

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК: 622.24.06

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ
УНИКАЛЬНОЙ ВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ОБРАБОТКИ ТАМПОНАЖНОЙ СУСПЕНЗИИ
С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ****© 2024 г. Ю. С. Кузнецов¹, В. Ю. Артамонов¹, А. П. Аверьянов^{1, *},
С. Р. Ганиев¹, Д. Р. Султанов¹, А. П. Шульгина^{1, *}**¹*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*
**e-mail: orin.home@yandex.ru*

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 01.12.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

В статье приведены результаты исследования и внедрения уникальной волновой технологии обработки тампонажной суспензии с повышенными эксплуатационными характеристиками в процессах строительства нефтяных и газовых скважин. На основе теоретического обоснования воздействия волн с определенной спектральной характеристикой на тампонажные суспензии разработана методика и проведены эксперименты в лабораторных и промышленных условиях, позволившие впервые в мире создать волновую технологию обработки тампонажной суспензии. Волновая технология приготовления тампонажных растворов опробована в промышленных условиях на объектах нефтяной промышленности и доказала свою высокую эффективность. Волновая технология обработки цементной суспензии также имеет широкие перспективы для применения в строительстве, особенно при сооружении объектов с повышенными требованиями к прочности бетонных конструкций.

Ключевые слова: волновые технологии, тампонажный раствор, кавитация, кристаллизация

DOI: 10.31857/S0235711924020085, **EDN:** QVJSJT

Использование цементов – минеральных вяжущих материалов – в строительстве, горном деле и во многих других отраслях промышленности распространено настолько широко и является настолько незаменимым, что важность исследований в области технологии их применения не вызывает сомнений. Первая стадия этой технологии заключается в приготовлении цементного раствора – многофазной полидисперсной системы, из которой затем формируется цементный камень с заданными свойствами. Получение заданных свойств цементного камня, как и процесс его формирования, зависит от качества приготовления цементного раствора, в первую очередь от его гомогенности, т. е. однородности дисперсии по всему ее объему. Как показывает практика, добиться этого простым перемешиванием, даже тщательным, удается только относительно.

Известно, что в момент затвердения частицы цемента в значительной мере окружены газовыми оболочками из воздуха, углекислого газа, паров воды. Добавляемая вода, имея по сравнению с газами большой дипольный момент, вытесняет их и облекает частицы

цемента водными оболочками. При этом вследствие неравномерного распределения воды в цементном тесте происходит образование прочных коагуляционных структур. Наличие последних отрицательно сказывается на структуре цементного камня из-за образования крупных пор и поровых капилляров, что в конечном итоге приводит к снижению прочности и повышению проницаемости цементного камня. Для повышения качества приготавливаемых цементных растворов в строительной практике применяется виброобработка, а в практике цементирования обсадных колонн используются методы активации цементного раствора на поверхности, такие как ультразвуковая и дезинтеграторная обработка. Эти методы в большей или меньшей степени позволяют повысить качество приготовления цементного раствора, но при этом существенно усложняют технологический процесс и резко повышают его стоимость. С нашей точки зрения существенные недостатки технических устройств, реализующих эти методы, обусловлены отсутствием базовой теории самого процесса перемешивания многофазных систем. Эти недостатки можно избежать с помощью применения волновых технологий.

Теоретические основы волновой механики разработаны научным коллективом НЦ НВМТ РАН под руководством академика Р.Ф. Ганиева. Теоретические разработки легли в основу принципиально новых подходов к проектированию перемешивающих устройств и волновых технологий гомогенизации суспензий при их приготовлении.

Исследователи, занимающиеся вопросами физикохимии тампонажных материалов, приходят к заключению о том, что необходимо активно вмешиваться в протекающие при твердении физико-химические процессы и, направленно воздействуя на них, улучшать свойства материалов [1–3]. Для повышения качества приготавливаемых цементных суспензий в практике цементирования обсадных колонн используются различные методы их активации на дневной поверхности перед их закачкой в скважину.

При волновой обработке цементного раствора волновыми генераторами происходит интенсивное диспергирование цементного клинкера, что ведет к увеличению числа коллоидных частиц в единице объема. Кроме того, при кавитационном режиме волновой обработки суспензии с поверхности частиц клинкера удаляются продукты гидратации и перекристаллизации, в результате чего обнажаются все новые поверхности для взаимодействия с водой. Огромное развитие поверхности клинкерных минералов ускоряет их растворение и выкристаллизовывание новообразований из пересыщенного раствора.

При последующем возрастании давления кавитационные полости схлопываются, вызывая мощные гидравлические удары, которые приводят к дальнейшему диспергированию частиц цемента. Пузырьки воздуха, вовлеченные в цементный раствор при затворении, содействуют кавитации, ибо являются зародышами кавитационных полостей.

Таким образом, рассмотренные процессы гидратации и структурообразования дают основания считать, что наиболее эффективными являются технологические приемы, которые обеспечат ускорение растворения исходного вяжущего материала и возникновение дополнительных центров кристаллизации. В случае воздействия на цементный раствор волнового поля с необходимыми характеристиками происходит существенное улучшение таких свойств цементного раствора и камня, как седиментационная устойчивость, растекаемость, существенное сокращение ОЗЦ, увеличение прочности и суффозионной устойчивости, а также снижение проницаемости цементного камня.

Проведенные в лабораториях НЦ НВМТ РАН исследования [1–4] послужили основанием для разработки различных конструкций износостойчивых волновых генераторов с эффективными амплитудно-частотными характеристиками

для обработки тампонажных суспензий различного состава, в том числе высокоабразивных. На первом этапе работ по результатам исследований разработанной теоретико-экспериментальной модели генерирования волн и метаматематического моделирования (численных расчетов) были определены основные требования к геометрическим и физическим параметрам кавитационно-волновых устройств (генераторов). В НЦ НВМТ РАН разработаны различные конструкции и изготовлены макеты опытных образцов волновых генераторов и элементы гидравлической обвязки специального лабораторного стенда, что позволило приступить к определению оптимальных типоразмеров, рабочих параметров и амплитудно-частотных характеристик волновых генераторов. Макетные образцы волновых генераторов для проведения серии лабораторных экспериментов на лабораторных стендах изготавливались также из материала ABS-пластик с использованием технологии 3D-печати.

В качестве перспективных образцов малогабаритных волновых генераторов были испытаны три типа: плоский проточный волновой генератор с телами обтекания, проточный на основе трубки Вентури и генератор вихревого типа. Формирование геометрии проточной части волнового генератора проводилось численными методами на основании имеющихся экспериментальных данных и расчетных исследований при различных начальных условиях. По результатам лабораторных стендовых исследований к опытным натурным испытаниям была предложена конструкция волнового генератора вихревого типа со спектральными характеристиками, приведенными на рис. 1.

После проведения натурных испытаний в полевых условиях и внесения необходимых корректив в конструкцию волнового генератора можно было приступить к этапу опытных промышленных испытаний. В результате этих испытаний и последующего широкомасштабного промыслового использования волнового генератора при цементировании кондукторов, обсадных колонн и хвостовиков, с применением различных тампонажных материалов (при различных В/Ц-отношениях ПЦТ П-50, ПЦТ-I-G-СС и др.), в том числе и облегченных, во всех случаях получены положительные результаты, намечена тенденция на экономии тампонажного портландцемента за счет применения низкосортных марок цемента при обеспечении достаточно хорошего качества разобшения пластов. В процессе испытаний выявилась необходимость в фильтре грубой очистки для обеспечения бесперебойной работы генератора. В научном центре НВМТ РАН дополнительно разработали конструкцию самоочищающегося фильтра, не требующего трудоемкого обслуживания.

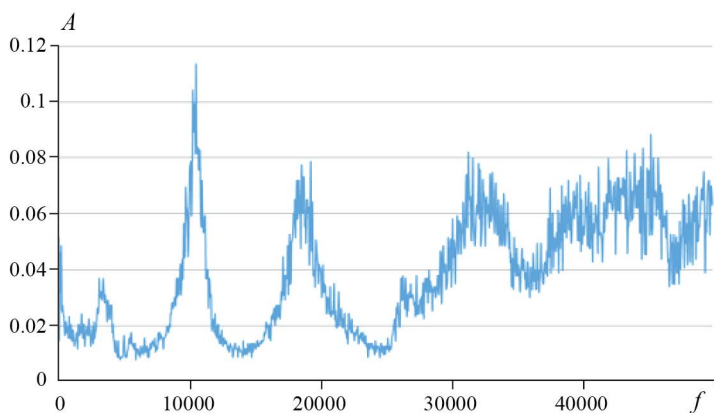


Рис. 1. Спектр излучения генератора вихревого типа

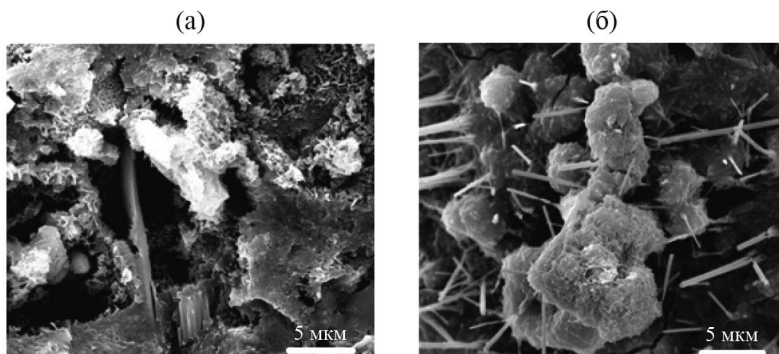


Рис. 2. Микроструктура цементного камня: (а) – до волновой обработки; (б) – после волновой обработки.

На этапе проведения опытных промышленных испытаний нами отбирались пробы обработанных тампонажных растворов и пробы аналогичных растворов до их волновой обработки. Отобранные образцы растворов и полученного из них цементного камня подвергались стандартным лабораторным испытаниям, а структура цементного камня была дополнительно исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Стандартные лабораторные испытания показали значительное улучшение качества тампонажных растворов и цементного камня после их волновой обработки в сравнении с образцами, отобранными до обработки. Технологический показатель прокачиваемости увеличился на 15%, седиментационная устойчивость повысилась в два раза, сроки твердения снизились на 20%, а прочность цементного камня повысилась на 25%. Значения интегральных коэффициентов качества строительства скважин на объектах, где применялась волновая технология, получены в пределах 0.82–0.92. Для сравнения, значения коэффициентов качества строительства аналогичных скважинах, цементирование которых проводилось традиционным методом, лежали в диапазоне 0.66–0.77. Такие результаты создают реальные предпосылки для существенного экономического эффекта как от качества крепления (герметичности и долговечности крепи), так и от экономии цемента в случае необходимости получения облегченных тампонажных растворов.

Сравнительные микрофотографии образцов тампонажного камня, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены на рис. 2. Структура образца цементного камня до волновой обработки характеризуется наличием рыхлых коагуляционных структур и слабым развитием конденсационно-кристаллизационных структур. Образец камня после волновой обработки, напротив, отличается хорошо развитой конденсационно-кристаллизационной структурой. Как уже было отмечено, прочность цементного камня после волновой обработки в среднем на четверть выше прочности камня, полученного из тампонажного раствора до волновой обработки. Данные электронной микроскопии объясняют причину повышения прочности: волновая обработка цементной суспензии на ранней стадии не позволяет формироваться рыхлым коагуляционным структурам, гомогенизирует суспензию и обеспечивает благоприятные условия для формирования более прочных конденсационно-кристаллизационных связей в структуре цементного камня.

Выводы. 1. Волновая технология приготовления тампонажных растворов впервые в мире опробована в промысловых условиях на объектах нефтяной промышленности и доказала свою эффективность. Предлагается использовать волновую технологию обработки тампонажных суспензий для цементирования особо важ-

ных участков ствола скважины при строительстве и капитальном ремонте либо при приготовлении облегченных тампонажных композиций. **2.** Волновая технология обработки цементной суспензии имеет широкие перспективы для применения в строительстве, особенно при сооружении объектов с повышенными требованиями к прочности бетонных конструкций.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овчинников В. П., Рожкова О. В., Рожкова Д. С., Листак М. В.* Прочностные свойства и микроструктура шлакопортландцемента для крепления скважин с повышенными температурами // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2023. № 1 (157). С. 60.
2. *Рожкова О. В., Овчинников В. П.* Цементирование скважин на месторождениях, содержащих высоковязкие нефти, цементо-шлаковыми композициями // Бурение и нефть. 2023. № S2. С. 46.
3. *Овчинников В. П., Рожкова О. В., Овчинников П. В.* Повышение долговечности крепи скважины при использовании молотого гранулированного шлака // Инженер-нефтяник. 2023. № 1. С. 40.
4. *Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е.* Нелинейная волновая механика и технологии. М.: Научный центр РХД, 2008. 712 с.