

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2023.4.369-383>

EDN ZJJHBQ

УДК 622.245.422

Влияние порошка nano-частиц цеолита на долговечность скважинного цемента класса G

Мохаммедамин А.И.М.

Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ),

Уфа, Россия

Effect of Zeolite Nano Particle Powder on the Durability of Class G Well Cement

A.I.M. Mohammedameen

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa, Russia

E-mail: alimestudent@gmail.com

Аннотация. Для обеспечения структурной поддержки обсадной колонны и изоляции призабойных зон при цементировании скважин, необходимо раннее развитие прочности цементного камня. В данной статье представлены экспериментальные результаты влияния nano-цеолита (размер частиц ≤ 100 нм) на прочность при сжатии для повышения начальной прочности цемента класса G. Кубические образцы были приготовлены с тремя различными добавками nano-цеолита: 0,5 %, 1 % и 1,5 % по массе цемента (BWOC). Образцы отверждали на водяной бане при атмосферном давлении, причем температура нагревания составляла 60°C (140° F), а длительность - 8 часов. Прочность на сжатие определяли путем прессования образцов в прессе (разрушающий метод) в соответствии со стандартом Американского института нефти (API). Результаты показали, что добавление 1,5 % nano-цеолита приводит к повышению ранней прочности на 32,4 %. Nano-цеолит указывали на пуццолановое поведение с большим объемом свободного пространства и высокой способностью к катионообмену. Они способны поглощать молекулы с медленной, средней и быстрой скоростью. Эти свойства помогают повысить прочность цементных смесей.

Ключевые слова: *портландцемент, цементирование скважины, цементный раствор, nano-цеолит, цемент класса G, прочность на сжатие, механические свойства, водяная баня, гидрата силиката кальция (C-S-H), пуццолановая реакция*

Для цитирования: Мохаммедамин А.И.М. Влияние порошка nano-частиц цеолита на долговечность скважинного цемента класса G // Нефтяная провинция.-2023.-№4(36).-С. 369-383. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.4.369-383>. - EDN ZJJHBQ

Abstract. To provide structural support of the casing and isolate different wellbore zones during well cementing, early strength development of the cement stone is necessary. This paper presents experimental results of the influence of nano zeolite (particle size ≤ 100 nm) on the compressive strength to enhance early strength of class G cement. Cubic samples were prepared with three different nano zeolite additives 0,5 %, 1 %, and 1,5 % BWOC (By Weight of Cement). The samples were cured in the water bath at atmospheric pressure and heating temperature of 60° C (140° F) for 8 hours. Compressive strength was determined by compressing the samples in a press (destructive method) according to the standard of American Petroleum Institute (API). The results showed that the addition of 1,5 % nano zeolite leads to enhances early strength in rate of 32,4 %. Nano zeolite indicated the pozzolanic behavior with high free space and high cation exchange capacity. They are capable of absorbing molecules at a slow, medium and fast rate. These properties help increase the strength of cement mixtures.

Key words: *portland cement, well cementing, cement mortar, nano-zeolite, class G cement, compressive strength, mechanical properties, water bath, calcium silicate hydrate (C-S-H), pozzolanic reaction*

For citation: A.I.M. Mohammedameen Vliyaniye poroshka nano-chastits tseolita na dolgovechnost' skvazhinnogo tsementa klassa G [Effect of Zeolite Nano Particle Powder on the Durability of Class G Well Cement]. Neftyanaya Provintsiya, No. 4(36), 2023. pp. 369-383. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2023.4.369-383>. EDN ZJJHBQ (in Russian)

Введение

В последние годы разработаны материалы с химическими добавками для цемента в nano-размерном масштабе с использованием nano-частиц для повышения механической прочности [1]. Преимуществом добавления nano-частиц в изделия на основе цемента в первую очередь улучшаются с двумя механизмами: (а) действуют как превосходный наполнитель благодаря большой площади поверхности и высокому соотношению сторон, что делает химический состав их поверхности определяющим фактором для диспергирования nano-частиц. Наличие чрезмерно большей площади поверхности на единицу массы увеличивает возможность Ван-Дер-

Ваальсовых взаимодействий и облегчает их агломерацию. И (б) в гидратацию цемента путем пуццолановой реакции с гидроксидом кальция и увеличение количества гидрата силиката кальция (C-S-H), таким образом, повышает прочность и долговечность цементного материала [2-4].

Наиболее широко используемыми нано-материалами являются оксиды металлов (нано-кремнезем, нано-алюминий, и т. д.), углеродные нанотрубки и волокна, магнитные наночастицы и нано-пластинки (нано-глина, графен, и т.д.) [1,2].

Нано-цеолит - это разновидность наноматериала, которому уделялось немного внимания в качестве добавки при цементировании скважин. Возможно, это связано с широкой доступностью многих нано-материалов или с использованием нано-цеолита в ряде других промышленных технологий.

Нано-цеолиты представляют собой кристаллические алюмосиликаты с четко выраженной пористой структурой и размерами пор молекулярных размеров в диапазоне 0,3-2 нм (первичные строительные блоки решетки алюмосиликатных цеолитов – тетраэдры AlO_4 и SiO_4). Нано-размерный цеолит был обнаружен как в вулканических, так и в осадочных породах. В промышленности цеолит зарекомендовал себя как ионообменник, катализатор и адсорбент, который используется в нефтепереработке, нефтехимии, сельском хозяйстве, управлении почвами, очистке воды и сточных вод. Их широкому использованию способствуют многочисленные подходящие характеристики, включая структурную и композиционную универсальность, физическую и гидротермальную стабильность, нетоксичность, большую площадь поверхности, обменные катионы и хорошее и выгодное соотношение затрат [5-8]. Следовательно, формула для кристаллографической элементарной ячейки может быть использована для описания всех цеолитов; $M_n/n [(AlO_2)_a (SiO_2)_b] \cdot xH_2O$. Где (M) обозначает катионы, (n) -

валентность катиона, соотношение $b:a \geq 1$ и 5, а (X) - количество молей воды, захваченных внутри структуры цеолита [9,10].

Предыдущие исследования показали, что добавление 2 % нано-цеолита с цементом для нефтяных скважин класса G ускоряет повышение прочности на 30 % за счет сокращения WOC (Время застывания цемента) и время эксплуатации. Так, согласно исследованию, проведенному Мирзой Талха Байгом и соавт. [11]. Обнаружение, что проницаемость и пористость были резко снижены при использовании 1 % нано-цеолита (98 % и 17 % соответственно). Это также было подтверждено исследованиями, проведенными Эриком Брони-Бедьяко и др. [12,13] и Амином Пурзангхене и др. [14]. Они пришли к выводу, что использование нано-цеолита может повысить прочность на сжатие при использовании оптимальной добавление от 2 % до 3 %. Кроме того, было показано, что нано-цеолит обладает способностью усиливать и продлевать время загустевания. Хотя было показано, что нано-цеолит оказывает минимальное влияние на реологические свойства цемента, приводя к увеличению пластической вязкости и снижению предела текучести, он не влияет на потерю жидкости цементным раствором.

Целью данного исследования является оценка эффективности использования нано-цеолита в качестве добавки для цементирования нефтяных скважин. Исследование было сосредоточено на начальном увеличении прочности при сжатии. Результаты этого исследования могут помочь в определении потенциала нано-цеолитов в качестве альтернативного компонента при приготовлении цементного раствора для поддержания долговременной целостности скважины.

Экспериментальные материалы и методы

1. Материалы

Для этого эксперимента использовался цемент для нефтяных скважин (Glass G), произведенный и предоставленный цементным заводом Babil в (Ирак). Химический и минералогический составы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики цемента для нефтяных скважин класса G

Минеральный состав				Химические составы						
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	L.O.I
57,54%	15,08%	1,69%	16,98%	20,40%	4,20%	5,58%	63,29%	2,42%	2,07%	1,44%

Порошок наночастиц цеолита с размером частиц менее 100 нм, получивший название (Sapo-11 nano zeolite powder 4A), используемый для испытаний, был приобретен у компании Areej Al Furat (Ирак, Багдад). Изготовлен компанией Jiangsu XFNANO Materials Tech Co (Китай). Химические составы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав наночастиц цеолита

Соединение	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O
Концентрация	~ 6 %	~ 48 %	≤ 0,2 %

Нано-цеолиты имеют одномерную пористую структуру, состоящую из 10-членных колец, с низкой активностью к растрескиванию, высокой активностью к изомеризации и алкилированию и хорошей стойкостью к карбонизации (представлено поставщиком). Он имеет вид белого порошка (Рис. 1) с объемом пор ($\geq 0,16 \text{ см}^3/\text{г}$) и удельной поверхностью ($\text{SSA} \geq 180 \text{ м}^2/\text{г}$).

*Рис. 1. Особенности внешнего вида нано-цеолита*

2. Методы

Для подготовки проб использовалась деионизированная вода с соотношением вода/цемент 0,44. Процедура была выполнена в соответствии со спецификацией API Спец. 10А, 2019 г. [15] и ASTM C109/C109M, 2002 г. [16]. При различных дозировках 0,5 %, 1 % и 1,5 % готовилось по три образца и исследовано влияние nano-цеолита на различные характеристики цемента. Полный состав раствора для каждой смеси, использованной в этом исследовании, показан в табл. 3.

Таблица 3

Составы замесов тампонажного раствора с различными добавками nano-цеолита

Образец этикетки	Цемент (%)	Вода (%)	Нано-цеолит (%)
Чистый цемент (NC)	100	44	0
Нано-цеолит (Z 0.5%)	100	44	0,5
Нано-цеолит (Z 1%)	100	44	1
Нано-цеолит (Z 1.5%)	100	44	1,5

Включают привод и устанавливают скорость на 4000 об/мин, в то время как цемент и добавка добавляются постепенно в течение периода не более 15 секунд. Когда все сухие материалы добавлены в воду затворения, закрывают контейнер крышкой и продолжают перемешивание со скоростью 12000 об/мин в течение 35 секунд. Весь процесс смешивания проводился при лабораторной температуре.

Испытываемый цементный раствор помещали в подготовленные формы 50 мм - 2" (куба) в соответствии с ASTM C109/C109M, 2002 г. [16]. Образцы отверждали герметично, храня суспензию внутри медных форм с плотно прикрепленными крышками и сразу же погружая их в ванну отверждения, как показано на (Рис. 2), при атмосферном давлении и температуре нагрева 60°C (140°F) в течение 8 часов в соответствии с API. Спец. 10А, 2019 г. [15]. В ванне использовалась водопроводная вода, предварительно нагретая до необходимой температуры.



Рис. 2. Ванна для выдержки образцов цемента в воде при атмосферном давлении и температуре нагрева 60°C (140°F)

Основная цель процесса отверждения – повышение прочности и долговечности цементного камня, что способствует образованию новых кристаллизованных гидратов С-S-H. Это приводит к развитию компактной микроструктуры и высокоэффективных цементов, что достигается за счет эффективного внедрения адгезии матрицы и модификации химического состава гидратированных частиц [17,18]. По истечении заданного времени все образцы извлекали из ванны для отверждения, кубики извлекали из форм и осторожно переносили в прохладную пластиковую коробку с водопроводной водой на 45 минут. Перед испытанием на прочность на сжатие избыток воды на поверхности образца удаляли сухой тканью.

Прочность на сжатие измерялась в соответствии со спецификацией API. Спец. 10А, 2019 [15] на испытательной машине (OFITE Model 260, Рис. 3) путем раздавливания образцов (разрушающая прочность на сжатие). Разрушением образец 50 мм - 2" (куба) использовали для оценки прочности на сжатие при сжатии нано-цеолит и цемент. Были зафиксированы результаты всех кубов выборки и найдены средние значения теста кубов. Кубы прочности на сжатие и среднее значение всех результатов должны превышать предел, указанный в спецификации API. Спец. 10А, 2019 [15] (1500 Psi (10,3 МПа) при 60°C (140°F)).



Рис. 3. Испытательной машине (OFITE Model 260) для прочности на сжатии

Результаты исследований

Четыре смеси были испытаны на прочность на сжатие. Первая смесь представляет собой контрольную смесь, которая сочетает в себе цемент класса G с водой и используется в качестве основного раствора (чистый цемент). Остальные три смеси были приготовлены из цементного раствора класса G, в который были добавлены три различных процентных содержания нано-цеолита (0,5 %, 1 % и 1,5 %) в качестве наноматериала. Значения прочности на сжатие для четырех смесей, оцененных в этом исследовании, показаны в табл. 4 и представлены на рис. 4.

Таблица 4

Результаты прочности образцов на сжатие (МПа)

Название образца	Нано-цеолит (%)	Образец 1 (МПа)	Образец 2 (МПа)	Образец 3 (МПа)	Средний показатель (МПа)
Чистый Цемент	0	7,68	8,27	8,25	8,07
Z 0.5%	0,5	9,14	9,70	9,67	9,50
Z 1%	1	11,23	8,56	9,09	9,63
Z 1.5%	1,5	10,86	10,73	10,48	10,69

Исследование прочности на сжатие суспензии класса G и всех смесей, содержащих нано-цеолиты, представленных на рис. 4, выявило, что

цементный раствор с процентным содержанием нано-цеолита (Z 0,5 %) и (Z 1 %) продемонстрировал несколько большую прочность на сжатие, чем раствор класса G на 17,7 % и 19,3 % соответственно. Результаты оказались недостаточными для преодоления допустимой прочности на сжатие, указанной для Образца API. Спец.10А, 2019 г. [15]. И напротив, значительное улучшение раннего развития прочности на сжатие наблюдалось при доле добавления нано-цеолита (Z 1,5 %) на 32,4 %. Это превышает предельное требование стандарта API.

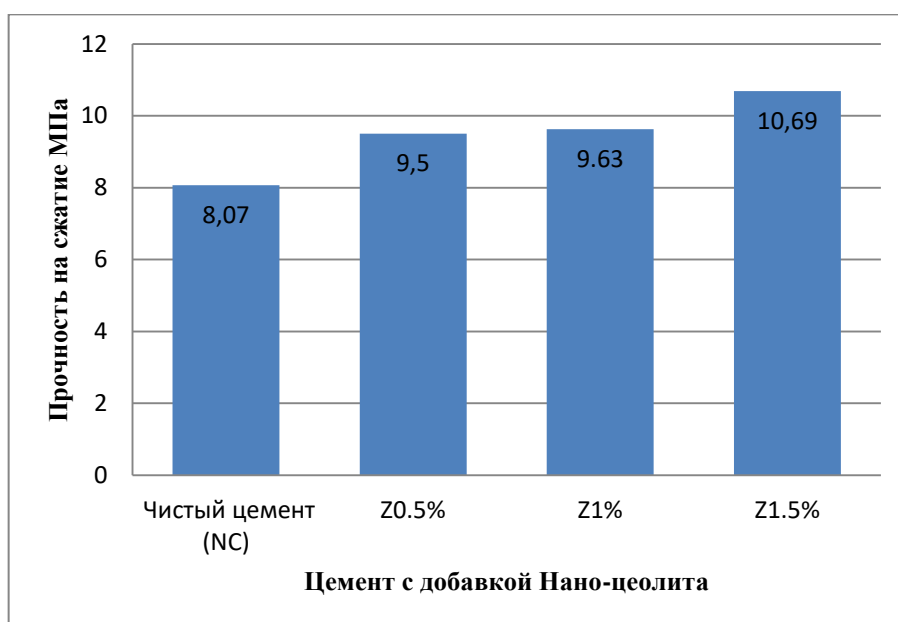


Рис. 4. Изменение прочности на сжатие цемента класса G с различным процентным содержанием нано-цеолита

Нано-цеолит обладает способностью проникать в пустоты и вступать в реакцию с гидроксидом кальция СН в безводных соединениях цементного теста с образованием большей кристаллизации гидрата силиката кальция (C-S-H) из-за небольшого размера его частиц и высокого пуццоланового поведения. Увеличение кристаллической структуры C-S-H снижает пористость и проницаемость и делает цементную матрицу более устойчивой к разрушению. Как показано на рис. 4, прочность цементного теста на сжатие увеличивается по мере увеличения содержания нано-цеолита. Но, к сожалению, и в соответствии со спецификацией API, исследованные об-

разцы не превысили допустимую прочность на сжатие (1500 Psi (10,3 МПа) при 60°C (140°F)), за исключением образцов, испытанных с добавкой 1,5 % наноцеолита. (Z 1,5 %).

Причина этого заключается в том, что ранняя прочность цементной оболочки на сжатие зависит от множества факторов, таких как тип цемента, условия отверждения (температура и давление), количество добавляемой воды для затворения, а также минеральных и химических добавок. Каждый из компонентов цемента при добавлении воды подвергается гидратации, что способствует созданию готового продукта. Единственное вещество, которое увеличивает прочность – это силикат кальция. Силикат трикальция (C_3S) и Силикат дикальция (C_2S) производят продукты гидратации; гидроксид кальция (СН) и гидрат силиката кальция (С-S-Н), который считается основным продуктом гидратации портландцемента и часто считается важным элементом, влияющим на механические характеристики и долговечность материалов на основе цемента. Кроме того, структура С-S-Н может напрямую влиять на прочность, усадку и ползучесть цементной пасты. Силикат трикальция (C_3S), в основном, отвечает за рост прочности на раннем этапе.

Масаки Даймон и др. [19] на основе результатов экспериментов по адсорбции водяного пара и азота для гидратированного силиката трикальция предположили, что гель С-S-Н имеет два типа пор: (1) более крупную межгелевую пору, которую можно увидеть во внутренней С-S-Н с помощью СЭМ, и (2) меньшую межгелевую пору, которую невозможно увидеть. Эти крошечные поры в цементном геле являются причиной постоянного присутствия несвязанной воды в цементных пастах, содержащих избыток цемента. Гель С-S-Н представляет собой многомерную сеть, скрепленную силами Ван-дер-Ваальса, но в которой преобладают сильные ионные ковалентные связи [20]. Кристаллы гидрата силиката кальция утолщаются, из-за чего молекулам воды становится сложнее достичь безводно-

го силиката трикальция и заполнить полости. И это может вызвать агрегацию частиц. В результате этой агломерации уменьшается площадь активной поверхности, которая взаимодействует с образованием геля С-S-H. Кроме того, это вызывает образование слабых кластеров, неспособных поддерживать высокую прочность, что приводит к снижению прочности цемента на сжатие [21].

Выводы

В данной работе рассматривается использование добавки наноцеолита в скважинный цемент класса G для повышения ранней прочности на сжатие. На основании проведенного анализа было установлено, что наноцеолит в количестве 1,5 % от массы цемента способен увеличить прочность цемента на 32 % после 8 часов твердения при температуре 60°C и атмосферном давлении. Большинство научных работ посвящено измерению и анализу влияния наноцеолита на цемент скважин с помощью неразрушающего ультразвукового анализатора цемента (UCA). В то время как в данной работе для исследования использовался метод определения прочности при сжатии без ограничения (UCS).

Результаты показали, что при добавлении нано-цеолита происходит снижение содержания гидроксида кальция СН. Это явление объясняет пуццолановое поведение наноцеолита, который взаимодействует с осажденным гидроксидом кальция при гидратации с образованием С-S-H, уменьшает слоистую структуру гидроксида кальция и повышает С-S-H. Таким образом, добавление наноцеолита в портландцемент повлияет на процесс ранней гидратации цементного камня и повышает его раннюю прочность.

Благодарности: Уфимский государственный нефтяной технологический университет, Уфа, Россия и Центр нефтяных исследований и разработок, Багдад, Ирак.

Acknowledgments: are due to Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, and, Petroleum Research and Development Center, Baghdad, Iraq.

Список литературы

1. Джайниш Шингала, Врутанг Шах, Каушалкумар Дудхат, Манан Шах. Эволюция наноматериалов в нефтяной промышленности: применение и проблемы//Журнал разведки и технологии добычи нефти.- (2020).- №(10).-С.3993-4006. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00914-4> (По-английски)
2. Сен Ду, Цзюньлян Ву, Осман Аль-Шарида, Сяньмин Ши. Нанотехнологии в материалах на основе цемента: обзор долговечности, моделирования и расширенных характеристик//Наноматериалы.-2019.-№9(9). <https://doi.org/10.3390/nano9091213> (По-английски)
3. В. А. Хан, М. К. Рахман, М. А. Махмуд, П. Сармах. МУНТ для улучшения механических свойств цемента для нефтяных скважин при использовании НРНТ//SPE/IADC-178175-MS.-2016 (По-английски)
4. М. Табатабаи, А. Дахи Талегани, Н. Алем. Нанопластинки графита с модифицированной поверхностью для повышения долговечности цементной оболочки //SPE 199897.- 2019 (По-английски)
5. Любомира Тошева, Вальчев Валентин Петрович. Наноцеолиты: синтез, механизм кристаллизации и применение//Хим. Матер.-2005.-№ 17(10).-С.2494-2513 (По-английски)
6. Эхсан Кианфар. Наноцеолиты: синтез, свойства, применение//Журнал Sol-Gel Science and Technology.- 2019.-№91.-С.415–429. <https://doi.org/10.1007/s10971-019-05012-4> (По-английски)
7. Светлана Минтова, Жан-Пьер Жильсон, Валентин Вальчев. Достижения в области наноразмерных цеолитов//Nanoscale.-2013.- №(5).-С.6693-6703. <https://doi.org/10.1039/C3NR01629C> (По-английски)
8. Эсмаат Кохсарян, Мансур Анбиа. Наноразмерные и иерархические цеолиты: краткий обзор//Китайский журнал катализа.-2016.-№(37).-С.447-467. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61038-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61038-5) (По-английски)
9. Файтен и др. Цементирующие композиции, содержащие межмолекулярный цементный клинкер и цеолит//Патент США 2006/0054319 A1 (По-английски)
10. Люк и др. Цеолитсодержащая цементная композиция//Патент США 2004/0112600 A1 (По-английски)
11. Мирза Талха Байг, Мухаммад Калимур Рахман, Абдулазиз Аль-Маджед. Применение нанотехнологий при цементировании нефтяных скважин//SPE-187543-MS.-2017 (По-английски)
12. Эрик Брони-Бедиако, Фульгенс Маал-Ире Наату. Экспериментальная оценка эффективности свежего наноцеолита в качестве добавки к цементу для нефтяных скважин//Нефтяная наука и техника.-2021.-№5(1).- С.1-12. (По-английски)
13. Эрик Брони-Бедиако, Фульгенс Маал-Ире Наату. Влияние свежего наноцеолита на физические свойства цементного раствора нефтяных скважин при высокой температуре//Технологический журнал Ганы.-2021.-№5(2).-С.86–99. (По-английски)
14. Амин Пурзангене, Биджан Ганавати, Борзу Асгари Пирбалути. Исследование влияния наноцеолита на реологические и механические свойства тяжелого цементного

- раствора для бурения скважин на южном нефтяном месторождении Ирана//Иранский журнал нефтегазовой науки и технологий.-2022.-№11(2).-С.51-64. <http://ijogst.put.ac.ir> (По-английски)
15. Спецификация API 10A, Цементы и материалы для цементирования скважин. 25-е издание.-2019г. (По-английски)
 16. ASTM C109/C109M-02, Стандартный метод испытаний прочности на сжатие гидравлических цементных растворов (с использованием кубических образцов размером 2" или [50 мм]).-2002г. (По-английски)
 17. Хусейн Хамада, Алия Алаттар, Бассам Тайе, Фадзил Яхая, Ибрагим Альмешаль. Влияние различных методов отверждения на прочность на сжатие сверхвысокопрочного бетона: комплексный обзор//Практические примеры строительных материалов.-2022.-№17.- e01390. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01390> (По-английски)
 18. Сарвар Сиддики, Уэсли Ниберг, Уилсон Смит, Бретт Блэквелл, Кайл А. Райдинг. Влияние наличия и состава затвердевающей воды на гидратацию цемента//Журнал АСІ Материалы.-2013.-№110 (3) (По-английски)
 19. Масаки Даймон, Салах А. Або-Эль-Энейн, Гико Хосака, Сейси Гото, Реничи Кондо. Пористая структура гидрата силиката кальция в гидратированном трикальцийсиликате//Журнал Американского керамического общества.-1977.-№60(3-4) (По-английски)
 20. Шенгвен Танг, Янг Ванг, Чжичэн Гэн, Сяофэй Сюй, Вэньчжи Ю, Хубао А, Цзинтао Чен. Структура, фрактальность, механика и прочность гидратов силиката кальция//Фрактальный фракт.-2021.- №5(2) 47.- С.1–34 <https://doi.org/10.3390/fractalfract5020047> (По-английски)
 21. Хасан Абдул Хади, Хасан Абдул Амир. Экспериментальное исследование влияния наноглинозема и нанокремнезема на прочность и консистенцию цемента нефтяных скважин//Инженерный журнал.-2017.-№23(12) (По-английски)

References

1. Jainish Shingala, Vrutang Shah, Kaushalkumar Dudhat, Manan Shah. [Evolution of nanomaterials in petroleum industries: application and the challenges]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10 (2020). pp. 3993–4006. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00914-4>
2. Sen Du, Junliang Wu, Othman AlShareedah, Xianming Shi. [Nanotechnology in cement-based materials: A review of durability, modeling, and advanced characterization]. Nanomaterials, No. 9(9), 2019. 1213. <https://doi.org/10.3390/nano9091213>
3. W. A. Khan, M. K. Rahman, M. A. Mahmoud, P. Sarmah. [MWCNT for enhancing mechanical properties of oil well cement for HPHT applications]. SPE/IADC-178175-MS, 2016.
4. M. Tabatabaei, A. Dahi Taleghani, N. Alem. [Surface-Modified graphite nanoplatelets to enhance cement sheath durability]. SPE 199897, 2019.
5. Lubomira Tosheva, Valentin P. Valtchev [Nanozeolites: synthesis, crystallization mechanism, and applications]. Chem. Mater., No. 17 (10), 2005. pp. 2494-2513.
6. Ehsan Kianfar [Nanozeolites: synthesized, properties, applications]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 91, 2019. pp 415–429. <https://doi.org/10.1007/s10971-019-05012-4>
7. Svetlana Mintova, Jean-Pierre Gilson, Valentin Valtchev [Advances in nanosized zeolites]. Nanoscale, 5, 2013. pp. 6693–6703. <https://doi.org/10.1039/C3NR01629C>

8. Esmat Koohsaryan, Mansoor Anbia [Nanosized and hierarchical zeolites: A short review]. *Chinese Journal of Catalysis*, 37, 2016. pp. 447-467. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)61038-5](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)61038-5)
9. Fyten et al. [Cementitious compositions containing interground cement clinker and zeolite]. Patent, US 2006/0054319 A1.
10. Luke et al. [Zeolite-containing cement composition]. Patent, US 2004/0112600 A1.
11. Mirza Talha Baig, Muhammad Kalimur Rahman, Abdulaziz Al-Majed [Application of Nanotechnology in Oil Well Cementing]. SPE-187543-MS, 2017.
12. Eric Broni-Bediako, Fulgence Maal-Ire Naatu [Experimental Evaluation of the Performance of Fresh Nano Zeolite as an Oil Well Cement Additive]. *Petroleum Science and Engineering*, No. 5(1), 2021. pp. 1-12.
13. Eric Broni-Bediako, Fulgence Maal-Ire Naatu [Effects of Fresh Nano Zeolite on the Physical Properties of Oil Well Cement Slurry at High Temperature]. *Ghana Journal of Technology*, No. 5(2), 2021. pp. 86 - 99.
14. Amin Poorzangheneh, Bijan Ghanavati, Borzu Asgari Pirbalooti [Investigation of the Effect of Nano Zeolite on The Rheological and Mechanical Properties of Heavy Weight Cement Slurry for Drilling Wells in Iranian Southern Oil Field]. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*, No. 11(2), 2022. pp. 51–64. <http://ijogst.put.ac.ir>
15. API specification 10A, Cements and Materials for Well Cementing. 25th edition, 2019.
16. ASTM C 109/C 109M - 02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). 2002.
17. Hussein Hamada, Alyaa Alattar, Bassam Tayeh, Fadzil Yahaya, Ibrahim Almeshal [Influence of different curing methods on the compressive strength of ultra-high-performance concrete: A comprehensive review]. *Case Studies in Construction Materials*, 17, 2022, e01390. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01390>
18. Md Sarwar Siddiqui, Wesley Nyberg, Wilson Smith, Brett Blackwell, Kyle A. Riding [Effect of Curing Water Availability and Composition on Cement Hydration]. *ACI Materials Journal*, No. 110 (3), 2013.
19. Masaki Daimon, Salah A. Abo-El-Enein, Giko Hosaka, Seishi Goto, Renichi Kondo [Pore Structure of Calcium Silicate Hydrate in Hydrated Tricalcium Silicate]. *Journal of the American Ceramic Society*, No. 60(3-4), 1977.
20. Shengwen Tang, Yang Wang, Zhicheng Geng, Xiaofei Xu, Wenzhi Yu, Hubao A, Jingtao Chen [Structure, Fractality, Mechanics and durability of calcium silicate hydrates]. *Fractal Fract.* No. 5(2), 47, 2021. pp. 1-34 <https://doi.org/10.3390/fractalfract5020047>
21. Hassan Abdul Hadi, Hassan Abdul Ameer [Experimental Investigation of Nano Alumina and Nano Silica on Strength and Consistency of Oil Well Cement]. *Journal of Engineering*, No. 23(12), 2017.

Сведения об авторах

Мохаммедамин Али Ибрахим Мохаммедамин, аспирант кафедры Бурение нефтяных и газовых скважин (БНГС), Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ)

Россия, 450064, Уфа, ул. Кольцевая, 9

E-mail: alimestudent@gmail.com

Authors

A.I.M. Mohammedameen, postgraduate student at the Department of Oil and Gas Well Drilling (ONGS), Ufa State Petroleum Technological University (USPTU)

9, Koltsevaya st., Ufa, 450064, Russian Federation

E-mail: alimestudent@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12.10.2023

Принята к публикации 20.12.2023

Опубликована 30.12.2023