



SOCAR Proceedings

Reservoir and Petroleum Engineering

journal home page: <http://proceedings.socar.az>



О ВЛИЯНИИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И НАНОРАЗМЕРНЫХ ДОБАВОК НА КАЧЕСТВО ИЗОЛЯЦИИ ЗАТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА В ПРОЦЕССЕ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ СКВАЖИН

Б.А.Судейманов*, Э.Ф.Велиев

НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Баку, Азербайджан

The Effect of Particle Size Distribution and the Nano-Sized Additives on the Quality of Annulus Isolation in Well Cementing

B.A.Suleimanov, E.F.Veliyev

«OilGasScientificResearchProject» Institute, SOCAR, Baku, Azerbaijan

Abstract

The paper presents the comparative study of portland cement compressive strength dependence on nano-TiO₂ and nano-SiO₂ addition, as well as various fine modifications. It was shown the impact of nano-additives concentration, the specific surface area of the cement powder and particle size distribution on compressive strength changes while 1, 2, 7 and 28 day's period. The addition of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ led to the increase of compressive strength at early stages of hardening by 35.71% and 37.14% respectively and 18% and 20% at a late stage. Compressive strength of the most finely dispersed cement sample (R-6) was higher by 112%, and 42% at early and later stages of hardening, respectively in compare with ordinary cement powder (P-1). To predict the strength of cement at different stages of hardening was obtained multiple regression equation with a high determination coefficient for early and late stage strength R² = 0.92 and R² = 0.95, respectively.

Keywords:

Portland cement;
Specific surface area;
Compressive strength;
Nano-SiO₂;
Nano-TiO₂;
Multiple regression equation.

© 2016 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

1. Введение

Увеличение качества изоляции затрубного пространства является одной из важных задач как при строительстве скважин, так и в эксплуатационный период при операциях капитального ремонта. Одним из наиболее критических факторов оказывающих влияние на данный процесс является прочность цементного камня. Способы улучшения этого показателя можно условно разделить на две основные группы. К первой группе относятся цементы, получаемые путем изменения химического состава цементного порошка. Условно выделяются два основных направления:

- а) использование различных наполнителей, армирующих элементов в качестве добавок для уже имеющегося продукта (цементного порошка);
- б) изменение первоначального состава цемента в процессе его производства.

Положительное влияние нанонаполнителей на прочность цементного камня объясняется увеличением кристаллизации в гидратированных частицах цемента в результате их добавки [1,2]. Так Тао [3] исследовав микроструктуру цементного камня, содержащего nano-SiO₂ с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), наблюдал улучшение пористой структуры цементного камня и ее более компактное строение. Работы [4,5], так же продемонстрировали положительное влияние nano-SiO₂ на механические свойства цемента по сравнению с микрокремнеземом. Х.Ли и Х.Сяо сообщили, что растворы, содержащие nano-SiO₂ или nano-Fe₂O₃ имеют большую прочность на сжатие и изгиб, чем у обычного цементного раствора [6]. Еще одно исследование Ли и др. [7] показало большую абразивную устойчивость образцов, включающих nano-SiO₂ и nano-TiO₂.

В работах Назари и др. [8-11] показано, что добавление наночастиц TiO₂ до 4 мас.% в цементный порошок улучшает механические свойства цементного камня.

*E-mail: Baghir.Suleymanov@socar.az
<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20160400293>

Ко второй группе относятся цементы, получаемые изменением физических характеристик цементного порошка. В данном случае изменению подвергается гранулометрический состав цементного порошка путем увеличения тонкости помола.

Количественно данные изменения будут выражаться в изменении: распределении частиц цементного порошка и площади удельной поверхности.

В работах [12-14] рассмотрено улучшение прочности цементного камня путем контроля гранулометрического состава, площади удельной поверхности и распределения частиц в цементном порошке.

Челик в своей работе указал на важность интервала распределения частиц и тонкости помола особенно для ранних стадий гидратации цементного камня [15]. Д.Бентц и др. привели результаты лабораторных исследований и компьютерного моделирования влияния тонкости помола цемента на физико-механические свойства цементного камня, показав значительное улучшение этих свойств [16].

Из вышеперечисленных способов увеличения прочности цементного камня, только использование нано-добавок не сопровождается изменением самого процесса производства. Все оставшиеся способы возможны лишь при пересмотре технологического процесса производства, что, безусловно, скажется на себестоимости готовой продукции не в сторону ее удешевления. Целью данной работы является обоснование и оптимизация выбора тампонажного цемента с практической и экономической точек зрения. В работе изучены и сравнены оба механизма увеличения прочности цементного камня, на примере портландцемента с добавками нано-TiO₂ и нано-SiO₂, а также его различных высокодисперсных модификаций, полученных в лаборатории. Также были получены два уравнения регрессии, позволяющие с высокой точностью прогнозировать прочность цементного камня при известном фракционном составе в начальный и поздний периоды твердения цементного камня.

2. Эксперимент

2.1. Материалы

Цементный порошок. В качестве исходного цемента использован высокосульфатостойкий тампонажный цемент немецкой фирмы «Дюккерхофф».

Нано-SiO₂. В качестве нано-SiO₂ использованы наночастицы SiO₂ компании «Nanoamog Europe» со средним размером частиц 15 нм и степенью чистоты более 99%.

Нано-TiO₂. В качестве нано-TiO₂ использованы наночастицы SiO₂ компании «Nanoamog Europe» со средним размером частиц 15 нм и степенью чистоты более 99%.

2.2. Приготовление образцов и методики тестирования

Измельчение цементного порошка

Измельчение цементного порошка было проведено на шаровой мельнице модели РМ400 фирмы RETCH

Измерение площади удельной поверхности

Удельная поверхность цементных порошков была определена по воздушной проницаемости с использованием аппарата Блейна модели TESTING1.0290 производителя TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH.

Измерение гранулометрического состава

Гранулометрический анализ цементного порошка проведен на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Mastersizer 3000 компании Malvern.

Рентгенодифракционный анализ

Рентгенодифракционный анализ проведен согласно ASTM C1365 - 06(2011) с использованием рентгеновского дифрактометра модели Empyrean фирмы PANalytical.

Измерение прочности цементного камня

Прочность цементного камня была замерена согласно методике API RP 10B-2 с использованием тестера прочности на сжатие компании Chandler Engineering модели 4207D. Испытания проводились в следующие интервалы времени: 1, 2, 7 и 28 суток. Образцы выдерживались в автоклаве при температуре 25±2 °С. Результаты проведенных экспериментов были приняты нами при повторяемости полученных данных не менее 3 раз.

Растровая электронная микроскопия

Данные исследования проводились при использовании растрового электронного микроскопа марки JEOL JSM-7600, 2012, 1000000-кратное увеличение поверхности объекта с высокой разрешающей способностью (0.4 нм)

Приготовление образцов

- Первая группа из 7 образцов получена путем добавления наночастиц TiO₂ и SiO₂, от 0.5 до 2 мас.% (табл.1).

№ образца	Нано-TiO ₂ , мас. %	Нано-SiO ₂ , мас. %
S-1	0	0.5
S-2	0	1
S-3	0	1.5
T-1	0.5	0
T-2	1	0
T-3	1.5	0
T-4	2	0

- Вторая группа из 5 образцов получена путем измельчения на шаровой мельнице. Далее для каждого образца дан-

Таблица 2

**Гранулометрический состав и площадь удельной поверхности
полученных образцов**

№ Образца	D10*	D50*	D90*	S _{уд.} см ² /гр
P-1*	1.76	40	62	2630
P-2	1.88	16.6	54	2850
P-3	1.63	16.3	50.6	3640
P-4	1.25	10.4	38.5	4320
P-5	1.85	17.8	27	4710
P-6	1.98	6.6	16.9	5480

*P-1 – исходный портландцемент, D10, D50 и D90, соответствует процентному содержанию весовой доли частиц заданного размера менее 10, 50 и 90 в % от общего содержания

Таблица 3

Рентгенодифракционный анализ

Фаза	C3S	C3S (beta)	C3A	C4AF	Ca(OH) ₂	MgO	SiO ₂	K ₂ SO ₄
масс %	61	18	1.3	14.5	0.3	1.3	0.3	0.5

ной группы была определена площадь удельной поверхности, гранулометрический состав (табл.2) и проведен рентгенодифракционный анализ, подтвердивший идентичность их структурного и фазового состава (табл.3).

Водоцементное соотношение при приготовлении раствора было 0.44 и никаких дополнительных присадок использовано не было.

3. Обсуждение результатов

3.1. Прочность на сжатие

3.1.1. Влияние удельной площади поверхности и распределения частиц на прочность цементного камня

Полученные данные (табл.4) показывают, что площадь удельной поверхности плохо коррелируется с увеличением прочности цемента в первые сутки твердения. Однако по истечению 28 суток данная зависимость у всех образцов носит практически прямо пропорциональный характер.

Но, тем не менее, площадь удельной поверхности нельзя рассматривать как абсолютный критерий

для прогнозирования прочности цементного камня. Ввиду того, что равные ее значения, могут иметь цементы, имеющие совершенно различный фракционный состав, а роль разноразмерных фракций в процессе твердения цемента не идентична. Так в работах показано [14,17], что частицы с размером от 0-5 мкм способствуют набору прочности в первые 24 часа, т.е. чем тоньше измельчен цемент, тем быстрее он реагирует с водой (гидратирует) и твердеет. Высокая гидратационная активность тонких фракций цемента напрямую связана с их большой удельной поверхностью и небольшой толщиной защитных оболочек, возникающих на зернах в процессе гидратации. Все же увеличение прочностных характеристик с увеличением доли мелкодисперсных фракций, так же не линейно [18]. Прочность цементного камня в данном случае растет лишь в первые сутки твердения, а в дальнейшем скорость прироста падает. Объясняется это тем, что количество не гидратированных частиц из более крупных фракций в мелкодисперсном цементе мало и их вклад в набор прочности на более поздних стадиях тоже не значителен. Таким образом, большая

Таблица 4

**Влияние площади удельной поверхности и распределения частиц
цементного порошка на прочность цементного камня**

Образец	1 день Прочность, МПа	2 день Прочность, МПа	7 день Прочность, МПа	28 день Прочность, МПа	D10	D50	D90	S _{уд.} см ² /гр
P-1	13.2	28	45.5	56.7	1.76	40	62	2630
P-2	24	30	48.6	62	1.88	16.6	54	2850
P-3	15.3	36.7	53.5	65.2	1.63	16.3	50.6	3640
P-4	12.2	32	61.5	66.2	1.25	10.4	38.5	4320
P-5	22.7	54.28	55.9	71.4	1.85	17.8	27	4710
P-6	28	45	68	81	1.98	6.6	16.9	5480

часть от максимально возможной прочности данного цемента наблюдается уже на ранних стадиях твердения и дальнейший набор прочности не столь существенный. Но и обратная ситуация, когда цемент состоит преимущественно из более крупных фракций, не является желательной. В данном случае процесс гидратации протекает значительно медленнее [18], как в свою очередь и набор прочности.

Результаты проведенных опытов показывают увеличение прочности цементного камня из наиболее мелкодисперсного образца (P-6) по сравнению с обычным цементным порошком (P-1) на 112% и 42% при ранних и поздних стадиях твердения соответственно. Данное увеличение прочности было достигнуто при уменьшении размера частиц портланд цемента (D90) на 72%, а при уменьшении на 56% данные показатели составили 72% и 25% соответственно.

Таким образом, оптимальный фракционный состав, имеет критическое значение для получения качественного цементного камня в нужные временные рамки, что так же немаловажно для нефтедобывающей индустрии.

3.1.2. Влияние нано-SiO₂ и нано-TiO₂ на прочность цементного камня

Для изучения влияния наночастиц на прочность цементного камня были использованы наночастицы-SiO₂ и наночастицы-TiO₂ (табл.5). Для нано-SiO₂ максимальная концентрация составила 1.5 мас.%, так как дальнейшее увеличение концентрации до 2 мас.% привело к нестабильным реологическим показателям цементного раствора, не позволяющим его использовать при операциях крепления или изоляции. Однако стоит заметить, что в работах других исследователей были использованы более высокие концентрации нано-SiO₂ до 10%, что по всей видимости связано с различным размером частиц (5-70 нм), их распределением и площа-

дью поверхности [19].

В случае с нано-TiO₂ максимальная концентрация составила 2 мас.% ввиду того, что дальнейшее увеличение прочности цементного камня с увеличением концентрации частиц носило незначительный характер.

Как видно, использование наночастиц SiO₂ и TiO₂ привело к увеличению прочности цемента при ранних стадиях твердения на 35.71% и 37.14%, а при более поздней стадии на 18% и 20% соответственно.

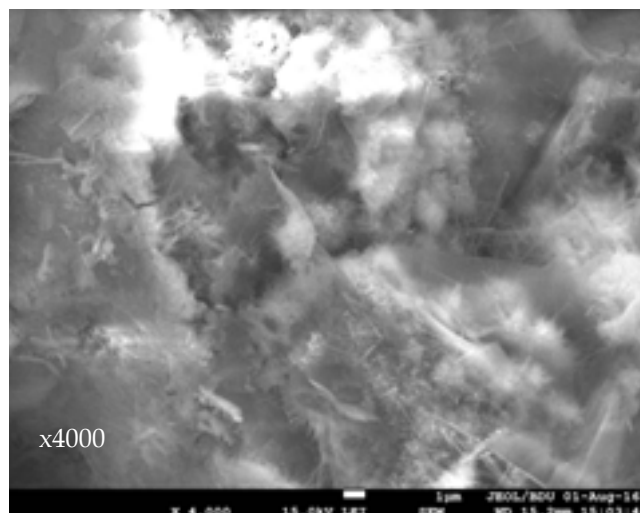
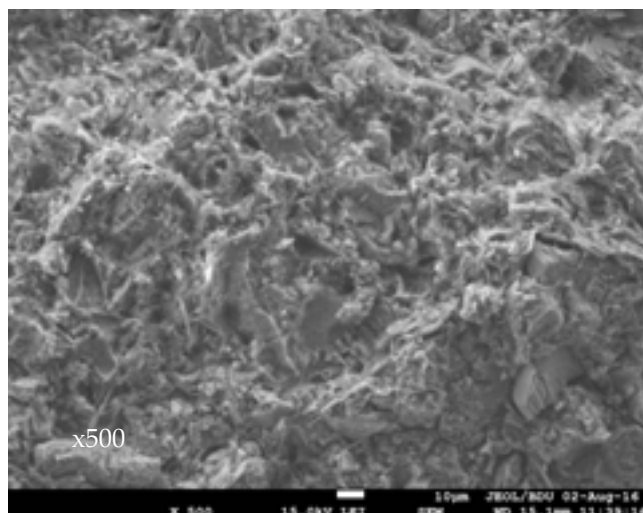
Полученные результаты объясняются результатами исследования, проведенные К.Соболевым и Ф.Санчесом [19]. Они изучили влияние нано-SiO₂ на цемент и показали увеличение скорости его гидратации за счет направленного формирования упорядоченных надмолекулярных структур гидратов силиката кальция, структурирующих цементную матрицу и повышающих ее прочность, обусловленную высокой удельной площадью поверхности. Данный эффект связан с высокой химической активностью нано-SiO₂ ускоряющей реакцию гидратации, которая увеличивает количество СНS связей в цементной пасте и формирует более длинные силикатные цепи.

Наглядно данный эффект находит отражение и в снимках цементного камня полученных посредством РЭМ (рис.). Различима волокнистая структура сформированного цементного камня при наличии в системе нано-SiO₂ по сравнению с обычным портландцементом.

Наночастицы TiO₂ напротив действуют по всей видимости исключительно за счет увеличения площади удельной поверхности, создавая более равномерную матрицу и уменьшая объем крупных пор.

Таким образом полученные показатели прочности превышают идентичные для образцов P1-P4 и сравнимы с результатами по образцу P-5, то есть с уменьшением среднего диаметра частиц портланд цемента на 56%.

Таблица 5					
Влияние концентрации нано-SiO ₂ и нано-TiO ₂ на прочность цементного камня					
№ Образца	1 день Прочность, МПа	2 день Прочность, МПа	7 день Прочность, МПа	28 день Прочность, МПа	Наночастицы, мас.%
Нано-SiO₂, мас.%					
P-1	13.2	28	45.5	56.7	0
S-1	13.7	29.2	46.1	58.2	0.5
S-2	17	38	60	67	1
S-3	14	32.8	51.4	64	1.5
Нано-TiO₂, мас.%					
T-1	14.1	31.5	52.3	67	0.5
T-2	14.6	32.9	54.4	64.5	1
T-3	14.9	36.2	58.4	66.6	1.5
T-4	15.4	38.4	59.8	68.1	2

а) Портландцемент с 1 мас.% nano-SiO₂

б) Портландцемент без добавок наночастиц

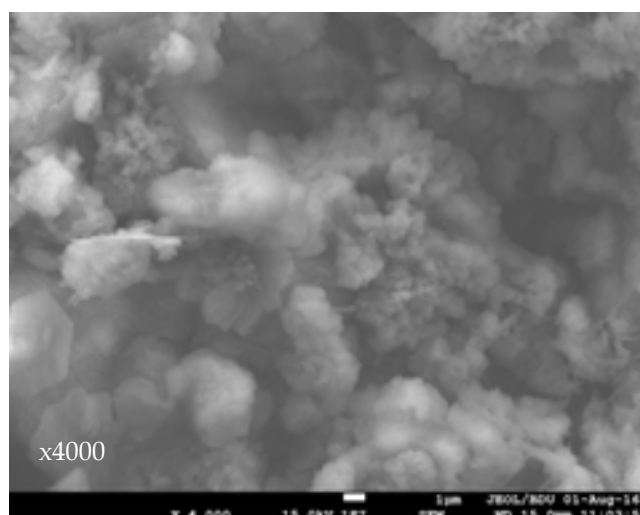
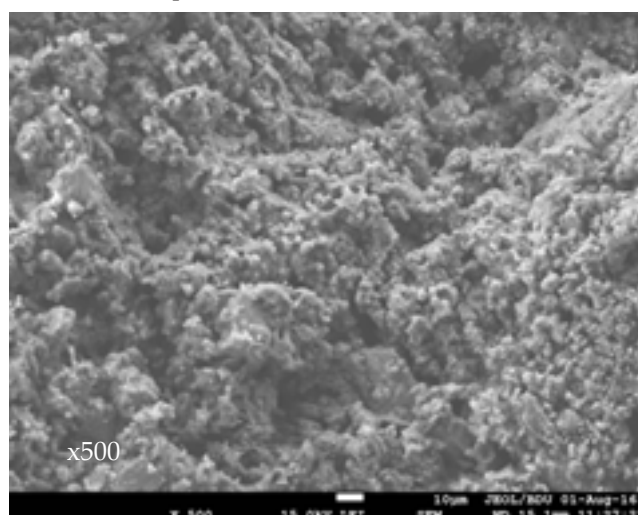


Рис. Изображения РЭМ

3.2. Уравнение регрессии

Для выявления наличия математической зависимости между полученными результатами и выявления возможности использования данных результатов для прогнозирования прочности цементного камня на разных стадиях твердения был использован метод регрессионного анализа. Следует заметить, что данный метод не был применен к результатам, полученным при исследовании влияния наночастиц на прочность цемента, так как для построения статически значимого уравнения регрессии данных было недостаточно.

При построении уравнения результирующим признаком было значение прочности цемента, а факторными признаками: фракционный состав, площадь удельной поверхности и время затвердевания. Уравнение регрессии, описывающее одновременно обе стадии набора прочности, статически не надежно, ввиду включения как факторных признаков различных фракций цемента, оказывающих неравномерное влияние на набор прочности в различных стадиях твердения.

В связи с этим уравнение регрессии было

составлено для двух частных случаев:

- уравнение множественной регрессии для начальной стадии набора прочности (1,2 суток):

$$y = -5.06 x_1 + 1.22 \cdot 10^{-1} x_2 - 1.01 x_3 - 8.38 \cdot 10^{-3} x_4 + 18.38 x_5 + 82.78 \quad (1)$$

где x_1 - D10, x_2 - D50, x_3 - D90, x_4 - $S_{уд,r}$, x_5 - время твердения в сутках.

Остаточная сумма квадратов: $r_{ss} = 127.2025076$

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0.923301285$

- уравнение множественной регрессии для поздней стадии набора прочности (7, 28 суток)

$$y = 4.76 x_1 - 1.79 \cdot 10^{-1} x_2 + 2.38 \cdot 10^{-1} x_3 + 9.3 \cdot 10^{-3} x_4 + 5.51 \cdot 10^{-1} x_5 + 0.12 \quad (2)$$

где: x_1 - D10, x_2 - D50, x_3 - D90, x_4 - $S_{уд,r}$, x_5 - время твердения в сутках.

Остаточная сумма квадратов: $r_{ss} = 51.55482708$
Коэффициент детерминации: $R^2 = 0.9529964842$.

Полученные уравнения множественной регрессии имеют высокий коэффициент детерминации для ранней и поздней стадии набора прочности $R^2 = 0.92$ и $R^2 = 0.95$ соответственно и являются статически значимыми.

Выводы

1. Площадь удельной поверхности нельзя рассматривать как точный критерий для прогнозирования прочности цементного камня. Однако введение такого показателя как распределение частиц позволяет делать более точные прогнозы.
2. Использование наночастиц SiO_2 и TiO_2 привело к увеличению прочности цемента при ранних стадиях твердения на 35.71% и 37.14%, а при более поздней стадии на 18% и 20% соответственно.
3. Предложены уравнения множественной регрессии, позволяющие на основе учета площади удельной поверхности и распределение частиц. Полученные уравнения множественной регрессии имеют высокий коэффициент детерминации для ранней и поздней стадии набора прочности $R^2 = 0.92$ и $R^2 = 0.95$ соответственно и являются статически значимыми.
4. Наночастицы SiO_2 и TiO_2 в целом улучшают показатели изоляционных свойств цементного камня, позволяя улучшить характеристики обычного портландцемента и сравнимы с уменьшением среднего диаметра частиц портландцемента на 56%.

Литература

1. Q.Ye, Z.N.Zhang, R.S.Chen, C.Mac. Interaction of nano- SiO_2 with calcium hydroxide crystals at interface between hardened cement paste and aggregate //Journal of the Chinese Ceramic Society. -2003. -Vol.31. -No.3.
2. D.F.Lin, M.C.Tsai, J.Air. Study of recycled materials //The Official Journal of the Air and Waste Management Association. -2006. -Vol.56. -No. 5. -P.1140-46.
3. J.Tao. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano- SiO_2 //Cement and Concrete Research. -2012. -Vol.35. -No.10. -P.1943-1947.
4. Q.Ye. Research on the comparison of pozzolanic activity between nano- SiO_2 and silica fume //Concrete Journal. - 2001. -Vol.3. -No.1. -P.19-22.
5. R.S.Chen, Q.Ye. Research on the comparison of properties of hardened cement paste between nano- SiO_2 and silica fume added concrete //Concrete Journal. -2001. -Vol.3. -No.1. -P.19-22.
6. H.Li, H.Xiao, J.Ou. Nono-particled in concrete //Cement and Concrete Research. -2004. -Vol.34. -No.3. -P.435-438.
7. H.Li, M.J.O.Zhang. Abrasion resistance of concrete //Wear. -2006. -Vol.260. -No.3. -P.1262-1266.
8. A.Nazari, S.Riahi. The effect of TiO_2 nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete //Materials Science and Engineering A. -2010. -Vol.52. -No.8. -P.756-763.
9. A.Nazari, S.Riahi. Improvement compressive strength of concrete in different curing media by Al_2O_3 nanoparticles //Materials Science and Engineering A. -2010. -Vol.52. -No.8. -P.1183-1191.
10. A.Nazari, S.Riahi. The role of SiO_2 nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete //Materials Science and Engineering A. -2010. -Vol.52. -No.8. -P.2149-2157.
11. A.Nazari, S.Riahi. The effects of Cr_2O_3 nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media //Materials Science and Engineering A. -2010. -Vol.528. -No.3. -P.1173-1182.
12. Z.H.U.Baolin, H.Xin, G.U.O.Ye. Influence of cement particle size distribution on strength of hardened cement paste //Key Engineering Materials. -2011. -Vol.477. -P.118-124.
13. D.P.Bentz. Blending different fineness cements to engineer the properties of cement-based materials //Magazine of Concrete Research. -2010. -Vol.62. -No.5. -P. 327-338.
14. G.Frigione, S.Marra. Relationship between particle size distribution and compressive strength in portland cement //Cement and Concrete Research. -1976. -Vol.6. -No.1. -P.113-127
15. I.B.Celik. The effects of particle size distribution and surface area upon cement strength development //Powder Technology. -2009. -Vol.6. -No.3. -P.272-276.
16. D.P.Bentza, E.J.Garboczia, C.J.Haeckerb, O.M.Jensenc. Effects of cement particle size distribution on performance properties of portland cement-based materials //Cement and Concrete Research. -1999. -Vol.29. -No.10. -P.1663-1671.
17. Particle size analysis of cement using the technique of laser diffraction. UK: Malvern Instruments, 2014.
18. M.P.Ginebra, F.C.M.Driessens, J.A.Planell. Effect of the particle size on the micro and nanostructural features of a calcium phosphate cement: A kinetic analysis //Biomaterials. -2004. -Vol.25. -No.17. -P.3453-3462.
19. F.Sanchez, K.Sobolev. Nanotechnology in concrete – A review //Construction and Building Materials. -2010. -Vol.24. -P.2060-2071.

О влиянии гранулометрического состава и наноразмерных добавок на качество изоляции затрубного пространства в процессе цементирования скважин

Б.А.Сүлейманов, Э.Ф.Вәлиев
НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Баку, Азербайджан

Реферат

В работе изучены и сравнены два механизма увеличения прочности цементного камня, на примере портландцемента с добавками нано-TiO₂ и нано-SiO₂, а также его различных высокодисперсных модификаций. Приведены результаты изменения прочности цементного камня в течении 1, 2, 7 и 28 суток в зависимости от концентрации нанодобавок, удельной поверхности цементного порошка и изменения распределения частиц, измеренного методом лазерной дифракции. Использование наночастиц SiO₂ и TiO₂ привело к увеличению прочности цемента при ранних стадиях твердения на 35.71% и 37.14%, а при более поздней стадии на 18% и 20% соответственно. Увеличение прочности цементного камня из наиболее мелкодисперсного образца (P-6) по сравнению с обычным цементным порошком (P-1) на 112% и 42% при ранних и поздних стадиях твердения соответственно. Для прогнозирования прочности цементного камня на разных стадиях твердения получены уравнения множественной регрессии, имеющие высокий коэффициент детерминации для ранней и поздней стадии набора прочности R² = 0.92 и R² = 0.95 соответственно.

Ключевые слова: портландцемент, площадь удельной поверхности, прочность цементного камня, нано-частицы TiO₂ и SiO₂, уравнение множественной регрессии.

Quyuların sementlənmə prosesində boruarxası fəzanın izolyasiyasının keyfiyyətinə qranulometrik tərkib və nanoölçülü əlavələrin təsiri haqqında

B.A.Süleymanov, E.F.Vəliyev
«Neftqazəlmütədqiqatlayihə» İnstitutu, SOCAR, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Məqalədə tərkibində nano-TiO₂ və nano-SiO₂ əlavələri olan portlandsementin, həmçinin onun müxtəlif yüksək dispersli modifikasiyalarının təmsalında sement daşının davamlılığının yüksəldilməsinin iki mexanizmi öyrənilmiş və müqayisə edilmişdir. Nano əlavələrin qatılığından asılı olaraq 1, 2, 4 və 28 gün ərzində sement daşının davamlılığının dəyişikliyinə, sement tozunun xüsusi səthi və hissəciklərin paylanması lazer difraksiyası üsulu ilə ölçülmüş dəyişikliyinə nəticələri göstərilmişdir. SiO₂ və TiO₂ nanohissəciyinin istifadəsi bərkimənin ilkin mərhələlərində sementin davamlılığını 35.7% və 37.14%, sonrakı mərhələlərdə isə müvafiq olaraq 18% və 20% yüksəltmişdir. Daha kiçik dispersiya nümunəsi ilə (P-6) olan sement daşının davamlılığının yüksəlməsi adi sement tozu (P-1) ilə müqayisədə bərkimənin ilkin və sonrakı mərhələlərində müvafiq olaraq 112% və 42%-dir. Bərkimənin müxtəlif mərhələlərində sement daşının möhkəmliyinin proqnozlaşdırılması üçün davamlılıq yığımının ilkin və sonrakı mərhələləri üçün müvafiq olaraq R² = 0.92 və R² = 0.95 R² yüksək determinasiya əmsalına malik çoxsaylı reqressiya tənlikləri alınmışdır.

Açar sözlər: portlandsement, xüsusi səth sahəsi, sement daşının davamlılığı, TiO₂ və SiO₂ nano-hissəcikləri, çoxsaylı reqressiya tənliyi.