание исследователей и отраслевых специалистов, поскольку такие системы могут обеспечить долгосрочную стабильность структур и способны восстанавливаться после механического или химического воздействия, компенсируя негативный эффект, в идеале, без дополнительного вмешательства. Некоторые исследователи утверждают, что строительные материалы, используемые в Древнем Риме, уже обладали свойствами самовосстановления [1, 2]. Однако стоит предположить, что способность к самовосстановлению древнеримских связующих составов была побочным свойством, а не целевой специально достигнутой функциональностью. Действительно, как будет показано в данном обзоре, даже обычный портландцемент обладает некоторой склонностью к самовосстановлению за счет непрореагировавшего клинкера или за счет процессов карбонизации.

Первые работы по изучению самовосстановления бетонных материалов относятся к 1930-м годам, тогда как разработка специализированных самовосстанавливающихся вяжущих составов – к периоду 1990-х, когда в цементные смеси начали добавлять волокна с метилметакрилатом [3, 4]. С момента публикации первых работ подходы и методы достижения эффекта самовосстановления были значительно развиты и всесторонне исследованы. В настоящее время написано несколько больших обзоров, рассматри-

вающих самовосстанавливающиеся полимерные материалы [5], некоторые стратегии в реализации процессов самовосстановления [6], цементы и бетоны для нужд строительной индустрии [7–9], самовосстановление на основе микробиологических процессов и водопоглощения [10, 11], а также обзоры, затрагивающие весь возможный спектр самовосстанавливающихся материалов [12].

Для нефтегазовой промышленности свойство самовосстановления цементного камня является особенно ценным, поскольку после закачивания цементного раствора в скважину теряется прямой доступ к цементному камню, характерный для многих строительных конструкций. Это приводит к тому, что работы по восстановлению целостности цементной крепи в стволе скважины сопровождаются проведением дорогостоящих ремонтно-изоляционных работ и требуют остановки добычи углеводородов.

Краткий обзор и классификация существующих подходов

В данном обзоре будем придерживаться следующего определения самовосстанавливающихся систем и материалов: самовосстанавливающиеся материалы – это класс материалов, способных устранять возникшие в них повреждения и восстанавливать свои первоначальные структурные и функциональные свойства без специального дополнительного воздействия [7].

Следует обратить внимание, что многие исследователи выделяют дополнительный, более узкий класс самовосстанавливающихся материалов с активируемым самовосстановлением (также называемые восстанавливаемыми материалами), которым требуется дополнительная внешняя обработка для восстановления первоначальных свойств¹ [7, 12]. Однако мы считаем, что дополнительная внешняя обработка не позволяет называть данные материалы самовосстанавливающимися в контексте нефтегазовой отрасли и мало отличается от стандартных ремонтно-изоляционных работ, но рассмотрим данные методы для полноты картины и выведем данные системы в отдельный раздел используемой нами классификации [7].

Также следует обратить внимание на то, что в зависимости от конкретной задачи целевыми свойствами материала могут быть механическая прочность, оптические свойства, гидравлическая изоляция, акустические характеристики и т. д. Таким образом, задача самовосстановления материала может рассматриваться как восстановление целевых механических, акустических, оптических, гидравлических и иных свойств. Для нефтегазовой отрасли одной из основных задач цементной крепи в скважине является гидравлическое разделение различных коллекторов, что указывает на то, что для самовосстанавливающихся цементов одним из ключевых параметров является

восстановление нарушенной гидравлической изоляции [13].

Для однозначного восприятия материала сначала следует определиться с некоторыми понятиями. Так, рассмотрим образец цементного камня, в котором сформировалась трещина, приводящая к нарушению гидравлической изоляции (рис. 1а) [14]. Для простоты рассмотрения предположим, что образовавшаяся трещина не закрывается под действием механических сил, т. е. будем действовать из рассмотрения наихудшего варианта развития событий, что является оправданным с точки зрения разработки и внедрения надежных продуктов на рынок.

Рассматриваемая система состоит из цемента, активной добавки и трещины, с соответствующими объемными долями: ϕ_c , ϕ_d , ϕ_t (рис. 1б).

В самом простом варианте для восстановления гидравлической изоляции цементного камня необходимо заполнить трещину некоторым материалом (рис. 1в) [14]. Таким образом:

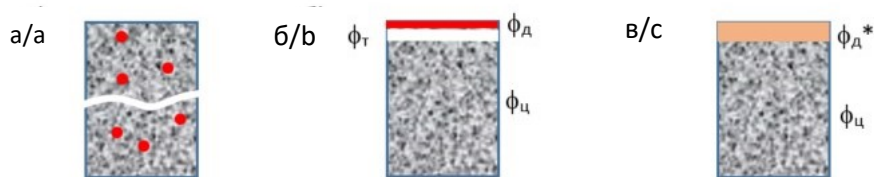
$$\phi_d^* = \phi_d + \phi_t, \quad (1)$$

где ϕ_d^* – объемная доля добавки после процесса самовосстановления.

Введенные понятия и рассмотрение наихудшего варианта развития событий означают, что полное заполнение трещины материалом в процессе самовосстановления практически всегда подразумевает поступление дополнительного активирующего агента в систему.

Данное утверждение обусловлено законом сохранения массы вещества, с единственным возможным исключением для материалов, спонтанно претерпевающих значительное изменение плотности.

¹ Igarashi S., Kunieda M., Nishiwaki T. Technical Committee on Autogenous Healing Cementitious Materials: Committee Report JCI TC075B. Tokyo: Japan Concrete Institute, 2009. URL: https://www.jci-net.or.jp/j/publish/research/tcr/tcr2009/TC075B_tcr09.pdf (дата обращения: 17.04.2025).



■ функциональная добавка, ответственная за самозалечивание
 объемные доли: $\phi_{ц}$ – цемента, $\phi_{д}$ – активной добавки, $\phi_{т}$ – трещины

Рис 1. Схематическое изображение образца цементного камня в разрезе:
 а – трещина в цементном камне; б – фазовый состав образца;
 в – фазовый состав образца после восстановления

Fig. 1. Schematic representation of a cement stone sample in cross-section:
 а – crack in the cement stone; б – phase distribution in the sample;
 с – phase distribution in the sample after restoration

Источник: адаптировано из [14]

Source: adapted from [14]

Также можно заметить, что для полного завершения процесса самовосстановления необходимо, чтобы активирующий агент присутствовал в избытке. Таким образом, при обсуждении самовосстанавливающихся систем ключевую роль играет активирующий агент, который взаимодействует с функциональной добавкой и инициирует процесс самовосстановления [7, 11, 12].

Систематизация и анализ литературных источников позволили установить, что восстановление свойств цементных систем может происходить за счет следующих двух категорий:

1. Самовосстановление свойств в результате необратимых процессов (активирующими агентами являются температура, вода, CO_2 , перераспределение материала) или в результате обратимых процессов (активирующие агенты – вода, углеводороды, CO_2);

2. Активация восстановления свойств путем внешнего воздействия связующими элементами (активирующие агенты – цемент, смолы, полимеры, энзимы) или питательными веществами для бактерий (активирующие агенты – мочевины).

Данная классификация выгодно отличается от представленных ранее в литературе подходов [12] тем, что учитывает специфику нефтегазового сектора и оперирует фундаментальными физико-химическими процессами, лежащими в основе эффекта самовосстановления. Также удобство подобной классификации заключается в том, что она может быть легко масштабирована для задачи практического применения и выбора конкретных самовосстанавливающихся систем в зависимости от целей и условий, стоящих перед исследователями. Представленная классификация в явном виде выделяет в отдельную категорию под названием «Активация» процессы, которые требуют дополнительного активного вмешательства извне. Отделение их от категории «Самовосстановление» вносит ясность в область применимости процессов и позволяет избежать возможной путаницы при обсуждении практических аспектов процессов восстановления свойств цементных систем.

Рассмотрим детально каждую категорию указанных восстанавливающихся систем.

Самовосстановление

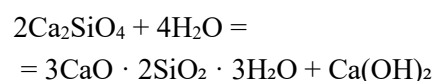
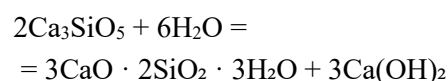
Как было указано выше, материалы данной категории восстанавливают свои функциональные свойства в результате наступления определенного события, служащего спусковым механизмом. Наиболее частым спусковым механизмом является течение жидкости по образовавшейся трещине. В зависимости от природы жидкости и механизма активации можно выделить группы процессов разных типов [11].

Необратимый процесс самовосстановления. Данный тип процессов самовосстановления основан на химических реакциях или физических процессах, которые практически полностью протекают в направлении образования продуктов реакции. В данном контексте можно выделить следующие вещества, стимулирующие процесс восстановления: водная фаза, углекислый газ, перераспределение (или переток) вещества и влияние температуры. Рассмотрим роль каждого вещества более детально.

Водная фаза. Является одним из наиболее распространенных агентов самовосстановления, поскольку водная фаза широко представлена в виде атмосферных осадков, конденсата, грунтовых водах и других природных источников. Уже рассмотренный исторический пример самовосстанавливающихся материалов из Древнего Рима основан на химической реакции между водой, гидроксидом кальция и вулканическим пеплом.

Также поздние стадии взаимодействия цемента с водой способны приводить к эффекту самозалечивания. Данные эффекты досконально изучены и описаны в научной литературе, где

детально рассмотрена роль воды в указанном процессе, а также негативные эффекты, вызванные движением воды по трещинам [15]. Считается, что во время гидратации цемента частицы клинкера покрываются гидратами силикатов кальция, изолирующие внутри себя непрореагировавший цементный порошок. При формировании трещины в цементном камне данная оболочка разрушается, обеспечивая контакт непрореагировавшего цемента с водой, что и обеспечивает эффект самозалечивания цементного камня. Процесс можно описать классической реакцией трисиликата кальция Ca_3SiO_5 и дисиликата кальция Ca_2SiO_4 с поступающей водой:



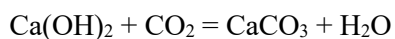
Реакция сопровождается увеличением объема материала, что позволяет заполнить образовавшиеся микротрещины продуктами реакции. В зависимости от состава, температуры, размера частиц и возраста цементного камня, от 2 до 30 % клинкера находится в непрореагировавшем состоянии в составе цементного камня [16].

Схожий эффект самовосстановления также вызывают пуццолановые добавки, однако заполнение объема происходит за счет транспорта растворенного портландита из толщи цементного камня в область микротрещины. Скорость данного процесса очень низкая и довольно часто такие реакции происходят на временной шкале из десятков или даже тысяч лет, как, например, в примере самозалечивания конструкций времен Древнего Рима [1, 2].

Также данный тип самовосстановления может быть вызван добавлением неорганических добавок в состав цемента или бетона. Опубликованы результаты научных работ, где добавление золы-уноса, шлаков [13], оксидов магния и кальция, сульфоалюминатов кальция приводит к самовосстановлению цементного камня. При этом отмечалось, что свежезатвердевшие цементы показывали лучшие результаты, а добавление оксида кремния приводило к исчезновению эффекта самовосстановления, что указывает на основную роль, которую играет портландит в процессе самовосстановления [17].

Также стоит упомянуть научные работы, в которых описывается влияние полимеров на самозалечивание бетона [18], использование добавок капиллярно-активного действия [19], использование инкапсулированного силиката натрия [20] и самовосстановление в геополимерах [21]. Во всех этих случаях вода играет важную роль в процессе самовосстановления. В работе [22] был проведен анализ доступных литературных данных в форме мета-анализа.

Углекислый газ. Данный активационный агент широко используется в строительной индустрии. В основе лежит реакция взаимодействия портландита с диоксидом углерода, приводящая к получению карбоната кальция:



Данная реакция протекает довольно медленно при атмосферных условиях. Также есть основания полагать, что с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере за последнее время скорость самозалечивания по данному механизму должна значительно возрасти.

Есть опубликованные работы по использованию энзимов в присутствии углекислого газа для восстановления трещин в цементном камне, например [23].

Также существуют класс микроорганизмов, называемых кальциногенными, которые способны улавливать углекислый газ и высаживать его в виде карбоната кальция. Однако необходимо упомянуть, что для деятельности бактерий требуется доступ к питательной среде, поэтому мы относим данный процесс к активационным способам восстановления и рассмотрим его в соответствующем разделе.

Температура. Существует несколько подходов, основанных на использовании материалов с памятью формы, и, в частности, с использованием полимеров с памятью формы. Данный подход основан на необратимом физико-химическом процессе, приводящем к изменению формы материала. Добавление таких материалов в виде проволоки или коротких волокон и активация памяти формы при нагревании приводит к исчезновению микротрещин [24–26].

Перераспределение материалов. Данные подходы основаны на использовании различных инкапсулированных материалов. Классическая работа по добавлению инкапсулированных клеящих материалов в цемент опубликована в 1994 г. [27], где авторы использовали полые волокнистые материалы, содержащие гидрофобные вещества и клеящие композиции. Можно упомянуть также работы с использованием эпоксидной смолы [28], основанные на гравитационном и капиллярном растекании жидкого клеящего агента по цементу после формирования трещины; полиуретанов [9], двухкомпонентных инкапсулированных систем [29], самоинкапсуляции [30].

Весь процесс основан на случайном перераспределении инкапсулированного материала между цементным камнем и трещиной с предположением, что количество инкапсулянта будет достаточным для частичного заполнения микротрещины. К сожалению, данный способ не может вызвать полного заполнения образовавшейся трещины. Рассмотрение данного подхода с точки зрения материального баланса говорит о том, что возможно лишь частичное восстановление свойств цементного камня [27].

Обратимый процесс самовосстановления. Обратимые процессы самовосстановления в цементном камне чаще всего базируются на различных физико-химических взаимодействиях и сопровождаются постоянным установлением равновесия при изменении внешних условий. Наиболее часто встречающийся процесс – это абсорбция активирующего агента за счет осмотического давления. При этом процесс поглощения активирующего агента функциональным материалом может смениться на противоположный при изменении внешних условий, таких как соленость среды или температура.

Водная фаза. Одним из самых распространенных и детально изученных процессов является взаимодействие сверхпоглощающих полимеров с водой. Сверхпоглощающие полимеры способны впитывать большое количество жидкости за счет осмотического давления. Особенностью использования сверхпоглощающих полимеров является довольно быстрый процесс впитывания, влияние подобных добавок на реологию цементного раствора, влияние на прочность затвердевшего материала, чувствительность некоторых сверхпоглощающих полимеров к солевым растворам и довольно большое количество различных сверхпоглощающих полимеров [31].

Довольно много работ было посвящено изучению влияния сверхпоглощающих полимеров на восстановление механических свойств цементного камня или бетона, где было показано, что основная роль сверхпоглощающих полимеров заключается в удержании дополнительной воды, участвующей в процессе необратимого самовосстановления в реакции с непрореагировавшим клинкером [14, 32]. В то же время работы, изучающие гидравлическую проницаемость поврежденного цементного камня, указывают на увеличение объема сверхпоглощающего полимера, как на основной механизм восстановления свойств. Так, в работе [33] описывается самовосстанавливающийся цемент на основе полимерной добавки со свойствами сверхпоглощающих полимеров. В статье [34] рассматривается использование сверхпоглощающего полимера с двойной инкапсуляцией, что позволяет отсрочить процесс взаимодействия сверхпоглощающего полимера с водной средой. Много внимания в научных публикациях уделяется также методам и подходам, касающимся инкапсуляции сверхпоглощающих полимеров [35, 36], включая вопросы применения данного подхода в нефтегазовой индустрии [37, 38], а также использования рН для контроля процесса водопоглощения [39]. По данной теме было опубликовано несколько обзоров и статей [14, 40, 41].

Углеводороды. Некоторые материалы способны значительно увеличивать объем при взаимодействии с углеводородами и маслами. Чаще всего такими материалами являются неполярные эластомеры и композиты на их основе. Данные материалы нашли широкое коммерческое применение и, в отличие от сверхпоглощающих полимеров, не взаимодействуют с компонентами цементного раствора во время замешивания и в процессе закачки [42].

Опубликованы работы, где приводятся примеры разработки и использования цементных составов, способных самовосстанавливаться при контакте с углеводородами [42]. В нефтегазовой промышленности большинство самовосстанавливаемых цементных составов представляют собой системы, способные к самовосстановлению при контакте с углеводородами, включая газообразные углеводороды, например, технология CemFIT Heal от компании Шлюбмерже, успешно показавшая себя на практике и доступная в России [43, 44].

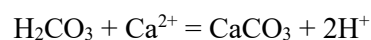
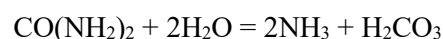
Углекислый газ. Данная группа процессов включает в себя самовосстановление при взаимодействии с неполярными молекулами углекислого газа. Чаще всего функциональные добавки в цемент выбираются из класса неполярных эластомеров и их композитов. Очень низкая вязкость газовой фазы диктует повышенные требования к проницаемости данных систем и к материалам, используемым в качестве функциональных добавок [45–47].

Процессы, основанные на активации

Данная категория процессов восстановления свойств цементного камня требует некоторых дополнительных действий и операций. Без таких дополнительных операций, которые всегда включают в себя введение новых компонентов в систему, восстановления функциональных свойств цементного камня не происходит, поэтому мы не можем отнести эти процессы к категории самовосстановления [12]. Тем не менее, анализ данных процессов и их упоминание необходимы для формирования целостной классификации, особенно учитывая, что данные процессы часто встречаются в научной литературе.

Ремонтно-изоляционные работы (РИР). Все процессы, основанные на ремонтно-изоляционных работах включают в себя локализацию трещин в цементном камне и закачивание изолирующего состава в область трещин. Для данного обзора мы отметим, что для проведения РИР чаще всего предлагается использовать составы на основе микроцемента, наночастиц и эпоксидных смол [48, 49].

Питательная среда. Существует специальный класс кальциногенных бактерий, способных вызывать отложения карбоната кальция при наличии питательной среды и благоприятных условий. Чаще всего бактерии перерабатывают мочевины, разлагая ее по следующей схеме:



Карбонат-ионы реагируют с ионами кальция, давая осадок карбоната кальция [50]. При отсутствии природных источников ионов кальция приходится добавлять в питательную смесь хлорид кальция для формирования осадка.

Опубликованы работы, использующие споры бактерий как добавку в строительные смеси, например [51]. Такие составы демонстрировали способность к самовосстановлению цементного камня или бетона после обработки специальной питательной смесью. Также известен подход, заключающийся в приготовлении смеси кальциногенных бактерий с частицами карбоната кальция и питательной средой. Деятельность бактерий способствовала скреплению частиц карбоната кальция между собой, что приводило к затвердеванию раствора. Данные подходы предлагается применять в архитектуре и для реставрации мраморных скульптур.

Из явных недостатков данного подхода следует отметить процесс культивации бактерий, чувствительность к pH и температуре, а также необходимость обеспечения бактерий питательной средой [52, 53]. Также стоит отметить возможные трудности, связанные с культивированием колоний бактерий в экстремальных условиях Крайнего Севера или пустыни, что практически однозначно ограничивает использование данного способа для нефтегазовой индустрии без разработки специальных способов длительного хранения и консервации бактерий или их спор [54, 55]. Несмотря на это, есть опубликованные работы по использованию бактерии для целей самовосстановления цемента в нефтегазовой отрасли [56–58].

***Лабораторные методы
тестирования процессов
самовосстановления цемента***

В настоящее время разработано довольно большое количество подходов к исследованию процессов самовосстановления в материалах на основе цементов и бетонов. При этом стоит учитывать, что разнообразие функциональных свойств данных материалов не позволяет выработать единый подход и процедуру тестирования процесса самовосстановления. В данный момент усилия ученых разделились на две большие области исследований: самовосстановление механических свойств и самовосстановление гидравлической проницаемости [34, 53, 59]. Так как для нефтегазового сектора огромную роль играет именно гидравлическая изоляция различных коллекторов, то мы будем рассматривать данную область исследований.

В научной литературе по изучению самовосстановления гидравлической проницаемости цементного камня стоит выделить и обсудить три группы экспериментальных методов [31, 45].

Во-первых, это методы создания трещин в цементном камне. Одним из главных критериев, применяемых к процессу формирования трещины, являются повторяемость, воспроизводимость и минимальное воздействие на свойства цементного камня. В данный момент не существует единого способа решения вопроса и наблюдается использование различных принципов и подходов, в зависимости от поставленных задач и доступности оборудования.

Во-вторых, это косвенные методы измерения гидравлического самовосстановления трещин. К ним можно отнести оптические методы, методы исследования поверхности, рентгеновские методы, аналитические методы, ультразвуковое тестирование, томография, механическое тестирование, расширение и т. д.

В-третьих, это прямые методы измерения гидравлического самовосстановления трещин. Чаще всего используются методы измерения перепада давления при течении жидкости в трещине. Некоторые авторы предлагают использовать методы, основанные на измерении скорости распространения фронта давления в трещине.

Формирование трещин. Изучение самовосстанавливающихся материалов невозможно без подходов по созданию контролируемых условий в лаборатории. Возможность воспроизводимо создавать трещины в цементном камне в лабораторных условиях является основой для объективной и количественной оценки свойств самовосстанавливающегося цемента.

Без подобных процедур невозможно охарактеризовать ключевые параметры процесса самовосстановления, такие как скорость, степень и предел восстановления, а также невозможно провести сравнительный анализ различных самовосстанавливающихся систем. Среди описанных в литературе подходов к созданию трещин в цементном камне хотелось бы выделить следующие работы:

– Создание трещины в цилиндрическом образце с помощью бразильского теста [31]. Также встречаются модификации процедуры, когда устанавливаются микрометры для контроля ширины растущей трещины.

– Создание трещины в прямоугольном образце цементного камня путем нагружения по трехточечному или четырехточечному методам [31].

– Создание сетки трещин путем последовательной заморозки и разморозки образца цементного камня [59].

– Создание трещины путем нагружения цементного камня в специально сконструированном приборе [14].

– Создание модели трещины путем использования прокладок заданной толщины между плоскопараллельными поверхностями двух цементных камней [60].

– Создание модели трещины путем использования прокладок заданной толщины между параллельными поверхностями металла и цементного камня [61].

– Создание проницаемой плотной упаковки цементной крошки [62].

– Формирование трещины с помощью инородного тела или шаблона в цементном растворе [63, 64].

– Создание контролируемого зазора на границе «металл – цементный камень»

в специально сконструированной ячейке [65, 66].

– Создание трещин путем одноосного нагружения цементного камня [67].

– Формирование трещины путем гидравлического разрыва цементного камня [68, 69].

– Создание трещины нагружением цементного камня в местах распилов [70, 71].

– Формирование трещин путем ударного воздействия на образец.

– Формирование трещин методом термического стресса.

При всем многообразии методов создания трещин не все они подходят для массового проведения экспериментов, что будет обсуждено ниже.

Измерение гидравлической проницаемости. Задача исследования процесса самовосстановления цементного камня требует наличия количественных методов измерения размеров трещины. В арсенале ученых есть большое количество методов как для прямого измерения ширины трещины, так и для косвенной оценки размеров трещины.

Приведем описание основных методов, используемых различными научными группами для целей измерения и оценки геометрических размеров трещин:

– Методы, основанные на создании перепада давления и измерении скорости потока жидкости. Очень популярны из-за своей простоты и возможности вычисления размеров трещины в реальном времени. При использовании данных методов могут сильно различаться типы геометрии образца и ячейки: цилиндрический, кольцевой (модель заколонного пространства), прямоугольный и т. д. [66, 72, 73].

– Методы, основанные на измерении скорости потока газа [74–76]. Являются разновидностью первой группы, однако выделены из-за повышенных требований к чувствительности приборов. Один из самых простых способов – адаптация Formation Response Tester (FRT) ячейки [44, 77, 78].

– Методы нейтронной или рентгеновской томографии [70].

– Измерение прохождения фронта изменения давления через образец [59]. На концах образца создается перепад давления и осуществляется запись прохождения фронта давления через образец.

– Метод измерения увеличения объема цементного камня [43, 79]. Является косвенным, но отличается простотой и удобен для получения оценочных данных.

– Измерение механической прочности образцов [67], что является косвенным методом.

– Оптические методы [45, 78].

– Методы исследования долговременной геометрической стабильности образца цементного камня при выдерживании в жидкости формации [43, 44, 74].

Особенности нефтегазового сектора

Детальный анализ литературных данных выявил значительные специфику применимости самовосстанавливающихся цементных систем для нефтегазового сектора, которая будет рассмотрена в данном разделе статьи. Одна из основных задач цементного кольца в скважине – это предотвращение миграции пластовых флюидов между различными коллекторами

или между коллекторами и устьем скважины. По этой причине самовосстановление исходной проницаемости цементного камня даже без полного восстановления механических свойств является приемлемым результатом. Использование самовосстанавливающихся цементных систем в нефтегазовой отрасли чаще всего продиктовано предотвращением появления межколонного давления (МКД). МКД является серьезной проблемой при эксплуатации скважин как в мировой практике, так и в России [80]. В настоящее время существует множество методов борьбы с МКД, которые можно разделить на две большие категории [80].

Первая категория – это методы, направленные на недопущение МКД, т. е. проведение крепления скважины способами, которые позволяют снизить риски его образования. К этой категории относятся следующие группы методов:

– обеспечение максимально качественного вытеснения бурового раствора из скважины для возможности его замещения на цементный раствор,

– предотвращение прорыва газа в процессе критической гидратации цемента,

– использование цементных систем, устойчивых к нагрузкам, которым подвергается скважина в процессе строительства и эксплуатации.

Вторая категория – это методы восстановления цементной крепи за обсадной колонной, рассматриваемые в данной статье, к которым относятся:

– ремонтно-изоляционные работы,

– самовосстанавливающиеся цементные системы.

В большинстве случаев следование методам из первой категории позволяет избежать формирования МКД, однако следует учитывать влияние сложных геологических условий, особенности скважины и ее эксплуатации для выявления скважин с повышенным риском формирования МКД. В подобных случаях необходимо закладывать возможность применения методов восстановления цементной крепи из второй группы, т. е. использовать цементы, способные компенсировать потерю физико-механических свойств без внешнего вмешательства, либо с минимальным вмешательством. Примером минимального вмешательства является проведение циклов стравливания межколонного давления. Преимущественно механизм самовосстановления свойств цементного кольца основан на поглощении жидкости функциональной добавкой [81].

Учитывая специфику нефтегазового сектора и расположение цементной крепи глубоко под землей, можно утверждать, что для нефтегазового сектора актуальны самовосстанавливающиеся системы с активацией пластовыми жидкостями, в число которых входят солевые растворы, углеводороды или углекислый газ – в случае скважин для захоронения CO_2 . В литературе описано довольно много случаев положительного использования самовосстанавливающегося цемента против МКД [81–83], включая обзор [84]. Также в нефтяной индустрии проводилась разработка и апробация самовосстанавливающегося цемента под действием углекислого газа [85].

К другим важным особенностям нефтегазового сектора можно отнести высокую температуру и давление, циклические нагрузки, постоянный поток жидкости через трещину, возможный

избыток жидкости, и дополнительные требования к тестированию цементных систем, которые накладывают значительный отпечаток при моделировании процессов в лаборатории. Для демонстрации разнообразия и сложности условий, с которыми сталкивается нефтегазовый сектор, стоит упомянуть очень широкие интервалы различных параметров, которые необходимо иметь в виду при подборе состава самовосстанавливающегося цемента. Например, при выборе механизма и материалов для самовосстановления следует учитывать, что температура по разрезу может варьироваться в интервале от -5 до 120 °С (и более), при этом циркуляционная температура может меняться от 20 до 110 °С, а температура на поверхности – от -40 до 50 °С, давление может варьироваться от 10 до 50 МПа, соленость водной фазы в формации может достигать величины 450 г/л, плотность цементного раствора может задаваться в интервале от 1100 кг/м³ для скважин с низким давлением гидроразрыва пласта, до 2500 кг/м³ в случае скважин с аномально высоким пластовым давлением, время загустевания цементного раствора подбирается в интервале от нескольких до более десятка часов, плотность нефти варьируется от 700 до 1000 кг/м³, возможно наличие до 24 % сероводорода, до 6 % CO_2 , и т. д. [86, 87].

Как было указано выше, требования к самовосстановлению свойств цементного кольца в нефтегазовом секторе подразумевают минимальный уровень вмешательства в процесс самовосстановления. По этому критерию следует исключить из категории самовосстанавливающихся методы, основанные на дополнительной закачке веществ и материалов.

Подобные методы стоит рассматривать в контексте стандартных ремонтно-изоляционных работ. Например, процесс закачивания питательной среды в скважину для микробиологического восстановления цементного камня технически не будет сильно отличаться от процесса закачивания микроцемента в зону микротрещин. Более того, данная операция будет сопровождаться похожими задачами по локации зоны микротрещин, перфорированию данной зоны для доступа питательных веществ к целевой зоне, включая все риски по неопределенности детектирования микротрещин в толще цементного камня [80].

Как уже было упомянуто ранее, микробиологические методы также сопряжены с дополнительными рисками, обусловленными агрессивными условиями коллекторов, такими как высокие температуры и давления, щелочная или кислотная среда, присутствие углеводородов, а также добавление бактерицидов во многие технологические жидкости. Выживаемость бактерий или их спор в течение многих десятков лет должна быть тщательно изучена и протестирована и несет на данный момент большие риски [55].

Подходы, относящиеся к необратимым процессам самовосстановления, выглядят очень привлекательно с операционной точки зрения, а также характеризуются хорошей совместимостью с текущими технологическими процессами формирования цементного кольца в скважине. В то же самое время основные риски подходов, относящихся к необратимым процессам самовосстановления, связаны

с низкой скоростью процесса самовосстановления, а также ограниченной эффективностью при формировании крупных трещин. Для процессов выбора практического решения и поиска лабораторных методов проверки также стоит учитывать, что образование трещин в цементном кольце часто сопровождается формированием непрерывного течения жидкости сквозь трещину [80]. В таком случае следует рассмотреть и оценить процесс переноса продуктов реакции из зоны трещин и риски высаживания продуктов реакции в местах, удаленных от зоны трещин.

Из рассмотренных ранее процессов самовосстановления наиболее часто в научной литературе встречается использование добавок на основе сверхпоглощающих полимеров [37, 38]. Способность таких материалов поглощать огромные объемы водной фазы подразумевает очень высокую эффективность самозалечивания и объясняет привлекательность таких материалов. Разнообразие различных классов и типов сверхпоглощающих полимеров на рынке обеспечивает широкие возможности по контролю за процессом поглощения жидкости и способы контроля эффективности добавки. Данные подходы подразумевают возможность инженерного управления свойствами самовосстанавливающихся материалов. Однако остается актуальным вопрос преждевременной активации сверхпоглощающих полимеров и риски потенциального снижения эксплуатационных характеристик цементного камня, таких как прочность, долговечность и проницаемость.

Для решения задач преждевременного взаимодействия сверхпоглощающих полимеров или минеральных добавок с водной средой цементного раствора очень перспективно выглядит использование инкапсуляции. Инкапсулированные системы позволяют в широком диапазоне контролировать время и место активации функциональной добавки, отвечающей за процесс самовосстановления. Однако сложность синтеза инкапсулирующих оболочек в промышленных масштабах и высокая стоимость технологий ограничивают их текущее широкое применение [35, 36].

Из всего многообразия лабораторных методов создания трещин предпочтение стоит отдать вариантам, которые позволяют создать контролируемую трещину или обеспечить воспроизводимые результаты эксперимента. При этом стоит учитывать, что типичные размеры трещин в цементном камне измеряются десятками микрон [88], и создание контролируемых трещин такого малого размера представляет из себя серьезную техническую задачу. Следует учитывать, что даже при формировании трещины необходимого размера, последующие операции с образцом могут вызвать изменение раскрытия трещины, таким образом влияя на результаты эксперимента, что может приводить, как к ложноположительным, так и к ложноотрицательным результатам.

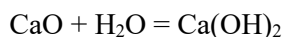
Одним из способов решения данного вопроса является возможность нормирования результатов эксперимента на начальную проводимость, и изучения самовосстановления свойств цементного камня путем анализа кинетики процесса. Данный способ дает гибкость для внедрения методик и процедур по изучению самовосстановления в различных лабораториях и накладывает

меньшие требования на аппаратную базу по сравнению с измерением и сравнением абсолютных величин в процессе самовосстановления цементного камня. Для формирования трещин малой ширины в лабораторных условиях вполне возможно использование бразильского теста и нормирование данных по проницаемости данного образца [31].

Для трещин большего размера перспективным направлением может быть использование прокладок фиксированной толщины для создания модели трещин. При данном подходе очень важно в качестве прокладок использовать инертные материалы с известным изменением свойств при нагревании для контроля толщины и однородности трещины. Например, не рекомендуется использовать материалы, претерпевающие фазовые превращения, или же материалы, способные к неконтролируемым пластическим деформациям при повышенных давлениях и температуре, а также материалы, способные взаимодействовать с цементным камнем или жидкостями. Также следует проводить эксперимент сравнения для оценки величины вдавливания прокладки в цементный камень, что ожидается при использовании прокладок из материала с повышенной механической прочностью [60, 61].

Следует внимательно отнестись к подготовке и анализу экспериментов с использованием широких трещин миллиметрового размера, встречающихся в литературе, например, в работе [41]. Данные подходы крайне интересны с точки зрения обнаружения границ применимости самовосстанавливающихся материалов и могут быть обоснованы с учетом содержания активной добавки, стехиометрии взаимодействия и закона сохранения массы.

Одной из самых часто встречающихся в литературе добавок, способствующих самовосстановлению цементного камня и бетонов, является оксид кальция и, в частности, его реакция с водой [89]:



Данная химическая реакция обладает одним из самых больших коэффициентов увеличения объема среди различных минеральных добавок. Так, из одного объема оксида кальция получается два объема продуктов реакции, т. е. объем удваивается в результате реакции [90]. Отсюда следует, что для полного закрытия трещины объемом $\phi_{\text{т}}$ образец должен содержать как минимум такой же объем минеральной добавки на основе оксида кальция $\phi_{\text{д}}$ (см. рис. 1б) для полного заполнения трещины. Если применить данные расчеты для образца цемента диаметром 25 мм и содержащим трещину шириной 1 мм, то получится, что соотношение объема трещины и объема цемента будет равно соотношению $\phi_{\text{т}}/(1 - \phi_{\text{т}})$, что, в свою очередь даст выражение:

$$\phi_{\text{т}}/\phi_{\text{ц}} = 4w/\pi(D - w) \quad (2)$$

где w – ширина трещины, мм;

D – диаметр образца, мм;

π – число Пи.

Подставив $w = 1$ мм, $D = 25$ мм в формулу (2), получим соотношение, равное 1/18,84. Это означает, что для полного заполнения объема трещины продуктами реакции 18,84 объема цемента должны увеличить свой объем на 1, что соответствует увеличению объема на 5,3 % и, как следует

из соотношения (1), приводит к содержанию оксида кальция как минимум в 5,3 об%.

В некоторых работах было продемонстрировано, что существуют добавки, например, на основе сверхпоглощающих полимеров, способные увеличивать свой объем в десятки раз, что представляет интерес для самовосстановления трещин больших размеров [31].

Для целей измерения размеров трещины и соответствующей гидравлической проводимости в нефтегазовой индустрии наиболее перспективными выглядят методы, основанные на измерении потока или перепада давления через образец. Данные методы обладают повышенной чувствительностью, просты в исполнении и характеризуются хорошей воспроизводимостью и повторяемостью. При необходимости, данные методы измерений могут быть откалиброваны прямыми измерениями физического размера трещины, такими как, компьютерная рентгеновская томография [70].

Заключение

Был проведен детальный анализ существующих работ по самовосстановливающимся свойствам цементного камня. На основе проведенного анализа использована классификация самовосстановливающих цементных систем, учитывающая природу процесса самовосстановления. Данная классификация позволяет легко анализировать категории самовосстановливающих цементных камней на базе их преимуществ или недостатков, а также отражает специфику процесса самовосстановления в нефтегазовой индустрии.

Анализ литературы показал, что требования к самовосстановлению цементного камня в нефтегазовой индустрии значительно отличаются от требований, используемых в строительной индустрии. В связи с этим рекомендуется тщательно изучить существующие индустриальные и академические достижения, но дополнительно проверять решения, разработанные для условий низких температур и давлений, отсутствию агрессивной среды, или же рассчитанных на свободный физический доступ к цементному камню.

Анализ существующих работ выявил необходимость разработки стандартизированных протоколов для лабораторного тестирования процесса самовосстановления с четкими критериями оценки и количественными показателями эффективности. Это позволит обеспечить возможность сравнивать результаты разных исследований, проводить поиск оптимальных технологий для конкретных условий и ускорить внедрение технологий в промышленную практику.

Вклад авторов

А.В. Медведев – концептуализация, администрирование данных, формальный анализ, методология, создание черновика рукописи, создание рукописи и ее редактирование.

П.О. Колчанов – получение финансирования, создание черновика рукописи.

Все авторы утвердили окончательную версию статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список источников

1. *Jackson M.D., Landis E.N., Brune P.F., et al. Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol. 111, No. 52. P. 18484–18489. <https://doi.org/10.1073/pnas.1417456111>*
2. *Seymour L.M., Maragh J., Sabatini P., et al. Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete // Science Advances. 2023. Vol. 9, No. 1. P. eadd1602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add1602>*

Также была показана необходимость поиска материалов и внедрение в производство цементного камня, способного к самовосстановлению в водной среде. Из основных задач, стоящих перед исследователями, стоит отметить контроль реологии, избежание преждевременного взаимодействия с активной средой, и контроль прочности цементного камня.

Было обнаружено отсутствие научных публикаций по цементным камням, способным к самовосстановлению как в водной, так и в масляной средах. Несомненно, данное направление требует детального исследования.

Одним из перспективных направлений исследования видится совершенствование и удешевление методов инкапсуляции, что должно привести к практическому внедрению широкого спектра добавок для самовосстанавливающихся цементных систем.

Анализ литературных данных показал, что перспективным является развитие направления функциональных добавок, обладающих большим коэффициентом увеличения объема.

3. *Dry C., McMillan W.* Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete // *Smart Materials and Structures*. 1996. Vol. 5, No. 3. P. 297. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/5/3/007>
4. *Dry C.M.* Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability // *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30, No. 12. P. 1969–1977. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00415-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00415-4)
5. *Cohades A., Branfoot C., Rae S., et al.* Progress in self-healing fiber-reinforced polymer composites // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. Vol. 5, No. 17. P. 1800177. <https://doi.org/10.1002/admi.201800177>
6. *Wu M., Johannesson B., Geiker M.* A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28, No. 1. P. 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086>
7. *Zhang W., Zheng Q., Ashour A., Han B.* Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review // *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 189. P. 107892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>
8. *Nguen M.-T., Fernandez C.A., Haider M.M., et al.* Toward self-healing concrete infrastructure: Review of experiments and simulations across scales // *Chemical Reviews*. 2023. Vol. 123. P. 10838–10876. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00709>
9. *Van Tittelboom K., De Belie N.* Self-healing in cementitious materials – A review // *Materials*. 2013. Vol. 6, No. 6. P. 2182–2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
10. *Kordas G.* Self-healing cement: A review // *Nanomanufacturing*. 2023. Vol. 3, No. 3. P. 326–346. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing3030021>
11. *Adhikary S.K., Rathod N., Adhikary S.D., et al.* Chemical-based self-healing concrete: a review // *Discover Civil Engineering*. 2024. Vol. 1. P. 119. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00130-7>
12. *Bekas D.G., Tsirka K., Baltzis D., Paipetis A.S.* Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 87. P. 92–119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.057>
13. *Cao K., Liu D., Kong K.H., et al.* Sustainable self-healing concrete using industrial by-products: A multi-objective optimization strategy minimizing resource and experimental consumption // *Journal of Cleaner Production*. 2026. Vol. 546. P. 147793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147793>
14. *Lee H.X.D., Wong H.S., Buenfeld N.R.* Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers // *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 79. P. 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.008>
15. *Zhang Y., Tao B., Lai L.* Influence of high water pressure on the autogenous healing performance of concrete in marine environments // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 487. P. 142003. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142003>
16. *Holmes N., Tyrer M., Kelliher D.* Thermodynamic modelling of harsh environments on the solid phase assemblage of hydrating cements using PHREEQC // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 135. <https://doi.org/10.3390/app13010135>
17. *Schlangen E., ter Heide N., van Breugel K.* Crack healing of early age cracks in concrete // *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties* / Ed. by M.S. Konsta-Gdoutos. Dordrecht: Springer, 2006. P. 273–284. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5104-3_32

18. *Abd Elmoaty A.M.* Self-healing of polymer modified concrete // Alexandria Engineering Journal. 2011. Vol. 50, No. 2. P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.03.002>
19. *Бакиров Д.Л., Бурдыга В.А., Ковалев В.Н.* Предупреждение возникновения водоперетоков применением самовосстанавливающихся составов для крепления скважин // Нефтяное хозяйство. 2016. № 8. С. 36–39. EDN: WICATD
20. *Mao W., Litina C., Al-Tabbaa A.A.* Development and application of novel sodium silicate microcapsule-based self-healing oil well cement // Materials. 2020. Vol. 13, No. 2. P. 456. <https://doi.org/10.3390/ma13020456>
21. *Hammad N., Elnemr A., Shaaban I.G.* State-of-the-art report: The self-healing capability of alkali-activated slag (AAS) concrete // Materials. 2023. Vol. 16, No. 12. P. 4394. <https://doi.org/10.3390/ma16124394>
22. *Lima G.T.d.S., Silvestro L., Tambara Júnior L.U.D., et al.* Autonomous self-healing agents in cementitious materials: Parameters and impacts on mortar properties // Buildings. 2024. Vol. 14, No. 7. P. 2000. <https://doi.org/10.3390/buildings14072000>
23. *Rosewitz J.A., Wang S., Scarlata S.F., Rahbar N.* An enzymatic self-healing cementitious material // Applied Materials Today. 2021. Vol. 23. P. 101035. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101035>
24. *Sakai Y., Kitagawa Y., Fukuta T., Iiba M.* Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2003. Vol. 5057. P. 178–186. <https://doi.org/10.1117/12.482680>
25. *Kuang Y.C., Ou J.P.* Passive smart self-repairing concrete beams by using shape memory alloy wires and fibers containing adhesives // Journal of Central South University of Technology. 2008. Vol. 15, No. 3. P. 411–417. <https://doi.org/10.1007/s11771-008-0077-9>
26. *Jefferson A., Joseph C., Lark R., et al.* A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymers // Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40, No. 5. P. 795–801. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.004>
27. *Dry C.* Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices // Smart Materials and Structures. 1994. Vol. 3, No. 2. P. 118. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/3/2/006>
28. *Thao T.D.P., Johnson T.J.S., Tong Q.S., Dai P.S.* Implementation of self-healing in concrete – Proof of concept // The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 116–125. <https://doi.org/10.1080/19373260902843506>
29. *Yang Z., Hollar J., He X., Shi X.* Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2010. Vol. 2142, No. 1. P. 9–17. <https://doi.org/10.3141/2142-02>
30. *Ohama Y., Demura K., Endo T.* Properties of polymer-modified mortars using epoxy resin without hardener // Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures / Ed. by L.A. Kuhlmann, D.G. Walters. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1993. P. 90–103. <https://doi.org/10.1520/STP25548S>
31. *Snoeck D., Tittelboom K.V., Steuperaert S., et al.* Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2012. Vol. 25, No. 1. P. 13–24. <https://doi.org/10.1177/1045389X12438623>

32. *Jensen O.M., Hansen P.F.* Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background // *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31, No. 4. P. 647–654. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00463-X)
33. *Wang C., Bu Y., Guo S., et al.* Self-healing cement composite: Amine- and ammonium-based pH-sensitive superabsorbent polymers // *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 96. P. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.023>
34. *Richhariya G., Dora D.T.K., Parmar K.R., et al.* Development of self-healing cement slurry through the incorporation of dual-encapsulated polyacrylamide for the prevention of water ingress in oil well // *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 13. P. 2921. <https://doi.org/10.3390/ma13132921>
35. *Xin H., Yang K., Zhang M., et al.* Exploratory research on water-channeling self-healing agent for cementing // *The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, Virtual*, 11–16 October 2020. Mountain View, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2020. P. 3115–3119. EDN: LOOOQN
36. *Bu Y., Liu A.H.* Self-plugging technology of microcrack with water in cement sheath // *The Offshore Technology Conference Asia, Kuala Lumpur, Malaysia, 20–25 March 2016*. Paper OTC-26367-MS. <https://doi.org/10.4043/26367-MS>
37. *Аззамов Ф.А., Исмагилова Э.Р., Бешир М.А.* Разработка залечивающих добавок для восстановления цементной крепи скважин // *Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана*. 2022. Т. 4, № 3. С. 69–75. (На англ. яз.). <https://doi.org/10.54859/kjogi108564>
38. *Liu H., Bu Y., Sanjayan J.G., et al.* The application of coated superabsorbent polymer in well cement for plugging the microcrack // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 104. P. 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.058>
39. *Zhao L., Li N., Yang J., et al.* Alkali-resistant and pH-sensitive water absorbent self-healing materials suitable for oil well cement // *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 20. P. 7630. <https://doi.org/10.3390/en15207630>
40. *Mignon A., Snoeck D., Dubruel P., et al.* Crack mitigation in concrete: Superabsorbent polymers as key to success? // *Materials*. 2017. Vol. 10, No. 3. P. 237. <https://doi.org/10.3390/ma10030237>
41. *Feng J., Yap X.Y., Gao J., et al.* Rapid self-sealing of macro cracks of cementitious composites by in-situ alginate crosslinking // *Cement and Concrete Research*. 2023. Vol. 165. P. 107074. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107074>
42. *Lu Z., Kong X., Yang R., et al.* Oil swellable polymer modified cement paste: Expansion and crack healing upon oil absorption // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 114. P. 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.163>
43. *Cavanagh P., Johnson C.R., LeRoy-Delage S., et al.* Self-healing cement – Novel technology to achieve leak-free wells // *SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, 20–22 February 2007*. Paper SPE-105781-MS. <https://doi.org/10.2118/105781-MS>
44. *Sozonov A.S., Sukhachev V.Yu., Olennikova O.V., et al.* First implementation of self-healing cement systems in H₂S/CO₂ aggressive environment across pay-zone // *SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual*, 26–29 October 2020. Paper SPE-201842-MS. <https://doi.org/10.2118/201842-MS>

45. *Daou F., Engelke B.S., de Miranda C.R., et al.* CO₂-resistant and self-healing cement: Prior art and new concept validation // International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 10–12 December 2014. Paper IPTC-18019-MS. <https://doi.org/10.2523/IPTC-18019-MS>
46. *Daniel W.B., Radonjic A.M.* Nature's solution to wellbore gas-leakage: Gilsonite // 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, New York, USA, 23–26 June 2019. Paper ARMA-2019-1544.
47. *Qi Y., Yang Z., Yang X., et al.* Self-repair of cement paste with gas-sensitive graft polymer // SPE Journal. 2024. Vol. 29, No. 1. P. 118–125. <https://doi.org/10.2118/217464-PA>
48. *Shokry A., Mahmoud A.A., Elkhatny A.S.* Review of remedial cementing: Techniques, innovations, and practical insights // GOTECH, Dubai, UAE, 7–9 May 2024. Paper SPE-219250-MS. <https://doi.org/10.2118/219250-MS>
49. *Ali W., Al-Turki F.A., Abbas A., et al.* Resin systems as evolving solution within the industry to replace the conventional remedial cementing while eliminating the sustained casing pressure SCP // International Petroleum Technology Conference, Riyadh, Saudi Arabia, 21–23 February 2022. Paper IPTC-21953-EA. <https://doi.org/10.2523/IPTC-21953-EA>
50. *De Muynck W., Cox K., De Belie N., Verstraete W.* Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 22, No. 5. P. 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011>
51. *Métayer-Levrel G.L., Castanier S., Oriol G., et al.* Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony // Sedimentary Geology. 1999. Vol. 126, No. 1–4. P. 25–34. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00029-9)
52. *Achal V., Mukherjee A., Basu P.C., Reddy M.S.* Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii* // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2009. Vol. 36, No. 3. P. 433–438. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0514-7>
53. *Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal S.* Use of microorganism to improve the strength of cement mortar // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35, No. 10. P. 1980–1983. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.005>
54. *Javeed Y., Goh Y., Mo K.H., et al.* Microbial self-healing in concrete: A comprehensive exploration of bacterial viability, implementation techniques, and mechanical properties // Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 29. P. 2376–2395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.261>
55. *Elgendy I.M., Elkaliny N.E., Saleh H.M., et al.* Bacteria-powered self-healing concrete: Breakthroughs, challenges, and future prospects // Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2024. Vol. 52. P. kuae051. <https://doi.org/10.1093/jimb/kuae051>
56. *Noshi C.I., Schubert A.J.J.* A novel microbially induced self-healing cement/concrete for underwater concrete offshore structures // SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, Hague, Netherlands, 5–7 March 2019. Paper SPE-194173-MS. <https://doi.org/10.2118/194173-MS>
57. *Noshi C.I., Schubert A.J.J.* Self-healing biocement and its potential applications in cementing and sand-consolidation jobs: A review targeted at the oil and gas industry // SPE Liquids-Rich Basins Conference – North America, Midland, Texas, USA, 5–6 September 2018. Paper SPE-191778-MS. <https://doi.org/10.2118/191778-MS>

58. *Li L., Liu T., Jiang G., et al.* Microbiological mineralization for self-healing cement sheath in oil and gas wells: A study on the integrity and sealing mechanisms of interface cracks // *Case Studies in Construction Materials*. 2025. Vol. 22. P. e04546. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04546>
59. *Ross J.H., Genedy M., Juenger M.C.G., Oort E.V.* Permeability recovery by self-healing of class F fly ash-based geopolymers // *Cement*. 2022. Vol. 10. P. 100048. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100048>
60. *Reddy B.R., Liang F., Fitzgerald A.R.* Self-healing cements that heal without dependence on fluid contact // *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, The Woodlands, Texas, USA, 20–22 April 2009*. Paper SPE-121555-MS. <https://doi.org/10.2118/121555-MS>
61. *Darbe R., Pewitt K., Karcher A.J.* Dynamic test evaluates the effectiveness of self-healing cement systems in the downhole environment // *Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition, Manama, Bahrain, 26–28 October 2009*. <https://doi.org/10.2118/125904-MS>
62. *Van Noort R.* Long-term integrity of well cements for CO₂-storage through self-healing capabilities – test development // *SPE EuropEC – Europe Energy Conference featured at the 84th EAGE Annual Conference & Exhibition, Vienna, Austria, 5–8 June 2023*. Paper SPE-214391-MS. <https://doi.org/10.2118/214391-MS>
63. *Kolchanov P., Perroni D., Medvedev A., et al.* Effective zonal isolation in horizontal wells: Mitigating negative impact of mud channels // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, 24–26 September 2018*. Paper SPE-191561-MS. <https://doi.org/10.2118/191561-MS>
64. *Денисов И.В., Губжоков В.Б.* Отечественная эластичная самовосстанавливающаяся цементная система как метод предупреждения и борьбы с межколонным давлением и межпластовыми перетоками // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. 2023. Т. 8, № 2(28). С. 40–49. EDN: TYBFWO
65. *Boukhelifa L., Moroni N., James S.G., et al.* Evaluation of cement systems for oil and gas-well zonal isolation in a full-scale annular geometry // *SPE Drilling & Completions*. 2005. Vol. 20, No. 1. P. 44–53. <https://doi.org/10.2118/87195-PA>
66. *Phyoe T., Bermea J.V., Jain B., et al.* Achieving zonal isolation in critical high-temperature/high-pressure well through modeling and use of advanced isolation materials // *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Nusa Dua, Bali, Indonesia, 20–22 October 2015*. Paper SPE-176116-MS. <https://doi.org/10.2118/176116-MS>
67. *Liu X., Ramos M.J., Nair S.D., et al.* True self-healing geopolymer cements for improved zonal isolation and well abandonment // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Hague, Netherlands, 14–16 March 2017*. Paper SPE-184675-MS. <https://doi.org/10.2118/184675-MS>
68. *Al-Khayyat B., Al-Mudhaf M., Saffar A.H., et al.* Improving zonal isolation and cutting the water production with the help of an engineered self-healing cementing system: A case study review of the first implementation of its kind in Kuwait // *SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show, Muscat, Oman, 21–23 March 2022*. Paper SPE-200299-MS. <https://doi.org/10.2118/200299-MS>
69. *Brandl A., Alegria A.E., Ismail M., et al.* First implementation of a resilient and self-sealing cementing system to optimise long-term zonal isolation in challenging offshore wells – Review of 3 case histories in Malaysia // *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, Singapore, 22–24 August 2016*. Paper SPE-180656-MS. <https://doi.org/10.2118/180656-MS>

70. *Fan S., Li M.* X-ray computed microtomography of three-dimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites // *Smart Materials and Structures*. 2015. Vol. 24, No. 1. P. 015021. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/1/015021>

71. *Browning R., Duffy M., Gaugler D., Jones A.P.* Effectiveness of self-healing cement additives based on test methodology using simulated cement sheath cracks // *SPE Eastern Regional Meeting*, Lexington, Kentucky, USA, 3–5 October 2012. Paper SPE-161028-MS. <https://doi.org/10.2118/161028-MS>

72. *Khattak M.A., Jain B., Kalbani S.A., et al.* Use of novel self-healing materials to control sustained casing pressure and prevent long term environmental impact // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, 28–30 September 2015. Paper SPE-174892-MS. <https://doi.org/10.2118/174892-MS>

73. *Dieguez E.S., Bottiglieri A., Vorderbruggen M., Saeed A.Y.* Self-sealing isn't just for cracks: Recent advance in sour well protection // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dubai, UAE, 26–28 September 2016. Paper SPE-181619-MS. <https://doi.org/10.2118/181619-MS>

74. *Moroni N., Panciera N., Zanchi A., et al.* Overcoming the weak link in cemented hydraulic isolation // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Anaheim, California, USA, 11–14 November 2007. Paper SPE-110523-MS. <https://doi.org/10.2118/110523-MS>

75. *Roth J., Reeves C., Johnson C.R., et al.* Innovative hydraulic isolation material preserves well integrity // *IADC/SPE Drilling Conference*, Orlando, Florida, USA, 4–6 March 2008. Paper SPE-112715-MS. <https://doi.org/10.2118/112715-MS>

76. *Roy-Delage S., Le C.A., Garnier A., et al.* Self-healing cement system – A step forward in reducing long-term environmental impact // *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, USA, 2–4 February 2010. Paper SPE-128226-MS. <https://doi.org/10.2118/128226-MS>

77. *Bermea J.A.V., Taoutaou S., Olutimehin K., et al.* A case study of flexible/expandable and self-healing cement for ensuring zonal isolation in a shallow, hydraulically fractured gas well, onshore Thailand // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, London, England, UK, 17–19 March 2015. Paper SPE-173065-MS. <https://doi.org/10.2118/173065-MS>

78. *Engelke B., de Miranda C.R., Daou F., et al.* CO₂ self-healing and resistant cement technology from laboratory to the field // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, Hague, Netherlands, 14–16 March 2017. Paper SPE-184641-MS. <https://doi.org/10.2118/184641-MS>

79. *Al-Yami A.S., Alqam M.H., Riefky A., Shafqat A.U.* Self healing durable cement; development, lab testing, and field execution // *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, UAE, 29–31 January 2018. Paper SPE-189397-MS. <https://doi.org/10.2118/189397-MS>

80. *Демин Е.В., Хуснутдинов А.Р., Соловьев П.С.* Работа с фондом скважин, осложненных межколонными давлениями: эволюция нормативного регулирования и подходы нефтегазодобывающих компаний // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. 2022. Т. 7, № 2(24). С. 60–75. EDN: BVZKLX

81. *Xie Y., Tiong M., Liu Q., et al.* Recent advancements in durable and self-healing oil well cement: A pathway to secure carbon sequestration // *Journal of CO₂ Utilization*. 2025. Vol. 92. P. 103036. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103036>

82. *Nafikova S., Bugrayev A., Taoutaou S., et al.* Elimination of the sustained casing pressure using self-healing cement in Turkmenistan section of the Caspian Sea // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada, 30 September – 2 October 2019. Paper SPE-195945-MS. <https://doi.org/10.2118/195945-MS>

83. *Johnson C., Gai A., Ioan T., et al.* Self-healing cement for long-term safe exploitation of gas wells: A new technology case study // International Petroleum Technology Conference, Beijing, China, 26–28 March 2019. Paper IPTC-19399-MS. <https://doi.org/10.2523/IPTC-19399-MS>

84. *Shadravan A., Amani A.M.* A decade of self-sealing cement technology application to ensure long-term well integrity // SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference, Mishref, Kuwait, 11–14 October 2015. Paper SPE-175237-MS. <https://doi.org/10.2118/175237-MS>

85. *Azwar C., Kusumawatie R., Osman A., et al.* First application of a novel self-healing and CO₂-resistant cement on a deepwater cementing operation // Gas & Oil Technology Showcase and Conference, Dubai, UAE, 13–15 March 2023. Paper SPE-214110-MS. <https://doi.org/10.2118/214110-MS>

86. *Сажин В.В., Селдинас И., Сажин В.Б.* Трудноизвлекаемые запасы «тяжелой нефти» России // Успехи в химии и химической технологии. 2008. Т. 22, № 12(92). С. 56–68. EDN: QZVLJH

87. *Чистякова Н.Ф., Драванте В.В., Сивцев А.И.* Особенности ионно-солевого состава подземных вод венд-нижнекембрийских отложений Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения на стадии катагенеза // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020. Т. 15, № 3. С. 1. https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2020

88. *Moghadam A., Castelein K., ter Heege J., Orlic B.* A study on the hydraulic aperture of microannuli at the casing–cement interface using a large-scale laboratory setup // Geomechanics for Energy and the Environment. 2022. Vol. 29. P. 100269. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100269>

89. *Giordano F.G., Etcheverry J.M., Brunin M., et al.* Evaluating the self-healing capacity of lime and lime-based mortars: Effects of age, curing conditions, formulation and testing methods // Journal of Building Engineering. 2025. Vol. 111. P. 113234. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113234>

90. *Nagataki S., Gomi H.* Expansive admixtures (mainly ettringite) // Cement and Concrete Composites. 1998. Vol. 20, No. 2–3. P. 163–170. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(97\)00064-4](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(97)00064-4)

Информация об авторах

Анатолий Владимирович Медведев – канд. хим. наук, начальник отдела, ООО «Системы телекоммуникаций и информационной безопасности Шлюмберже», Москва, Россия; SPIN-код: 8945-9393, <https://orcid.org/0000-0002-0380-9708>; e-mail: amedvedev5@slb.ru

Петр Олегович Колчанов – руководитель группы, ООО «Системы телекоммуникаций и информационной безопасности Шлюмберже», Москва, Россия; SPIN-код: 2525-5980, <https://orcid.org/0009-0001-8443-8522>; e-mail: pkolchanov@slb.ru

Поступила в редакцию 21.01.2026

Принята к публикации 10.03.2026

ENVIRONMENTAL MONITORING AND INDUSTRIAL SECURITY OF OIL AND GAS FACILITIES

Review

Self-healing cementitious systems for oil and gas applications: Current state and development prospects

Anatoly V. Medvedev , Petr O. Kolchanov

Schlumberger Telecommunications and Information Security Systems LLC, 16A Leningradskoye Highway, Bldg. 3, Moscow, 125171, Russia

Abstract. This article presents a comprehensive review of modern approaches to developing self-healing cement systems with a focus on their application in the oil and gas industry. A novel classification of self-healing cement systems is used, based on the nature of the activating agent and reflecting the specifics of well operations. Special attention is given to healing mechanisms under oil and gas operational conditions, where key factors include zonal isolation and system self-recovery without additional operations. The paper also provides a detailed analysis of existing methods for fracture formation in laboratory conditions and reviews laboratory testing methods for self-healing processes. Self-healing cement systems were demonstrated to represent significant interest for the oil and gas industry, particularly when standardized testing protocols are developed and materials effective in aqueous and hydrocarbon environments are identified. Critical analysis revealed that many approaches to developing self-healing cement matrices have limited applicability in the oil and gas industry. A literature review was conducted to identify promising materials for self-healing cement systems, and a comparison of the effectiveness of active additives based on the mass conservation principle was performed.

Keywords: self-healing cement, well cementing, remedial operations, functional additive, activating agent, microfracture, zonal isolation

Funding: the work received no funding.

For citation: Medvedev A.V., Kolchanov P.O. Self-healing cementitious systems for oil and gas applications: Current state and development prospects. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2026. (In Russ.).

 Anatoly V. Medvedev, amedvedev5@slb.ru

© Medvedev A.V., Kolchanov P.O., 2026



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Author contributions

Anatoly V. Medvedev – conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, writing – original draft, writing – review & editing.

Petr O. Kolchanov – funding acquisition, writing – original draft.

All the authors approved the final version of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

References

1. Jackson M.D., Landis E.N., Brune P.F., et al. Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111, No. 52. P. 18484–18489. <https://doi.org/10.1073/pnas.1417456111>
2. Seymour L.M., Maragh J., Sabatini P., et al. Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Science Advances*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. eadd1602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add1602>
3. Dry C., McMillan W. Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete. *Smart Materials and Structures*. 1996. Vol. 5, No. 3. P. 297. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/5/3/007>
4. Dry C.M. Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30, No. 12. P. 1969–1977. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00415-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00415-4)
5. Cohades A., Branfoot C., Rae S., et al. Progress in self-healing fiber-reinforced polymer composites. *Advanced Materials Interfaces*. 2018. Vol. 5, No. 17. P. 1800177. <https://doi.org/10.1002/admi.201800177>
6. Wu M., Johannesson B., Geiker M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28, No. 1. P. 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086>
7. Zhang W., Zheng Q., Ashour A., Han B. Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 189. P. 107892. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>
8. Nguen M.-T., Fernandez C.A., Haider M.M., et al. Toward self-healing concrete infrastructure: Review of experiments and simulations across scales. *Chemical Reviews*. 2023. Vol. 123. P. 10838–10876. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00709>
9. Van Tittelboom K., De Belie N. Self-healing in cementitious materials – A review. *Materials*. 2013. Vol. 6, No. 6. P. 2182–2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>
10. Kordas G. Self-healing cement: A review. *Nanomanufacturing*. 2023. Vol. 3, No. 3. P. 326–346. <https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing3030021>
11. Adhikary S.K., Rathod N., Adhikary S.D., et al. Chemical-based self-healing concrete: a review. *Discover Civil Engineering*. 2024. Vol. 1. P. 119. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00130-7>

12. Bekas D.G., Tsirka K., Baltzis D., Paipetis A.S. Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 87. P. 92–119. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.057>
13. Cao K., Liu D., Kong K.H., et al. Sustainable self-healing concrete using industrial by-products: A multi-objective optimization strategy minimizing resource and experimental consumption. *Journal of Cleaner Production*. 2026. Vol. 546. P. 147793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147793>
14. Lee H.X.D., Wong H.S., Buenfeld N.R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Research*. 2016. Vol. 79. P. 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.008>
15. Zhang Y., Tao B., Lai L. Influence of high water pressure on the autogenous healing performance of concrete in marine environments. *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 487. P. 142003. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142003>
16. Holmes N., Tyrer M., Kelliher D. Thermodynamic modelling of harsh environments on the solid phase assemblage of hydrating cements using PHREEQC. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 135. <https://doi.org/10.3390/app13010135>
17. Schlangen E., ter Heide N., van Breugel K. Crack healing of early age cracks in concrete. In: Konsta-Gdoutos M.S., ed. *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*. Dordrecht: Springer, 2006. P. 273–284. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5104-3_32
18. Abd Elmoaty A.M. Self-healing of polymer modified concrete. *Alexandria Engineering Journal*. 2011. Vol. 50, No. 2. P. 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.03.002>
19. Bakirov D.L., Burdyga V.A., Kovalev V.N. Water cross flows appearance preventing with application of self-healing compositions for cementing. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2016. No. 8. P. 36–39. (In Russ.).
20. Mao W., Litina C., Al-Tabbaa A.A. Development and application of novel sodium silicate microcapsule-based self-healing oil well cement. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 2. P. 456. <https://doi.org/10.3390/ma13020456>
21. Hammad N., Elnemr A., Shaaban I.G. State-of-the-art report: The self-healing capability of alkali-activated slag (AAS) concrete. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 12. P. 4394. <https://doi.org/10.3390/ma16124394>
22. Lima G.T.d.S., Silvestro L., Tambara Júnior L.U.D., et al. Autonomous self-healing agents in cementitious materials: Parameters and impacts on mortar properties. *Buildings*. 2024. Vol. 14, No. 7. P. 2000. <https://doi.org/10.3390/buildings14072000>
23. Rosewitz J.A., Wang S., Scarlata S.F., Rahbar N. An enzymatic self-healing cementitious material. *Applied Materials Today*. 2021. Vol. 23. P. 101035. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101035>
24. Sakai Y., Kitagawa Y., Fukuta T., Iiba M. Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2003. Vol. 5057. P. 178–186. <https://doi.org/10.1117/12.482680>
25. Kuang Y.C., Ou J.P. Passive smart self-repairing concrete beams by using shape memory alloy wires and fibers containing adhesives. *Journal of Central South University of Technology*. 2008. Vol. 15, No. 3. P. 411–417. <https://doi.org/10.1007/s11771-008-0077-9>

26. Jefferson A., Joseph C., Lark R., et al. A new system for crack closure of cementitious materials using shrinkable polymers. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40, No. 5. P. 795–801. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.004>
27. Dry C. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Materials and Structures*. 1994. Vol. 3, No. 2. P. 118. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/3/2/006>
28. Thao T.D.P., Johnson T.J.S., Tong Q.S., Dai P.S. Implementation of self-healing in concrete – Proof of concept. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 116–125. <https://doi.org/10.1080/19373260902843506>
29. Yang Z., Hollar J., He X., Shi X. Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2010. Vol. 2142, No. 1. P. 9–17. <https://doi.org/10.3141/2142-02>
30. Ohama Y., Demura K., Endo T. Properties of polymer-modified mortars using epoxy resin without hardener. In: Kuhlmann L.A., Walters D.G., eds. *Polymer-Modified Hydraulic-Cement Mixtures*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 1993. P. 90–103. <https://doi.org/10.1520/STP25548S>
31. Snoeck D., Tittelboom K.V., Steuperaert S., et al. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibrils and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2012. Vol. 25, No. 1. P. 13–24. <https://doi.org/10.1177/1045389X12438623>
32. Jensen O.M., Hansen P.F. Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31, No. 4. P. 647–654. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00463-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00463-X)
33. Wang C., Bu Y., Guo S., et al. Self-healing cement composite: Amine- and ammonium-based pH-sensitive superabsorbent polymers. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 96. P. 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.023>
34. Richhariya G., Dora D.T.K., Parmar K.R., et al. Development of self-healing cement slurry through the incorporation of dual-encapsulated polyacrylamide for the prevention of water ingress in oil well. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 13. P. 2921. <https://doi.org/10.3390/ma13132921>
35. Xin H., Yang K., Zhang M., et al. Exploratory research on water-channeling self-healing agent for cementing. In: *The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Virtual, 11–16 October 2020. Mountain View, CA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2020. P. 3115–3119.
36. Bu Y., Liu A.H. Self-plugging technology of microcrack with water in cement sheath. In: *The Offshore Technology Conference Asia*, Kuala Lumpur, Malaysia, 20–25 March 2016. Paper OTC-26367-MS. <https://doi.org/10.4043/26367-MS>
37. Agzamov F.A., Ismagilova E.R., Beshir M.A. Elaboration of mending additives for the cement sheath repair. *Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry*. 2022. Vol. 4, No. 3. P. 69–75. <https://doi.org/10.54859/kjogi108564>
38. Liu H., Bu Y., Sanjayan J.G., et al. The application of coated superabsorbent polymer in well cement for plugging the microcrack. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 104. P. 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.058>

39. Zhao L., Li N., Yang J., et al. Alkali-resistant and pH-sensitive water absorbent self-healing materials suitable for oil well cement. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 20. P. 7630. <https://doi.org/10.3390/en15207630>
40. Mignon A., Snoeck D., Dubruel P., et al. Crack mitigation in concrete: Superabsorbent polymers as key to success? *Materials*. 2017. Vol. 10, No. 3. P. 237. <https://doi.org/10.3390/ma10030237>
41. Feng J., Yap X.Y., Gao J., et al. Rapid self-sealing of macro cracks of cementitious composites by in-situ alginate crosslinking. *Cement and Concrete Research*. 2023. Vol. 165. P. 107074. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107074>
42. Lu Z., Kong X., Yang R., et al. Oil swellable polymer modified cement paste: Expansion and crack healing upon oil absorption. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 114. P. 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.163>
43. Cavanagh P., Johnson C.R., LeRoy-Delage S., et al. Self-healing cement – Novel technology to achieve leak-free wells. In: *SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, Netherlands, 20–22 February 2007. Paper SPE-105781-MS. <https://doi.org/10.2118/105781-MS>
44. Sozonov A.S., Sukhachev V.Yu., Olennikova O.V., et al. First implementation of self-healing cement systems in H₂S/CO₂ aggressive environment across pay-zone. In: *SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Virtual, 26–29 October 2020. Paper SPE-201842-MS. <https://doi.org/10.2118/201842-MS>
45. Daou F., Engelke B.S., de Miranda C.R., et al. CO₂-resistant and self-healing cement: Prior art and new concept validation. In: *International Petroleum Technology Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 10–12 December 2014. Paper IPTC-18019-MS. <https://doi.org/10.2523/IPTC-18019-MS>
46. Daniel W.B., Radonjic A.M. Nature's solution to wellbore gas-leakage: Gilsonite. In: *53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, New York, USA, 23–26 June 2019. Paper ARMA-2019-1544.
47. Qi Y., Yang Z., Yang X., et al. Self-repair of cement paste with gas-sensitive graft polymer. *SPE Journal*. 2024. Vol. 29, No. 1. P. 118–125. <https://doi.org/10.2118/217464-PA>
48. Shokry A., Mahmoud A.A., Elkatatny A.S. Review of remedial cementing: Techniques, innovations, and practical insights. In: *GOTECH*, Dubai, UAE, 7–9 May 2024. Paper SPE-219250-MS. <https://doi.org/10.2118/219250-MS>
49. Ali W., Al-Turki F.A., Abbas A., et al. Resin systems as evolving solution within the industry to replace the conventional remedial cementing while eliminating the sustained casing pressure SCP. In: *International Petroleum Technology Conference*, Riyadh, Saudi Arabia, 21–23 February 2022. Paper IPTC-21953-EA. <https://doi.org/10.2523/IPTC-21953-EA>
50. De Muynck W., Cox K., De Belie N., Verstraete W. Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22, No. 5. P. 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.011>
51. Métayer-Levrel G.L., Castanier S., Oriol G., et al. Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sedimentary Geology*. 1999. Vol. 126, No. 1–4. P. 25–34. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00029-9)
52. Achal V., Mukherjee A., Basu P.C., Reddy M.S. Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii*. *Journal of Industrial*

Microbiology and Biotechnology. 2009. Vol. 36, No. 3. P. 433–438. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0514-7>

53. Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal S. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35, No. 10. P. 1980–1983. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.005>

54. Javeed Y., Goh Y., Mo K.H., et al. // Microbial self-healing in concrete: A comprehensive exploration of bacterial viability, implementation techniques, and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 29. P. 2376–2395. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.261>

55. Elgendy I.M., Elkaliny N.E., Saleh H.M., et al. Bacteria-powered self-healing concrete: Breakthroughs, challenges, and future prospects. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2024. Vol. 52. P. kuae051. <https://doi.org/10.1093/jimb/kuae051>

56. Noshi C.I., Schubert A.J.J. A novel microbially induced self-healing cement/concrete for underwater concrete offshore structures. In: *SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*, Hague, Netherlands, 5–7 March 2019. Paper SPE-194173-MS. <https://doi.org/10.2118/194173-MS>

57. Noshi C.I., Schubert A.J.J. Self-healing biocement and its potential applications in cementing and sand-consolidation jobs: A review targeted at the oil and gas industry. In: *SPE Liquids-Rich Basins Conference – North America*, Midland, Texas, USA, 5–6 September 2018. Paper SPE-191778-MS. <https://doi.org/10.2118/191778-MS>

58. Li L., Liu T., Jiang G., et al. Microbiological mineralization for self-healing cement sheath in oil and gas wells: A study on the integrity and sealing mechanisms of interface cracks. *Case Studies in Construction Materials*. 2025. Vol. 22. P. e04546. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04546>

59. Ross J.H., Genedy M., Juenger M.C.G., Oort E.V. Permeability recovery by self-healing of class F fly ash-based geopolymers. *Cement*. 2022. Vol. 10. P. 100048. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100048>

60. Reddy B.R., Liang F., Fitzgerald A.R. Self-healing cements that heal without dependence on fluid contact. In: *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, The Woodlands, Texas, USA, 20–22 April 2009. Paper SPE-121555-MS. <https://doi.org/10.2118/121555-MS>

61. Darbe R., Pewitt K., Karcher A.J. Dynamic test evaluates the effectiveness of self-healing cement systems in the downhole environment. In: *Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition*, Manama, Bahrain, 26–28 October 2009. <https://doi.org/10.2118/125904-MS>

62. Van Noort R. Long-term integrity of well cements for CO₂-storage through self-healing capabilities – test development. In: *SPE EuroPEC – Europe Energy Conference featured at the 84th EAGE Annual Conference & Exhibition*, Vienna, Austria, 5–8 June 2023. Paper SPE-214391-MS. <https://doi.org/10.2118/214391-MS>

63. Kolchanov P., Perroni D., Medvedev A., et al. Effective zonal isolation in horizontal wells: Mitigating negative impact of mud channels. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, USA, 24–26 September 2018. Paper SPE-191561-MS. <https://doi.org/10.2118/191561-MS>

64. Denisov I.V., Gubzhokov V.B. Domestic elastic self-healing cement system as a method of preventing and elimination of sustained casing pressure and productive layers overflows. *PROneft. Professionally about Oil*. 2023. Vol. 8, No. 2. P. 40–49. (In Russ.).

65. Boukhelifa L., Moroni N., James S.G., et al. Evaluation of cement systems for oil and gas-well zonal isolation in a full-scale annular geometry. *SPE Drilling & Completions*. 2005. Vol. 20, No. 1. P. 44–53. <https://doi.org/10.2118/87195-PA>
66. Phyoe T., Bermea J.V., Jain B., et al. Achieving zonal isolation in critical high-temperature/high-pressure well through modeling and use of advanced isolation materials. In: *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*, Nusa Dua, Bali, Indonesia, 20–22 October 2015. Paper SPE-176116-MS. <https://doi.org/10.2118/176116-MS>
67. Liu X., Ramos M.J., Nair S.D., et al. True self-healing geopolymer cements for improved zonal isolation and well abandonment. In: *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, Hague, Netherlands, 14–16 March 2017. Paper SPE-184675-MS. <https://doi.org/10.2118/184675-MS>
68. Al-Khayyat B., Al-Mudhaf M., Saffar A.H., et al. Improving zonal isolation and cutting the water production with the help of an engineered self-healing cementing system: A case study review of the first implementation of its kind in Kuwait. In: *SPE Conference at Oman Petroleum & Energy Show*, Muscat, Oman, 21–23 March 2022. Paper SPE-200299-MS. <https://doi.org/10.2118/200299-MS>
69. Brandl A., Alegria A.E., Ismail M., et al. First implementation of a resilient and self-sealing cementing system to optimise long-term zonal isolation in challenging offshore wells – Review of 3 case histories in Malaysia. In: *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*, Singapore, 22–24 August 2016. Paper SPE-180656-MS. <https://doi.org/10.2118/180656-MS>
70. Fan S., Li M. X-ray computed microtomography of three-dimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites. *Smart Materials and Structures*. 2015. Vol. 24, No. 1. P. 015021. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/1/015021>
71. Browning R., Duffy M., Gaugler D., Jones A.P. Effectiveness of self-healing cement additives based on test methodology using simulated cement sheath cracks. In: *SPE Eastern Regional Meeting*, Lexington, Kentucky, USA, 3–5 October 2012. Paper SPE-161028-MS. <https://doi.org/10.2118/161028-MS>
72. Khattak M.A., Jain B., Kalbani S.A., et al. Use of novel self-healing materials to control sustained casing pressure and prevent long term environmental impact. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, 28–30 September 2015. Paper SPE-174892-MS. <https://doi.org/10.2118/174892-MS>
73. Dieguez E.S., Bottiglieri A., Vorderbruggen M., Saeed A.Y. Self-sealing isn't just for cracks: Recent advance in sour well protection. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dubai, UAE, 26–28 September 2016. Paper SPE-181619-MS. <https://doi.org/10.2118/181619-MS>
74. Moroni N., Panciera N., Zanchi A., et al. Overcoming the weak link in cemented hydraulic isolation. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Anaheim, California, USA, 11–14 November 2007. Paper SPE-110523-MS. <https://doi.org/10.2118/110523-MS>
75. Roth J., Reeves C., Johnson C.R., et al. Innovative hydraulic isolation material preserves well integrity. In: *IADC/SPE Drilling Conference*, Orlando, Florida, USA, 4–6 March 2008. Paper SPE-112715-MS. <https://doi.org/10.2118/112715-MS>
76. Roy-Delage S., Le C.A., Garnier A., et al. Self-healing cement system – A step forward in reducing long-term environmental impact. In: *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, USA, 2–4 February 2010. Paper SPE-128226-MS. <https://doi.org/10.2118/128226-MS>

77. Bermea J.A.V., Taoutaou S., Olutimehin K., et al. A case study of flexible/expandable and self-healing cement for ensuring zonal isolation in a shallow, hydraulically fractured gas well, onshore Thailand. In: *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, London, England, UK, 17–19 March 2015. Paper SPE-173065-MS. <https://doi.org/10.2118/173065-MS>
78. Engelke B., de Miranda C.R., Daou F., et al. CO₂ self-healing and resistant cement technology from laboratory to the field. In: *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, Hague, Netherlands, 14–16 March 2017. Paper SPE-184641-MS. <https://doi.org/10.2118/184641-MS>
79. Al-Yami A.S., Alqam M.H., Riefky A., Shafqat A.U. Self healing durable cement; development, lab testing, and field execution. In: *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Abu Dhabi, UAE, 29–31 January 2018. Paper SPE-189397-MS. <https://doi.org/10.2118/189397-MS>
80. Demin E.V., Khusnutdinov A.R., Solovjov P.S. Work with the fund of wells with casing pressure: the evolution of regulatory and approaches of oil and gas companies. *PROneft. Professionally about Oil*. 2022. Vol. 7, No. 2(24). P. 60–75. (In Russ.).
81. Xie Y., Tiong M., Liu Q., et al. Recent advancements in durable and self-healing oil well cement: A pathway to secure carbon sequestration. *Journal of CO₂ Utilization*. 2025. Vol. 92. P. 103036. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103036>
82. Nafikova S., Bugrayev A., Taoutaou S., et al. Elimination of the sustained casing pressure using self-healing cement in Turkmenistan section of the Caspian Sea. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Calgary, Alberta, Canada, 30 September – 2 October 2019. Paper SPE-195945-MS. <https://doi.org/10.2118/195945-MS>
83. Johnson C., Gai A., Ioan T., et al. Self-healing cement for long-term safe exploitation of gas wells: A new technology case study. In: *International Petroleum Technology Conference*, Beijing, China, 26–28 March 2019. Paper IPTC-19399-MS. <https://doi.org/10.2523/IPTC-19399-MS>
84. Shadravan A., Amani A.M. A decade of self-sealing cement technology application to ensure long-term well integrity. In: *SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference*, Mishref, Kuwait, 11–14 October 2015. Paper SPE-175237-MS. <https://doi.org/10.2118/175237-MS>
85. Azwar C., Kusumawatie R., Osman A., et al. First application of a novel self-healing and CO₂-resistant cement on a deepwater cementing operation. In: *Gas & Oil Technology Showcase and Conference*, Dubai, UAE, 13–15 March 2023. Paper SPE-214110-MS. <https://doi.org/10.2118/214110-MS>
86. Sazhin V.V., Seldinas I., Sazhin V.B. Hard-to-recover reserves of “heavy oil” in Russia. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2008. Vol. 22, No. 12(92). P. 56–68. (In Russ.).
87. Chistyakova N.F., Dravante V.V., Sivtsev A.I. Features of the brine water composition of the Vendian–Lower Cambrian Middle Botuoba oil-gas-condensate field during the catagenesis time. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2020. Vol. 15, No. 3. P. 1. (In Russ.). https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2020
88. Moghadam A., Castelein K., ter Heege J., Orlic B. A study on the hydraulic aperture of microannuli at the casing–cement interface using a large-scale laboratory setup. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2022. Vol. 29. P. 100269. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100269>

89. Giordano F.G., Etcheverry J.M., Brunin M., et al. Evaluating the self-healing capacity of lime and lime-based Mortars: Effects of age, curing conditions, formulation and testing methods. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 111. P. 113234. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113234>

90. Nagataki S., Gomi H. Expansive admixtures (mainly ettringite). *Cement and Concrete Composites*. 1998. Vol. 20, No. 2–3. P. 163–170. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(97\)00064-4](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(97)00064-4)

Information about the authors

Anatoly V. Medvedev – Cand. Sci. (Chem.), Program Manager, Schlumberger Telecommunications and Information Security Systems LLC, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-0380-9708>; e-mail: amedvedev5@slb.ru

Petr O. Kolchanov – Head of Section, Schlumberger Telecommunications and Information Security Systems LLC, Moscow, Russia; <https://orcid.org/0009-0001-8443-8522>; e-mail: pkolchanov@slb.ru

Received 21 January 2026

Accepted 10 March 2026