

УДК 691.22; 544.7

DOI: 10.34824/VKNPIRAN.2023.15.4.008

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ДОБАВКОЙ НАНО- ПОРОШКА КРЕМНИЯ

© Абдуллаев Рамзан Магомедович (а), Абдуллаев Магомед Абдул-Ва-
хабович (b), Абдуллаев Абухан Магомедович (с)

- (а) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. Ибрагимова РАН, науч-
ный сотрудник, ramzan007abd@mail.ru, Грозный
- (b) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. Ибрагимова РАН, науч-
ный сотрудник, mgdaa@mail.ru, Грозный
- (с) Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. Ибрагимова РАН, науч-
ный сотрудник, han-100@mail.ru, Грозный

Аннотация. Наночастицы в получении современных композиционных материалов играет ведущую роль благодаря своим уникальным свойствам. Исследованиями показано наличие наночастиц в порошке полисорба-энтеросорбента. Микрофотографии показывают, что в порошке имеются разные скопления и агломераты, размер наночастиц в которых колеблется от 10 до 50 нм. Кроме того, установлено, что введение гиперпластификатора Frem-Giper S-TB оказывает сильное влияние на значение поверхностного натяжения воды. С увеличением концентрации ПАВ оно плавно опускается от 72,5 мН/м до 43 мН/м. В присутствии Frem Giper S-TB поверхность зерен цемента под влиянием воды сильно разрушается с появлением больших трещин и впадин. Прочностные свойства в результате применения добавки Полисорба в отдельности и в комплексе с гиперпластификатором Frem Giper S-TB сравнительно высоки, отличающиеся от контрольных составов на 19 и 84% соответственно. Основываясь на таких результатах, вероятно, есть возможность использования настоящей комплексной добавки, состоящей из Полисорба и Frem Giper STB в производстве высококачественных композиционных строительных материалов.

Ключевые слова: наночастицы, поверхностное натяжение, полисорб, цементный камень, прочность.

BASIC PROPERTIES OF CEMENT STONE WITH THE ADDITIVE OF SILI- CON NANOPOWDER

© Abdullaev Ramzan Magomedovich (a), Abdullaev Magomed Abdul-Vakhabovich
(b), Abdullaev Abukhan Magomedovich (c)

- (a) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Researcher, ramzan007abd@mail.ru, Grozny
- (b) Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Researcher, mgdaa@mail.ru, Grozny
- (c) H Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Researcher, han-100@mail.ru, Grozny

Abstract. Nanoparticles play a leading role in the production of modern composite materials due to their unique properties. Research has shown the presence of nanoparticles in polysorb-entersorbent powder. Microphotographs show that the powder contains various clusters and agglomerates, the size of nanoparticles in which ranges from 10 to 50 nm. In addition, it was found that the introduction of the hyperplasticizer Frem-Giper S-TB has a strong effect on the surface tension of water. With increasing surfactant concentration, it smoothly drops from 72.5 mN/m to 43 mN/m. In the presence of Frem Giper S-TB, the surface of cement grains under the influence of water is severely destroyed with the appearance of large cracks and depressions. The strength properties resulting from the use of the Polysorb additive alone and in combination with the hyperplasticizer Frem Giper S-TB are relatively high, differing from the control compositions by 19 and 84%, respectively. Based on these results, it is likely that it is possible to use a real complex additive consisting of Polysorb and Frem Giper STB in the production of high-quality composite building materials.

Key words: nanoparticles, surface tension, polysorb, cement stone, strength.

Оптимизация размеров и формы наночастиц при использовании их в виде модификаторов может привести к изменению ряда важнейших свойств уже хорошо известных строительных материалов как цемент, цементный камень и бетон, а также открыть новые области для их применения. Кроме того, важную роль занимают исследования по получению стабильности разрабатываемых наночастиц в целях длительного хранения, а также транспортировки с сохранением заданных физико-механических свойств [1]. Существуют также различные способы повышения сохранности свойств наноразмерных частиц, которые являются неотъемлемой частью при создании наноматериалов [2,3].

При получении цементобетонных смесей важнейшую роль в системе цемент-вода при использовании наночастиц кремния отводят реологии и гидратационным процессам [9-13]. Установлено, что введение наночастиц кремния оказывает влияние на сроки схватывания цементного теста, происходит их сокращение, в результате увеличения объема C-S-H-геля. Данное обстоятельство, очевидно, приводит к интенсификации процессов твердения и повышению прочностных характеристик цементного камня. Также, использование наночастиц сокращает количество новообразований портландита в межконтактной зоне [9,10].

В современном материаловедении в области изучения наночастиц и наноматериалов, а также их применения в цементных композитах. Потому, как полученные определенным способом наночастицы в основном не готовы к применению в целях улучшения качества каких-либо композиционных материалов.

Поэтому, целью настоящих исследований является использование порошка SiO_2 (Полисорб-энтеросорбент) посредством изучения его размерных характеристик под воздействием изменяемых значений поверхностного натяжения воды затворения и дальнейшего применения в качестве модифицирующей добавки в цементный камень.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В представленной работе использованы следующие материалы: ультрадисперсный нанопорошок кремния Полисорб-энтеросорбент [14]. Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного вяжущего применялся портландцемент АО «Чеченцемент» ЦЕМ I 42,5 Н, основные свойства используемого цемента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные свойства цемента

Завод изготовитель и марка	Удельная поверхность $\text{м}^2/\text{кг}$	НГ, %	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	Сроки схватывания, час-мин.		Активность, Мпа, 28 сут	
				начало	конец	сжатие	изгиб
Чеченцемент ЦЕМ I42,5Н	330	25	3100	2-15	3-40	52,6	6,2

Гиперпластификатор Белорусского производства Frem Giper ST-B на основе поликарбоксилатных эфиров, которая вводилась с водой затворения в различных дозировках, по подвижности марка бетонной смеси оставалась постоянной П4 [15, 16]. Из исследованных компонентов была получена бетонная смесь с осадком конуса от 16 до 20 см, что соответствует марке по подвижности П4. В целях определения прочностных характеристик цементного камня изготавливались образцы балочки 4*4*16 см по ГОСТ 30744-2001 на стандартном полифракционном песке по требованиям ГОСТ 6139-03.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Порошок кремния очень плохо держится на поверхности и имеет очень низкую массу. Для получения микрофотографий, перед тем как поставить его в электронный микроскоп Quanta 3D 200i, на специальный столик для микроскопа углеродным скотчем прикрепили металлическую гайку. Утрамбовывая стеклянной палочкой, мелкими порциями набрали слой частиц порошка необходимой толщины. Чтобы при сдувании слабо закрепившиеся зерна порошка не слетали в камеру микроскопа, специально набирали массу толщиной 5 мм и более. При наличии толстого слоя образца, при химическом анализе сканирующий луч микроскопа не пробивает образец.

Ниже представлены микрофотографии порошка кремния полученные на растровом микроскопе.

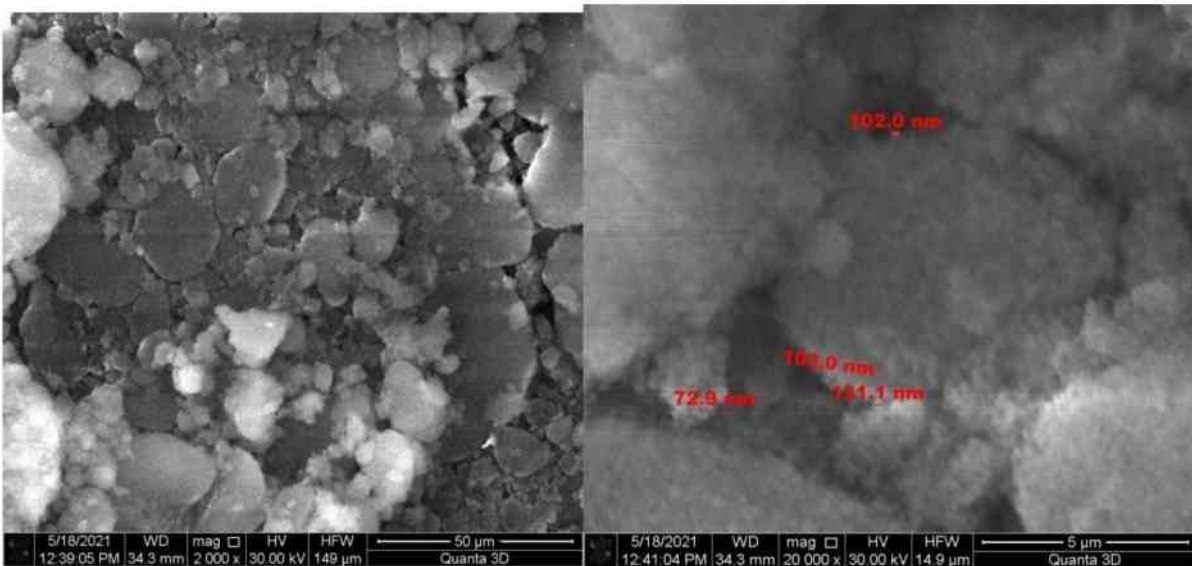


Рис.1. Микрофотографии наночастиц Полисорба с обозначением размеров частиц от 73 нм до 131 нм

Микрофотографии (рис. 1) при разных увеличениях показывают, что порошок имеет наноразмерные частицы, присутствуют агломераты, состоящие из разных размеров, которые показаны на снимке с помощью специальной функции электронного микроскопа. На снимке при маленьком увеличении можно наблюдать крупные, имеющие плоскую форму агломераты, очевидно, полученные при наборе слоя необходимой толщины, утрамбовывая слой за слоем. Также, видно, что средний размер наночастиц колеблется в пределах от 10 до 50 нм.

Переходя к обсуждению результатов связанных с поверхностью цементных зерен, необходимо отметить, что они в процессе самого производства приобретают шероховатую и рельефную поверхность [17]. На их поверхности имеются впадины. Наблюдаются также углубления и трещины различной глубины и ширины, что может способствовать дополнительной активизации гидратационных процессов за счет повышенной проникающей способности воды затворения с изменяемой поверхностной энергией. При введении гиперпластификатора Frem Giper S-TB, вода затворения приобретает низкое значение поверхностного натяжения рис.4, и, следовательно, большую проникающую способность.

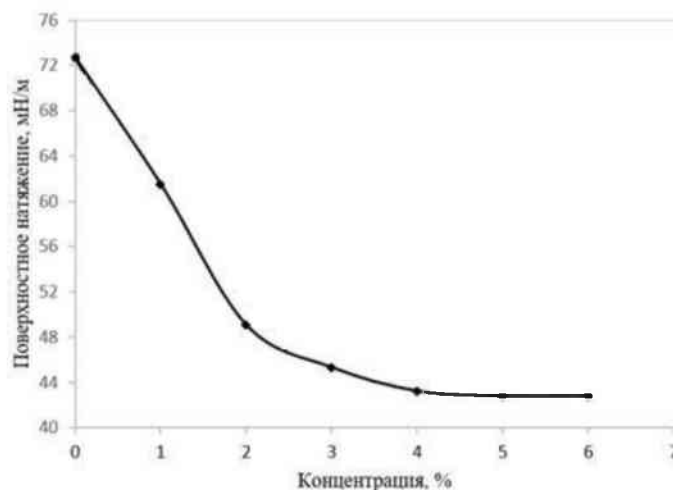


Рис. 2. Влияние различных концентраций Frem Giper S-TB на поверхностное натяжение воды.

По полученным результатам исследования поверхностного натяжения воды в присутствии ПАВ, видно, что с увеличением концентрации ПАВ в воде происходит интенсивное снижение поверхностного натяжения воды. На графике видно, что при отсутствии ПАВ значение поверхностного натяжения равно 72,5 мН/м, при максимальном содержании Frem Giper S-TB поверхностное натяжение воды понижается до 43 мН/м. В используемой воде затворения кроме гиперпластификатора присутствуют наночастицы полисорба с огромным поверхностным зарядом.

Мельчайшие частицы Полисорба имеющие большую поверхностную энергию при введении в состав цементно-песчаной смеси способны взаимодействовать с находящимися вокруг зернами разных размеров цементного порошка. На рис. 5 представлена схема взаимодействия наночастиц Полисорба и цементного зерна.

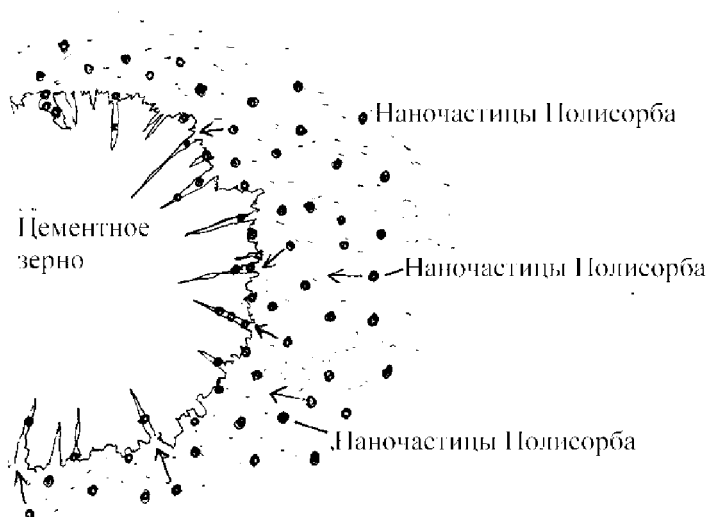
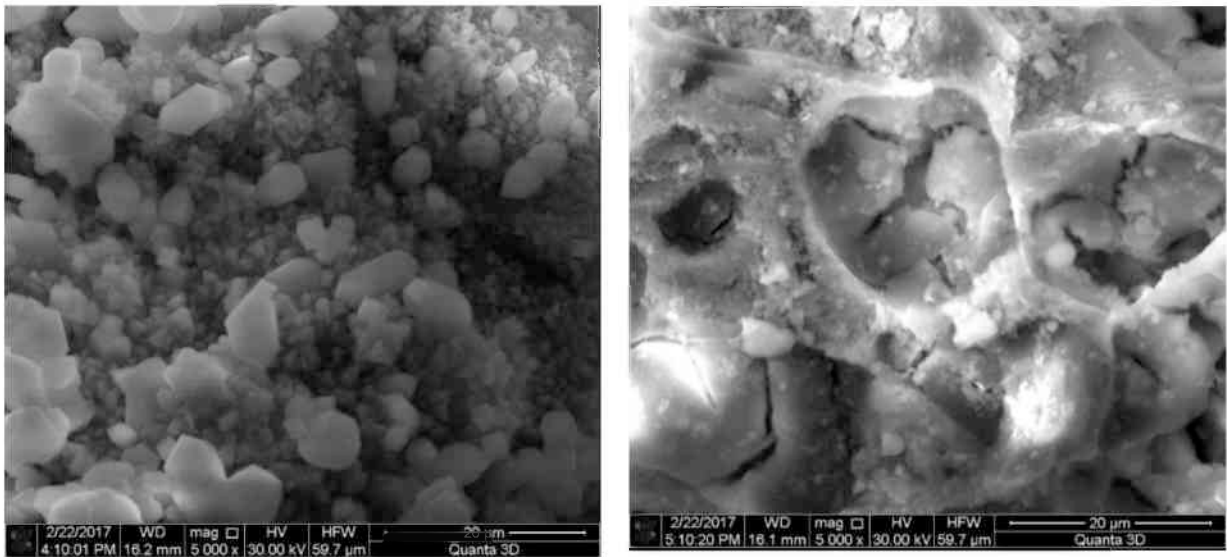


Рис. 3. Схема взаимодействия наночастиц Полисорба с цементным зерном

Мельчайшие частицы с приставкой нано имеют при себе большой величины поверхностный заряд и стремятся сбросить его посредством укрупнения. Следовательно, при введении в цементобетонную смесь наночастицы с большой поверхностной энергией стремятся уменьшить ее, присоединяясь к более крупным частицам (зернам цемента, песка и щебня). Слабозакристаллизованные наночастицы, находящиеся в композиции вместе с другими более крупными зернами, стремятся образовывать большую контактную поверхность. В такой композиции образуются прочные связи между хорошо закристаллизованными и плотными частицами и слабозакристаллизованными наночастицами [18-20].

Кроме этого, наночастицы находящиеся в смеси с цементными зернами способны более глубоко проникать в их трещины и поры вследствие утончения пленки воды за счет снижения поверхностного натяжения и более широкой раскрываемости трещин и пор цементных зерен. На рис 4 представлена микрофотография цементного зерна находившегося в обычной воде и в воде с гиперпластификатором.



а)-цементное зерно 3 часа в обычной воде

б)-цементное зерно 3 часа в воде с Frem Giper S-TB

Рис.4. Цементное зерно после 3 часов в воде и в воде добавкой гиперпластификатора Frem Giper S-TB

Здесь, при одинаковом увеличении видно, что вода с низким поверхностным натяжением сильно влияет на рельеф цементного зерна. Поверхность зерна находившегося в обычной воде без добавок полностью покрыта смесью из мелких частиц, также имеются скопления из мелких зародышей кристаллов, которые слабо закреплены на поверхности.

Цементные зерна, находившиеся 3 часа в воде совместно с гиперпластификатором имеют на поверхности разрывы и трещины. Поверхность более чиста от присутствия мелких частиц, покрыта гелеобразной шубой, местами разорванной и имеющая глубокие впадины и трещины. Именно такая поверхность способна к более глубокому втягиванию вовнутрь себя водонасыщенные мелкие наночастицы. Вероятно, что наночастицы, имеющие при себе большую поверхностную энергию, находясь в смеси с цементными зёрнами, стремясь снизить ее будут прилипать (как представлено на схеме Рис. 3) к поверхности цементных зёрен, на которых имеются большие впадины и трещины (Рис.4). Наночастицы Полисорба проникая, в трещины и впадины, будут нести вглубь цементных зёрен также и некоторый объем воды, который будет способствовать более глубокой гидратации. Кроме того, проникновение на разную глубину и мощное взаимодействие наночастиц и зёрен цемента приводит к активизации взаимодействия между всеми компонентами цементобетонной смеси.

В целях установления влияния добавки Полисорба на прочностные свойства цементного камня были проведены исследования, представленные в таблице 2. Объектом исследования послужил цементно-песчаный раствор на заполнителе из стандартного полифракционного песка.

Таблица 2. Прочностные свойства цементного камня

Цемент, г	Песок, г	Вода, г	Frem-Gip.S-TB, %	Полисорб-энтетеросорбент,	Прочность, МПа, $\frac{\text{сжатие}}{\text{изгиб}}$	
					1 сут.	28 сут.

			мас.от цемента	% мас. от це- мента		
450	1350	225			$\frac{3,59}{1,15}$	$\frac{30,12}{5,24}$
450	1350	173	0,5		$\frac{9,87}{3,19}$	$\frac{41,52}{5,69}$
450	1350	170,5	0,6		$\frac{11,29}{3,42}$	$\frac{46,89}{6,08}$
450	1350	168	0,7		$\frac{10,15}{3,26}$	$\frac{45,14}{5,29}$
450	1350	225		0,05	$\frac{3,95}{1,54}$	$\frac{34,72}{5,46}$
450	1350	225,5		0,1	$\frac{4,16}{1,63}$	$\frac{35,97}{5,78}$
450	1350	225,5		0,15	$\frac{4,04}{1,59}$	$\frac{33,81}{5,52}$
450	1350	168	0,6	0,1	$\frac{13,78}{3,52}$	$\frac{55,52}{6,15}$

По результатам, приведенным в таблице 2 видно, что образцы на основе добавки Полисорба имеют практически одинаковую по сравнению с бездобавочным образцом водопотребность, превышающую лишь на 0,5 г. При использовании Frem-Giper S-TB и Полисорба в комплексе, водопотребность образцов отличается от значений контрольного состава на 25%. Такие изменения, вероятно, могут привести к более высоким показателям плотности и прочности получаемого цементного камня. Кроме того, эти образцы отличаются еще и более высокими показателями прочности. По таблице 2 видно, что прочность на сжатие цементного камня на основе Полисорба через 1 и 27 суток твердения в нормальных условиях выше значений контрольных образцов на 41 и 19% соответственно. Прочность на изгиб при этом также отличается на 46 и 10% соответственно. При комплексном использовании Полисорба и гиперпластификатора Frem Giper S-TB достигнуты сравнительно более высокие показатели прочности, что коррелируется с изменениями в водопотребности этих составов. Цементный камень на основе комплексного использования настоящих добавок имеет прочность на 283% превышающую на первые сутки твердения и на 84% после 27 суток твердения. Прочность на изгиб при этом отличается от контрольных составов после 1 и 28 суток нормального твердения на 206 и 17% соответственно. Отметим, что введение небольшого количества Frem Giper S-TB в комплексе с наночастицами Полисорба повышает пластичность смеси, тогда как в присутствии одного Полисорба водопотребность смеси увеличивается, обуславливая необходимость использования пластификаторов. Такие результаты показывают, что комплексная добавка, состоящая из гиперпластификатора Frem Giper S-TB и наночастиц полисорба имеет большую эффективность и может быть использована в производстве композиционных материалов при получении высококачественных бетонных композитов.

ВЫВОДЫ

В присутствии Frem Giper S-TB поверхность зерен цемента под влиянием воды сильно разрушается с появлением больших трещин и впадин. Это является следствием сильного снижения поверхностного натяжения воды при введении ПАВ. Прочностные свойства в результате применения добавки Полисорба в отдельности и в комплексе с гиперпластификатором Frem Giper S-TB значительно высокие, отличающиеся от контрольных на 19 и 84% соответственно. Основываясь на таких результатах можно констатировать возможность использования настоящей комплексной добавки, состоящей из Полисорба и Frem Giper STB в производстве высококачественных композиционных строительных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chao Y. // Optical Properties of Nanostructured Silicon. *Comprehensive Nanoscience and Technology*. 2011. Chapter 1.16. P. 543–570.
2. Munir H. Nayfeh, Lubos Mitras // Silicon Nanoparticles: New Photonic and Electronic Material at the Transition Between Solid and Molecule. *Nanosilicon*. 2008. P. 1–78.
3. Anoop Gupta, Hartmut Wiggers. // Surface chemistry and photoluminescence property of functionalized silicon nanoparticles. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2009. V. 41. № 6. P. 1010–1014.
4. Byoung-Jung Choi, Jung-Hui Lee, Kiyoshi Yatsui, Sung-Chae Yang. // Preparation of silicon nanoparticles for device of photoluminescence. *Surface and Coatings Technology*. 2007. V. 201. № 9–11. P. 5003–5006.
5. Laurence M. Peter, D. Jason Riley, Paul A. Snow. // Potential induced tuning of the luminescence of porous silicon: A simultaneous study of electroluminescence and photoluminescence emission. *Electrochemistry Communications*. 2000. V. 2. № 7. P. 461–465.
6. Toshiharu Makino, Yuka Yamada, Nobuyasu Suzuki, Takehito Yoshida, Seinosuke Onari. // Electroluminescence of monodispersed silicon nanocrystallites synthesized by pulsed laser ablation in inert background gas. *Applied Surface Science*. 2002. V. 197–198. P. 594–597.
7. Seto T., Hirasawa M., Aya N., Suzuki N., Yoshida T., Kawakami Y., Ozawa E. // Synthesis of size-selected silicon nanoparticles by laser ablation. *Journal of Aerosol Science*. 2000. V. 31. № 1. P. 628–629.
8. Dian J., Macek A., Nižňanský D., Němec I., Vrkoslav V., Chvojka T., Jelínek I. // SEM and HRTEM study of porous silicon – relationship between fabrication, morphology and optical properties. *Applied Surface Science*. 2004. V. 238. № 1–4. P. 169–174.
9. Флорес-Вивиан И., Прадото Р., Моини М., Кожухова М.И., Потапов В.В., Соболев К.Г. Влияние SiO₂- наночастиц на свойства цементных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 6–16.
10. Ismael Flores-Vivian, Rani GK Pradoto, Mohamadreza Moini, Marina Kozhukhova, Vadim Potapov, Konstantin Sobolev The effect of SiO₂ nanoparticles derived from hydrothermal solutions on the performance of portland cement based materials // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017. 11 (4): 436–445.

11. Потапов В.В., Горев Д.С., Туманов А.В., Кашутин А.Н., Горева Т.С. Получение комплексной добавки для повышения прочности бетона на основе нанодисперсного диоксида кремния гидротермальных растворов // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 9-2. – С. 404-409.
12. Горев Д.С., Потапов В.В., Горева Т.С., Портнягин Н.Н. Повышение характеристик бетонов вводом наночастиц SiO₂ // *Современные наукоемкие технологии*. – 2018. – № 7. – С. 26-30.
13. Пивинский Ю.Е., Белецкая Е.А., Дороганов В.А., Шаповалова Л.Н. Композиционные материалы на основе кремнистых вяжущих суспензий. Всероссийское совещание «Наука и технол. силикат, матер, в современ. условиях рыночной экономики». Москва 6-9 июня, 1995: Тез. докл. М., 1995. С. 32-33.
14. <https://www.polisorb.com>. 13.09.2022 г.
15. Каприелов С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Ч. II / С.С. Каприелов [и др.] // *Строительные материалы*. – 2008. – №3. – С.9-13.
16. Tironi A. Hydration of ternary cements elaborated with limestone filler and calcined kaolinitic clay / A. Tironi, A.N. Scian, E.F. Irassar // *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*. Beijing, China, 2015. – 320 p.
17. Межидов В.Х., Абдуллаев А.М. Особенности формирования зерен портландцемента при совместном помолу клинкера и гипсового камня. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2017. № 3 (699). С. 5-13.
18. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высокопрочные бетоны/ М.: изд. Ассоциации строительных вузов. 2006. – 368 с.
19. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. 188с.
20. Рамачандран В. Добавки к бетону: Пер. с англ. Т.И. Розенберг, С.А. Болдырева; Под ред. А.С. Болдырева и В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1988. – 563с.

REFERENCES

1. Chao Y. // *Optical Properties of Nanostructured Silicon*. Comprehensive Nanoscience and Technology. 2011. Chapter 1.16. P. 543–570.
2. Munir H. Nayfeh, Lubos Mitas // *Silicon Nanoparticles: New Photonic and Electronic Material at the Transition Between Solid and Molecule*. Nanosilicon. 2008. P. 1–78.
3. Anoop Gupta, Hartmut Wiggers. // *Surface chemistry and photoluminescence property of functionalized silicon nanoparticles*. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2009. V. 41. № 6. P. 1010–1014.
4. Byoung-Jung Choi, Jung-Hui Lee, Kiyoshi Yatsui, Sung-Chae Yang. // *Preparation of silicon nanoparticles for device of photoluminescence*. Surface and Coatings Technology. 2007. V. 201. № 9–11. P. 5003–5006.
5. Laurence M. Peter, D. Jason Riley, Paul A. Snow. // *Potential induced tuning of the luminescence of porous silicon: A simultaneous study of electroluminescence and photoluminescence emission*. Electrochemistry Communications. 2000. V. 2. № 7. P. 461–465.

6. Toshiharu Makino, Yuka Yamada, Nobuyasu Suzuki, Takehito Yoshida, Seinosuke Onari. // Electroluminescence of monodispersed silicon nanocrystallites synthesized by pulsed laser ablation in inert background gas. *Applied Surface Science*. 2002. V. 197–198. P. 594–597.
7. Seto T., Hirasawa M., Aya N., Suzuki N., Yoshida T., Kawakami Y., Ozawa E. // Synthesis of size-selected silicon nanoparticles by laser ablation. *Journal of Aerosol Science*. 2000. V. 31. № 1. P. 628–629.
8. Dian J., Macek A., Nižňanský D., Němec I., Vrkoslav V., Chvojka T., Jelinek I. // SEM and HRTEM study of porous silicon – relationship between fabrication, morphology and optical properties. *Applied Surface Science*. 2004. V. 238. № 1–4. P. 169–174.
9. Flores-Vivian I., Pradoto R., Moini M., Kozhukhova M.I., Potapov V.V., Sobolev K.G. Vliyanie SiO₂-nanochastits na svoystva tsementnykh materialov // *Vestnik BGTU im. V.G.Shukhova*. 2018. №11. S.6-16.
10. Ismael Flores-Vivian, Rani GK Pradoto, Mohamadreza Moini, Marina Kozhukhova, Vadim Potapov, Konstantin Sobolev The effect of SiO₂ nanoparticles derived from hydrothermal solutions on the performance of portland cement based materials // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2017. 11 (4): 436–445.
11. Potapov V.V., Gorev D.S., Tumanov A.V., Kashutin A.N., Goreva T.S. Polucheniye kompleksnoy dobavki dlya povysheniya prochnosti betona na osnove nanodispersnogo dioksida kremniya gidrotermal'nykh rastvorov // *Fundamental'nyye issledovaniya*.-2012.-№9-2.-S.404-409.
12. Gorev D.S., Potapov V.V., Goreva T.S., Portnyagin N.N. Povysheniye kharakteristik betonov v vodom nanochastits SiO₂ // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*.-2018.-№7.-P.26-30.
13. Pivinskiy Yu.Ye., Beletskaya Ye.A., Doroganov V.A., Shapovalova L.N. Kompozitsionnyye materialy na osnove kremnistykh vyazhushchikh suspenziy. Vserossiyskoye soveshchaniye «Nauka i tekhnologii silikatnykh materialov v sovremennykh usloviyakh rychnoy ekonomiki». Moskva 6-9 iyunya, 1995: Tezisy doklada M., 1995. S.32-33.
14. <https://www.polisorb.com>. 13.09.2022g.
15. Kapriyev S.S. Modifitsirovannyye vysokoprochnyye betony klassov B80 i B90 v monolitnykh konstruksiyakh. Ch.P // S.S. Kapriyev [I dr.] // *Stroitel'nyye materialy*. – 2008. - №3. – S.9-13.
16. Tironi A. Hydration of ternary cements elaborated with limestone filler and calcined kaolinitic clay / A. Tironi, A.N. Scian, E.F. Irassar // *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*. Beijing, China, 2015. – 320 p.
17. Mezhidov V.Kh., Abdullayev A.M. Osobennosti formirovaniya zeren portlandtsementa pri sovместnom pomole klinkera i gipsovogo kamnya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2017. №3 (699). S. 5-13.
18. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modifitsirovannyye vysokoprochnyye betony / M.: izd. Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov. 2006. – 368 s.
19. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Dobavki v beton. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Stroyizdat, 1989.
20. Ramachandran V. Dobavki k betonu: Per. s angl. T.I. Rozenberg, S.A. Boldyreva; Pod red. A.S. Boldyreva i V.B. Ratinova. – M.: Stroyizdat, 1988. -563s.