

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ МУНТ И SiO₂ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА: ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ

Е. Н. Полонина¹, С. Н. Леонович², В. В. Потапов³, С. А. Жданок⁴

¹ Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологии строительства Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: grushevskaya_en@tut.by

² Д. т. н., профессор, декан строительного факультета

Белорусского национального технического университета, Минск, Беларусь, e-mail: sleonovich@mail.ru

³ Д. т. н., профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского геотехнологического центра ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, e-mail: vadim_p@inbox.ru

⁴ Д. физ.-мат. н., профессор, академик НАН Беларуси, главный научный сотрудник

ООО «Передовые исследования и технологии», Беларусь, Минск, Беларусь, e-mail: ceo@art-pte.com

Реферат

Применение комбинированной добавки, содержащей малые дозы наночастиц (НЧ) SiO₂ и многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), позволило улучшить технологию портландцементного композита за счет синергетического влияния на наноструктуру геля гидросиликатов кальция. Для обоснования механизма действия наночастиц были выдвинуты различные гипотезы, которые в совокупности были подтверждены комплексом приборных методов нанотехнологий: методом ИК-спектроскопии установлено, что ввод наночастиц повышает кинетику и степень их поликонденсации кремнекислородного тетраэдра; методом рентгенофазового анализа – снижение отношения Ca/Si и повышение упорядоченности структуры CSH-геля; методом наноиндентирования – существенное смещение объемной доли фаз CSH геля в область больших средних значений M и H и уменьшение отношения StDev/M, H для выделенных фаз, что свидетельствует о большей плотности упаковки частиц геля более высокой структурированности вещества геля, и может быть соотнесено с различиями характеристик (E, G, ρ, f_c, f_i) портландцементного композита.

Ключевые слова: комбинированная добавка, наночастицы SiO₂, многослойные углеродные нанотрубки, синергия.

SYNERGETIC EFFECT OF THE EFFECT OF MUNT AND SiO₂ NANOPARTICLES ON CHARACTERISTICS OF PORTLAND CEMENT COMPOSITE: EXPERIMENT AND THEORETICAL EXPLANATION

E. N. Polonina, S. N. Leonovich, V. V. Potapov, S. A. Zhdanok

Abstract

The use of a combined additive containing small doses of SiO₂ nanoparticles (NPs) and multiwalled carbon nanotubes (MWNTs) made it possible to improve the technology of Portland cement composite due to the synergistic effect of calcium hydrosilicates on the nanostructure of the gel. To substantiate the mechanism of action of nanoparticles, various hypotheses were put forward, which, taken together, were confirmed by a complex of instrumental methods of nanotechnology: it was found by IR spectroscopy that the introduction of nanoparticles increases the kinetics and degree of their polycondensation of the silicon-oxygen tetrahedron; X-ray phase analysis - reduction of the Ca/Si ratio and increase in the orderliness of the CSH gel structure; by the nanoindentation method - a significant shift in the volume fraction of the CSH phases of the gel to the region of large average values of M and H and a decrease in the StDev/M, H ratio for the isolated phases, which indicates a higher packing density of the gel particles, a higher structuring of the gel substance, and can be correlated with the differences in characteristics (E, G, ρ, f_c, f_i) of the portland cement composite.

Keywords: combined additive, SiO₂ nanoparticles, multilayer carbon nanotubes, synergy.

Введение

Ввод наночастиц (НЧ) разного химического состава с высокой удельной площадью поверхности (до 1000 м²/г) и высокой физико-химической активностью поверхности в водоцементную систему стал перспективным приемом повышения характеристик цементных материалов [1-5].

Эффективным набором методов исследования влияния используемых наночастиц на структурные характеристики цементных материалов были приняты [6–18]:

- рентгенофазовый анализ и термогравиметрия, позволяющие определять содержание клинкерных минералов, гидратной воды и портландита и оценивать влияние наночастиц на кинетику гидратации алита и скорость пуццолановой реакции [19–20];
- ИК-спектроскопия в сочетании с ЯМР изотопа ²⁹Si, позволяющие оценить эффект ускорения поликонденсации и повышения степени поликонденсации кремнекислородных тетраэдров и повышения координационного числа атома Si, т. е. параметров упорядоченности внутренней структуры наногранул CSH-геля, как следствие, объемной плотности упаковки наногранул [21];
- метод наноиндентирования, дающий прямую количественную информацию о механических характеристиках (приведенный модуль упругости, твердость) и объемной доли разных фаз CSH-геля и ультразвуковые исследования [22–23].

Материалы и методы

При проведении исследований влияния НЧ на свойства бетона применялись следующие компоненты: в качестве вяжущего – портландцемент ПЦ 500 Д0, мелкого заполнителя – природный песок, крупного заполнителя – щебень гранитный фракцией 5–20 мм; модифицирующие вещества – золь гидротермального нанокремнезема (NS), производитель ООО НПФ «Наносилика» РФ (ТУ 2111-001-97849280-2014), и углеродный наноструктурированный материал (NC) МУНТ, производимый отечественной компанией «Передовые исследования и технологии» (ТУ ВУ 691460594.002-2016); а также суперпластификатор (СП) на основе поликарбоксилатного сополимера (SP) и вода затворения.

Гипотезы и результаты

Первая и вторая предложенные версии могли бы быть справедливыми при больших дозах наночастиц.

Версия 1: Как известно, большие молекулы полимеров свернуты в клубки. Добавки суперпластификаторы не являются исключением. Как установлено [24, 25], с увеличением молекулярной массы молекулы добавок пластификаторов сворачиваются, при этом количество активных функциональных групп молекулы уменьшается, снижается дипольный момент молекулы и пластифицирующая эффективность в цементном геле.

Под действием кавитации или постоянного магнитного поля молекулы полимеров способны распрямиться [26], при этом количество

активных функциональных групп возрастает, а следом и пластифицирующая способность добавки (что установлено авторами).

Наночастицы УНМ способны к сильной агрегации. Кавитационная обработка в ультразвуковом поле разрушает агрегаты частиц, растет количество активных центров с большой поверхностной энергией. Кроме того, в процессе обработки наночастицы способны, видимо, адсорбироваться на поверхности молекулы пластификатора.

Далее, как установлено зарубежными исследователями [27], частицы УНМ с карбоксильными группами ускоряют образование гидросиликатов кальция, т. е. являются центрами кристаллизации.

Поскольку энергия взаимодействия функциональных групп добавок пластификаторов с гидратированной поверхностью C_3S в два раза превышает энергию взаимодействия воды, в соответствии с работами [28, 29] можно рассмотреть вариант проникновения органических молекул добавки в структуру геля CSH с выталкиванием оттуда некоторого количества воды.

Версия 2: Молекула пластификатора на основе поликарбоксилатного эфира, обладая достаточными размерами, является своего рода блокатором на поверхности цементного зерна, оттягивая время наступления индукционного периода гидратации. Наблюдается интенсивное растворение клинкерных минералов. Но при этом нет блокирующей оболочки из пленки CSH. Кроме того, наночастицы выступают в качестве центров кристаллизации. Возможность более интенсивного растворения цементного зерна с последующим прессыщением позволяет прогнозировать увеличение количества т. н. внешнего CSH. Изменение времени индукционного периода, которое как раз и вызвано образованием высокоосновных гидросиликатов в традиционных цементных системах, приводит к снижению основности CSH, отсюда и более тонкозернистая однородная морфология продуктов гидратации [30].

На основании предложенных версий и собственных экспериментов доказано – синергетический эффект действия комбинированной добавки основывается на вкладе каждого из ее компонентов в процесс образования и дальнейшей эволюции C-S-H-геля (т. е. каждый из них выполняет свою функцию) [19–22, 31, 32]:

- наночастицы SiO_2 из-за малых размеров (по диаметру 5 нм) и избытка поверхностной энергии ($500 \text{ м}^2/\text{г}$) создают дополнительные центры новообразования; в то же время, имея шарообразную форму, частицы оксида кремния могут входить в гелевые поры, т. е. в пространство между наногранулами CSH геля, способствуя росту его упругих свойств;
- наночастицы МУНТ также обладают высоким энергетическим потенциалом, особенно на изломе трубок, способствуют ускорению и углублению реакции цемента с водой (физический процесс воздействия);
- наночастицы SiO_2 и в большей степени наночастицы МУНТ увеличивают степень полимеризации гидросиликатов кальция и координационное число атома Si;
- поликарбоксилатный суперпластификатор интенсифицирует образование новой фазы в приповерхностных областях зерен цемента за счет стерического эффекта и электростатического отталкивания и ускорения кинетики гидратации алита и белита.

Как показали результаты исследования структуры цементного камня методом РФА (рисунок 1), комбинированная добавка способствует повышению доли низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(I) и томберморитподобных структур с пониженными значениями отношения Ca/Si в составе фаз CSH-геля, а также повышению упорядоченности структуры наночастиц и фаз CSH-геля.

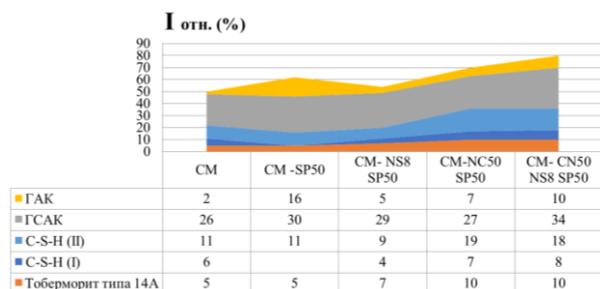


Рисунок 1 – Влияние добавок на относительную интенсивность дифракционных пиков для фаз ГАК (гидроалюминат кальция), ГСАК (гидросульфалюминат кальция), томберморит типа 14А, C-S-H (II) и CSH(I) в возрасте 28 суток

Повышение интенсивности пиков фаз с низким отношением Ca/Si и увеличение базельных расстояний согласуется с результатами ИК-спектроскопии, показавшими более высокую степень полимеризации кремнекислородных тетраэдров в образцах, модифицированных наночастицами, и, соответственно, более высокую упорядоченность структуры CSH-геля на разных стадиях созревания бетона (рисунок 2).

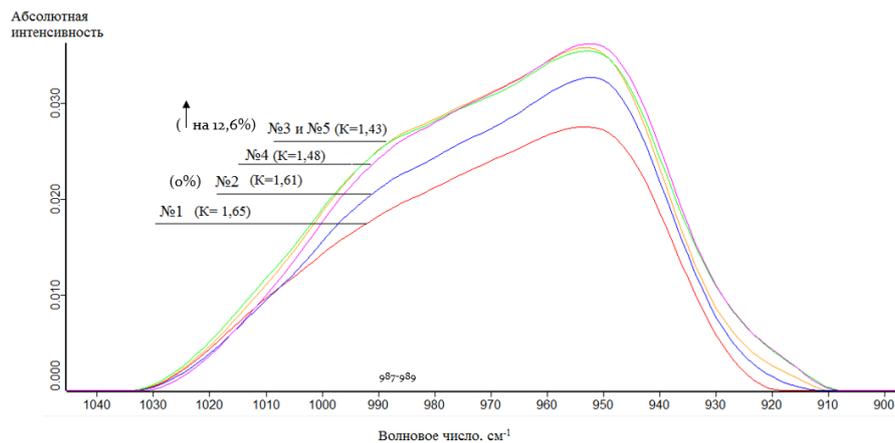
Для возраста 28 сут в ИК-спектрах образцов № 29–33 (рисунок 2) выделены две точки перегиба в районе $993\text{--}996 \text{ см}^{-1}$, $1016\text{--}1018 \text{ см}^{-1}$, расположенные в более коротковолновой области по сравнению с точкой перегиба в возрасте 1 сут. Это указывало на переход гидросиликатов со степенями поликонденсации кремнекислородных тетраэдров, близким к 1, наблюдавшихся в ИК-спектрах в возрасте 1 сут, за счет их объединения в структуры с более высокой степенью поликонденсации (28 сут.). По отношению абсолютных интенсивностей в основном максимуме содержания гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации n_1 в образце состава № 31 (СП + НЧ SiO_2) было выше по сравнению с образцом состава № 30 (СП, без НЧ) на 14,6 %. Содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации n_4 , соответствующей первой точке перегиба, в образцах состава № 31 (СП + НЧ SiO_2), № 32 (СП + НЧ МУНТ) по сравнению с образцом состава № 30 было выше на 18,1; 10,4 %. По величине коэффициента K_1 отношение содержаний гидросиликатов со степенью поликонденсации n_4 и n_1 для образца состава № 33 было выше для образца состава № 30 на 20 % (12,6 % в возрасте 1 сут.) вследствие более высокой скорости поликонденсации ККТ кремнекислородных тетраэдров в образцах, модифицированных комбинацией наночастиц (SiO_2 + МУНТ). Содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации кремнекислородных тетраэдров n_5 , соответствующих второй точке перегиба, было выше на 13,3 % в образце состава № 31 по сравнению с образцом 30. По величине коэффициента K_2 доля гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации ККТ n_5 по отношению к гидросиликатам со степенью поликонденсации n_1 выше на 24,4 % в образце № 33, по сравнению с образцом, вследствие ускорения кинетики поликонденсации ККТ и образования структур с повышенной степенью поликонденсации n_5 в присутствии комбинации наночастиц SiO_2 + МУНТ.

Вследствие этого возрастает объемная плотность укладки частиц CSH, увеличиваются модуль упругости в фазах геля, механические характеристики и трещиностойкость бетона (рисунок 3).

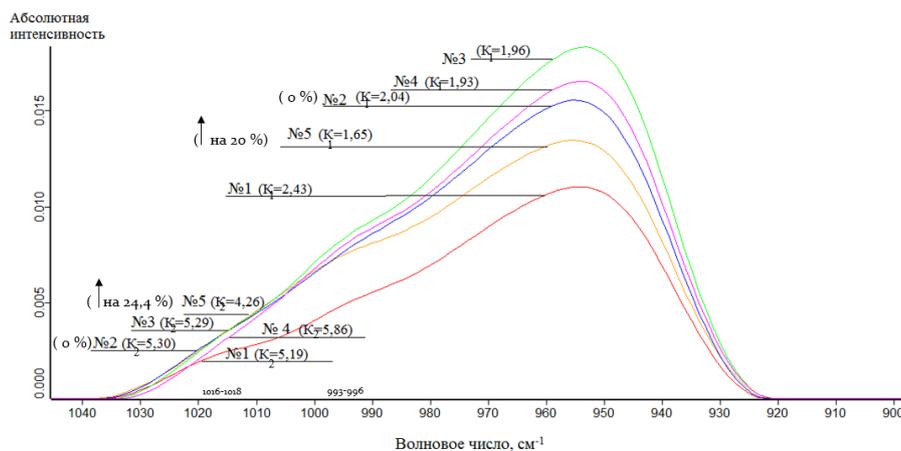
Полученные результаты показывают, что гистограммы распределения объема по приведенному модулю упругости M (и твердости H) в модифицированных образцах сдвинулись в область больших средних значений по сравнению с образцом, содержащим только СП (состав № 30). При этом уменьшилась объемная доля фазы 1 с меньшими средними значениями M (H) и возросла объемная доля фаз 2 и 3 с большими средними значениями M (H) и с более плотной объемной упаковкой частиц геля CSH, более высокой структурированности вещества геля и может быть соотнесено с различиями характеристик (E , G , ρ , f_c , f_t). Повышение модуля упругости указывает на снижение коэффициента ползучести бетона, что важно при длительном стоянии конструкции под нагрузкой.

При испытаниях комплексной добавки в бетонных составах были достигнуты необходимые по ГОСТам реологические показатели:

- подвижность по удобоукладываемости класса П4–П5 при сохранности 180 мин., для самоуплотняющихся смесей – Р6 при сохранности 120 мин.; класса по вязкости, определяемые по времени Т500 (времени, необходимому для распыла стандартного конуса бетонной смеси до диаметра 500 мм) – VS1 (1,25–2,14), класса по способности бетонной смеси преодолевать препятствия, определяемые способностью преодолевать сопротивление арматурных стержней в L-образном ящике – РА1 (0,64–0,98), класса по устойчивости к расслаиванию, определяемые при испытании бетонной смеси на устойчивость к расслаиванию с использованием сита – SR1 (2,3–10,0 %);
- раннюю прочность бетона при сжатии (f_c) увеличивали до 60 % по сравнению с добавками, используемыми на БелАЭС; прочность при сжатии в возрасте 28 суток до 39,5 %; прочность бетона при осевом растяжении доводили до 2,9 МПа; прочность бетона на растяжение (f_t) при четырехточечном изгибе до 6,5 МПа; повышение марки бетона по водонепроницаемости и морозостойкости до W20 и до F500 соответственно.



а)



б)

а) в возрасте 1 сут; б) в возрасте 28 сут для
 образца № 1 – контрольный, без наночастиц СМ (красный);
 образца № 2 – содержащего только СП СМ-SP (синий),
 образца № 3 – содержащего СП + НК СМ-NS8 SP50 (зеленый),
 образца № 4 – содержащего СП+МУНТ СМ-NC50 SP50 (розовый),
 образца № 5 – содержащего СП+ МУНТ+НК СМ-NC50 NS8 SP50 (оранжевый)

Рисунок 2 – Сравнение контура полосы поглощения валентных колебаний кремнекислородного тетраэдра по абсолютным интенсивностям гидратированных:

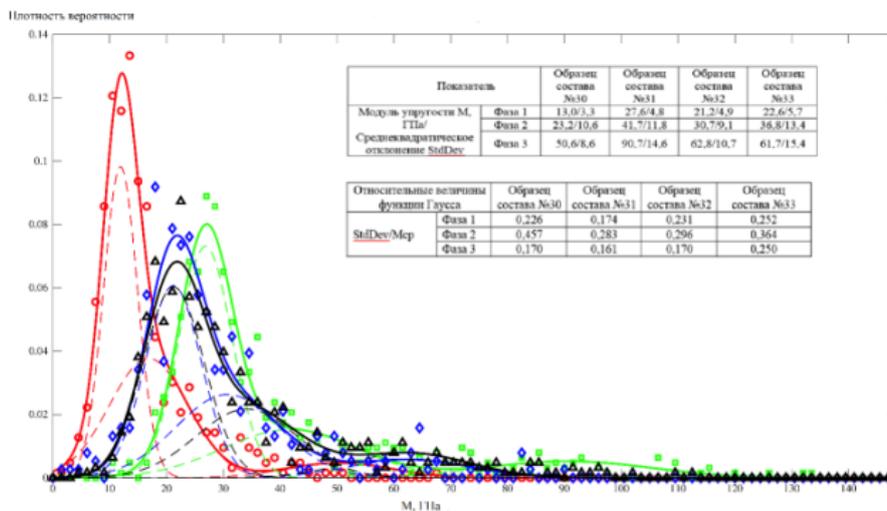


Рисунок 3 – Гистограмма распределения точек наноиндентирования по модулю упругости М для образцов в возрасте 4 месяца составов СМ- SP – № 30 (красный); СМ- NS8 SP50 – № 31 (зеленый); СМ- NC50 SP50 – № 32 (синий); СМ- NC50 NS8 SP50 – № 33 (черный)

Выявлено, что приращение прочности бетона в случае применения комбинации наночастиц SiO_2 и МУНТ превышало сумму приращений вводе наночастиц SiO_2 и МУНТ отдельно в возрасте 1 сут. до 35 %, 7 сут. – 15,0 %, 28 сут. – 14,6 %. При этом установлено, что введение комплексной добавки обеспечивает рост прочности к проектному возрасту для цементного бетона до 57 %, по сравнению с бетоном, содержащим равное количество применяемого в добавке пластификатора, и до 77 % в сравнении с бетоном без добавок.

Трещиностойкость бетона по значениям коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) K_{Ic} при нормальном отрыве для варианта ввода комбинации наночастиц SiO_2 и МУНТ по сравнению с вариантом ввода наночастиц МУНТ отдельно была выше на 15,6 %.

Заключение

На этом основании можно сделать вывод, что модифицирование структуры и улучшение свойств портландцементного бетона, за счет прямого действия комбинированной добавки на скорость формирования и характеристики структуры геля гидросиликатов кальция может привести к развитию технологии бетона.

Экспериментально обоснован механизм повышения прочности модифицированных цементных композитов комплексом методов:

- по РФА – комбинированная добавка способствуют повышению доли низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(I) и томберит-подобных структур с пониженными значениями отношения Ca/Si в составе фаз CSH-геля, повышению упорядоченности структуры наночастиц и фаз CSH-геля;
- ИК спектральным анализом за счет повышения скорости и степени полимеризации-поликонденсации кремнекислородных тетраэдров – продуктов гидратации алита, приводящей к повышению упорядоченности и однородности структуры, формы частиц CSH-геля и самого CSH-геля;
- методом упругих уз-волн повышение модулей E и G ;
- методом наноиндентирования – повышением модуля упругости и твердости CSH-геля, которые прямо пропорциональны объемной плотности упаковки наночастиц.

Таким образом, за счет изменения в структуре цементного композита повысили модуль упругости, пределы прочности при сжатии и изгибе, КИН, водонепроницаемость, морозостойкость при достижении ГОСТовских показателей свежей бетонной смеси; повышение E , f , КИН создает основу для утонения конструкций и сокращения расхода портландцемента.

Список цитированных источников

1. Engineering of SiO_2 Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials / K. Sobolev [et al.] // *Nanotechnology in Construction* 3. – 2009. – P. 139–148.
2. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World / K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2009. – P. 113–116.
3. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World// K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2009. – P. 117–120.
4. Sobolev, K. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites / K. Sobolev, R. Hermosillo, L. M. Torres-Martinez // *Proceedings of ASI Session on «Nanotechnology Concrete: Recent Developments and Future Perspectives»*. – 2006. – P. 117–120.
5. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev // *Construction and Building Materials*. – 2010. – Vol. 24, №5. – P. 2060–2071.
6. Combinatorial molecular optimization of cement hydrates / M. J. Abdolhosseini Qomi [et al.] // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5, № 4960. – P. 1–10.
7. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement / J. Björnström [et al.] // *Chemical Physics Letters*. – 2004. – Vol. 392, № 1–3. – P. 242–248.
8. Effect of particle size of nanosilica on microstructure of C-S-H and its impact on mechanical strength / U. Sharma [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – Vol. 97. – P. 312–321.
9. Effect of Particle Size of Silica Nanoparticles on Hydration Reactivity and Microstructure of C-S-H Gel / U. Sharma [et al.] // *Advances in Civil Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 8, № 3. – P. 346–360.
10. Sharma, U. Formation of C–S–H nuclei using silica nanoparticles during early age hydration of cementitious system / U. Sharma, D. Ali, L. P. Singh // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2019. – P. 1–13.
11. Quantification and characterization of C-S-H in silica nanoparticles incorporated cementitious system / L. P. Singh [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2017. – Vol. 79. – P. 106–116.
12. Ulm, F.-J. Concrete innovation potential: from atoms to green infrastructure / F.-J. Ulm // *Beton-UND Stahlbetonbau*. – 2012. – Vol. 107. – P. 504–509.
13. A realistic molecular model of cement hydrates / R.J.M. Pelleng [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2009. – Vol. 106, № 38. – P. 16102–16107.
14. Constantinides, G. The nanogranular nature of C–S–H / G. Constantinides, F. J. Ulm // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2007. – Vol. 55, № 1. – P. 64–90.
15. Санчес, Ф. Нанотехнологии в производстве бетонов. Обзор / Ф. Санчес, К. Соболев // *Вестник ТГАСУ*. – 2013. – № 3(40). – С. 262–289.
16. Investigation of the surface structure and elastic properties of calcium silicate hydrates at the nanoscale / C. Plassard [et al.] // *Ultramicroscopy*, Elsevier. – 2004. – № 100. – P. 331–338.
17. Ulm, F.-J. Nano-Engineering of Concrete / F.-J. Ulm // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 37, № 2. – P. 481–488.
18. Modification effects of colloidal nano SiO_2 on cement hydration and its gel property / H. Pengkun [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – Т 45, № 1. – P. 440–448.
19. Исследование структуры цементного композита, модифицированного гидротермальными наночастицами SiO_2 И МУНТ, методом рентгенофазового анализа / Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2023. № 1.
20. Механизм повышения прочности цементного материала, модифицированного наночастицами SiO_2 и МУНТ / Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2021. – Том 94, №1. – С. 72–83.
21. Исследование структуры цементного композита, модифицированного гидротермальными наночастицами SiO_2 И МУНТ, методом ИК-спектроскопии / Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2022. – № 6.
22. Применение метода наноиндентирования для изучения структуры модифицированного цементного камня/ Е. Н. Полонина [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2021. – Том 94, № 5. – С. 1221–1234.
23. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные / С. А. Жданок [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2020. – Том 93, № 3 (май – июнь). – С. 669–673.
24. Юхневский, П. И. Квантово-химические расчеты структурных и энергетических характеристик молекул полиметиленафталинсульфонатного суперпластификатора цементных систем С-3 / П. И. Юхневский, В. М. Зеленковский, В. С. Солдатов // *Доклады НАН Беларуси*. – 2011. – Т. 55. № 1. – С. 71–74.
25. Юхневский, П. И. Квантово-химическое моделирование взаимодействия полиметиленафталинсульфонатов натрия (добавка С-3) с гидратированной поверхностью алита (C_3S) / П. И. Юхневский, В. М. Зеленковский, В. С. Солдатов // *Технологии бетонов*. – 2010. – № 5–6. – С. 31–33.
26. Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации : дис. д-ра техн. наук : 01.04.14, 01.02.05 / В. А. Кулагин. – Красноярск, 2004. – 406 с.
27. Effect of Carbon-Based Materials on the Early Hydration of Tricalcium Silicate / A. Sobolkina [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* 99. – P. 2181–2196.
28. Юхневский, П. И. Влияние молекулярно-структурного строения пластифицирующих и кремнеземсодержащих добавок на процессы гидратационного твердения и свойства цементного бетона : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 / П. И. Юхневский ; Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2014. – 44 с.
29. Юхневский, П. И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов / П. И. Юхневский. – Минск : БНТУ, 2013. – 309 с.
30. Павлова, И. П. Прогнозирование собственных деформаций и напряжений напрягающего бетона на основе структурно-механической модели расширяющегося композита : автореф.

- дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / И. П. Павлова ; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2005. – 20 с.
31. Кошевар, В. Д. Особенности реологии водных дисперсий суперпластифицированных портландцементов / В. Д. Кошевар, А. А. Ратко // Технологии бетонов. – 2021. – № 5. – С. 57–62.
 32. Impact Resistance of the Cement–Mortar Composite Modified with SiO₂ Nanoparticles and Microfiber / V. Potapov [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34. №. 7:04022135.
- References**
1. Engineering of SiO₂ Nanoparticles for Optimal Performance in Nano Cement-Based Materials / K. Sobolev [et al.] // Nanotechnology in Construction 3. – 2009. – P. 139–148.
 2. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World / K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // American Ceramic Society Bulletin. – 2009. – P. 113–116.
 3. Sobolev, K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World// K. Sobolev, M. Ferrada Gutierrez // American Ceramic Society Bulletin. – 2009. – P. 117–120.
 4. Sobolev, K. Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement compo-sites / K. Sobolev, R. Hemosillo, L. M. Torres-Martinez // Proceedings of ASI Session on «Nano-technology Concrete: Recent Developments and Future Perspectives». – 2006. – P. 117–120.
 5. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – A review / F. Sanchez, K. Sobolev // Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, №5. – P. 2060–2071.
 6. Combinatorial molecular optimization of cement hydrates / M. J. Abdolhosseini Qomi [et al.] // Nature Communications. – 2014. – Vol. 5, № 4960. – P. 1–10.
 7. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement / J. Björnström [et al.] // Chemical Physics Letters. – 2004. – Vol. 392, № 1–3. – P. 242–248.
 8. Effect of particle size of nanosilica on microstructure of C-S-H and its impact on mechanical strength / U. Sharma [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2019. – Vol. 97. – P. 312–321.
 9. Effect of Particle Size of Silica Nanoparticles on Hydration Reactivity and Microstructure of C-S-H Gel / U. Sharma [et al.] // Advances in Civil Engineering Materials. – 2019. – Vol. 8, № 3. – P. 346–360.
 10. Sharma, U. Formation of C–S–H nuclei using silica nanoparticles during early age hydration of cementitious system / U. Sharma, D. Ali, L. P. Singh // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2019. – P. 1–13.
 11. Quantification and characterization of C-S-H in silica nanoparticles incorporated cementitious system / L. P. Singh [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2017. – Vol. 79. – P. 106–116.
 12. Ulm, F.-J. Concrete innovation potential: from atoms to green infrastructure / F.-J. Ulm // Beton-UND Stahlbetonbau. – 2012. – Vol. 107. – P. 504–509.
 13. A realistic molecular model of cement hydrates / R.J.M. Pellenq [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2009. – Vol. 106, № 38. – P. 16102–16107.
 14. Constantinides, G. The nanogranular nature of C–S–H / G. Constantinides, F. J. Ulm // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2007. – Vol. 55, № 1. – P. 64–90.
 15. Sanchez, F. Nanotekhnologii v proizvodstve betonov. Obzor / F. Sanchez, K. Sobolev // Vestnik TGASU. – 2013. – № 3(40). – С. 262–289.
 16. Investigation of the surface structure and elastic properties of calcium silicate hydrates at the nanoscale / S. Plassard [et al.] // Ultramicroscopy, Elsevier. – 2004. – № 100. – P. 331–338.
 17. Ulm, F.-J. Nano-Engineering of Concrete / F.-J. Ulm // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2012. – Vol. 37, № 2. – P. 481–488.
 18. Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property / H. Pengkun [et al.] // Composites Part B: Engineering. – 2013. – T 45, № 1. – P. 440–448.
 19. Issledovanie struktury cementnogo kompozita, modificirovannogo gidro-termal'nymi nanochasticami SiO₂ I MUNT, metodom rentgenofazovogo analiza / E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2023. – № 1.
 20. Mekhanizm povysheniya prochnosti cementnogo materiala, modificirovannogo nanochasticami SiO₂ i MUNT / E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2021. – Tom 94, №1. – С. 72–83.
 21. Issledovanie struktury cementnogo kompozita, modificirovannogo gidro-termal'nymi nanochasticami SiO₂ I MUNT, metodom IK-spektroskopii / E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2022. № 6.
 22. Primenenie metoda nanoindentirovaniya dlya izucheniya struktury modificirovannogo cementnogo kamnya/ E. N. Polonina [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2021. – Tom 94, № 5. – С. 1221–1234.
 23. Modifikaciya cementnyh betonov dobavkami, soderzhashchimi nanorazmernye / S. A. Zhdanok [i dr.] // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. – 2020. – Tom 93, № 3 (maj – iyun'). – С. 669–673.
 24. Yuhnevskij, P. I. Kvantovo-himicheskie raschety strukturnyh i energeticheskikh karakteristik molekul polimetilenaftalinsulfonatnogo superplastifikatora cementnyh sistem S-3 / P. I. Yuhnevskij, V. M. Zelenkovskij, V. S. Soldatov // Doklady NAN Belarusi. – 2011. – T. 55. № 1. – S. 71–74.
 25. Yuhnevskij, P. I. Kvantovo-himicheskoe modelirovanie vzaimodejstviya poli-metilenaftalinsulfonatom natriya (dobavka S-3) s gidratirovannoj poverhnost'yu alita (S3S) / P. I. Yuhnevskij, V. M. Zelenkovskij, V. S. Soldatov // Tekhnologii betonov. – 2010. – № 5–6. – С. 31–33.
 26. Kulagin, V. A. Metody i sredstva tekhnologicheskoy obrabotki mnogokomponentnyh sred s ispol'zovaniem effektov kavitacii : dis. d-ra tekhn. nauk : 01.04.14, 01.02.05 / V. A. Kulagin. – Krasnoyarsk, 2004. – 406 с.
 27. Effect of Carbon-Based Materials on the Early Hydration of Tricalcium Silicate / A. Sobol'kina [et al.] // J. Am. Ceram. Soc. 99. – P. 2181–2196.
 28. Yuhnevskij, P. I. Vliyanie molekulyarno-strukturnogo stroeniya plastificiruyushchih i kremnezemsoderzhashchih dobavok na processy gidratatsionnogo tverdeniya i svojstva cementnogo betona : avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk : 05.23.05 / P. I. Yuhnevskij ; Belorusskij nacional'nij tekhnicheskij universitet. – Minsk, 2014. – 44 s.
 29. Yuhnevskij, P. I. Vliyanie himicheskoy prirody dobavok na svojstva betonov / P. I. Yuhnevskij. – Minsk : BNTU, 2013. – 309 s.
 30. Pavlova, I. P. Prognozirovanie sobstvennyh deformacij i napryazhenij napryagayushchego betona na osnove strukturno-mekhanicheskoy modeli rasshiryayushchegosya kompozita : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.05 / I. P. Pavlova ; Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. – Brest, 2005. – 20 s.
 31. Koshevar, V. D. Osobennosti reologii vodnyh dispersij superplastificirovannyh portlandcementov / V. D. Koshevar, A. A. Rat'ko // Tekhnologii betonov. – 2021. – № 5. – С. 57–62.
 32. Impact Resistance of the Cement–Mortar Composite Modified with SiO₂ Nanoparticles and Microfiber / V. Potapov [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 34. №. 7:04022135.

Материал поступил в редакцию 09.06.2022