

УДК 666.965:541.182:621

*КОПАНИЦА НАТАЛЬЯ ОЛЕГОВНА, докт. техн. наук, профессор,
kopanitsa@mail.ru*

*САРКИСОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
sarkisov@tsuab.ru*

*ДЕМЬЯНЕНКО ОЛЬГА ВИКТОРОВНА, аспирант,
angel_n@sibmail.com*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНОГО КРЕМНЕЗЕМА В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Представлены результаты исследований влияния кремнеземистых добавок с разной удельной поверхностью на свойства цементного камня. Изучено влияние рецептурно-технологических факторов на свойства цементного камня. Проанализированы закономерности повышения прочности цементного камня с комплексной добавкой микрокремнезема и nano-SiO_2 . Методами рентгенофазового и дериватографического анализа изучены особенности структурного состояния и фазового состава цементного камня с добавками. Установлено, что прочность модифицированного комплексной добавкой цементного камня 28-суточного твердения возрастает по сравнению с контрольными образцами на 30 %, выявлены закономерности синергетического влияния на свойства цементного камня кремнеземистых добавок с разной степенью дисперсности.

Ключевые слова: кремнеземистые добавки; дисперсность; фазовый анализ; наномодификатор; микрокремнезем; прочность; цементные композиции.

*NATAL'YA O. KOPANITSA, DSc, Professor,
kopanitsa@mail.ru*

*YURI S. SARKISOV, DSc, Professor,
sarkisov@tsuab.ru*

*OLGA V. DEM'YANENKO, Research Assistant,
angel_n@sibmail.com*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003, Russia*

NANODISPERSED SILICON DIOXIDE USED IN THE PRODUCTION OF MIX MORTARS

The paper presents research results on the effect of silicon dioxide additives having different specific surface on the properties of cement brick. The technology factors are investigated in relation to the properties of cement brick. The analysis of regularities of increasing strength of cement brick with silicon dioxide and nano-SiO_2 additives is carried out. The X-ray diffraction and thermal analyses are used to explore the structure and phase composition of cement brick with additives. It is shown that the strength of silicon dioxide-modified cement brick of 28-day hardening increases by 30 % as compared to the test samples. The synergistic effect from silicon dioxide additives with different degree of dispersion is shown for the properties of cement brick.

Keywords: silicon dioxide additives; dispersion; XRD analysis; nano-modifier; microsilica; strength; cement composition.

Применение нанотехнологий в строительном материаловедении является перспективным и актуальным направлением, т. к. позволяет существенно расширить возможности использования композиционных материалов на основе цементных вяжущих посредством направленного управления структурообразованием материала путем введения первичных наноразмерных компонентов [1–5]. Эффективность этого способа зависит от природы материала, функционального назначения и содержания модифицирующей фазы. Рядом авторов высказываются сомнения относительно эффективности модифицирования первичными наноматериалами микронеоднородных материалов – цементных композитов и отмечается более высокая результативность модифицирования наночастицами материалов, однородных на микроуровне [6–9]. Большое значение для эффективности нанотехнологий имеет также обоснованный выбор наномодификаторов и способов их введения. Управление структурообразованием материала на выбранном масштабном уровне осуществляется традиционно варьированием рецептурными и технологическими факторами.

Известно, что в основе механизмов действия наночастиц лежат следующие поверхностные эффекты: адсорбция с образованием граничных слоев вещества (матрицы), окружающего частицы с измененной структурой и свойствами, хемосорбция – химические реакции окружающей дисперсионной среды с поверхностью наночастиц, например SiO_2 с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне [10], топологический эффект – локализация наночастиц в дефектах и ультрамикростростотах кристаллизующейся дисперсной системы [11]. Каждый из этих эффектов может проявляться как в отдельности, так и совместно, приводя к синергизму их действия.

Применение наномодифицирующих добавок для регулирования свойств цемента приобретает все большую популярность в современном материаловедении. Их использование значительно улучшает свойства строительных материалов, и прежде всего строительных композитов на основе портландцемента.

Многие исследователи отмечают, что перспективным направлением при производстве бетонов и растворов является применение в качестве модифицирующих добавок нанодисперсных оксидных систем SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , близких по составу и структуре к продуктам гидратации цемента, обладающих избыточной внутренней энергией и высокой химической активностью, что позволяет получить вяжущие с высокими физико-механическими характеристиками [12, 23].

Известны работы, посвященные исследованию влияния микрокремнезема (МК) на свойства цементных композиций [13–16], основная цель введения которого заключается в возможности снижения содержания в цементном камне портландита, но, по данным В.И. Калашникова [17], для обеспечения необходимого эффекта, связанного с образованием высокопрочных гидросиликатов кальция, необходимо вводить МК до 15–20 %, что необратимо приведет к ухудшению других характеристик цементного камня (ЦК) и к необходимости регулирования состава другими добавками. Применение более активного нано- SiO_2 позволяет прогнозировать возможность получения более прочного ЦК при гораздо меньшем расходе добавки, но в то же время остаются недостаточно исследованными вопросы, связанные с эффективностью

наномодифицирования микронеоднородного цементного камня. Результаты исследований, связанных с уменьшением микронеоднородности цементного камня и повышением его прочности путем введения близких по составу веществ, но с разной степенью дисперсности, актуальны.

Целью настоящей статьи является обоснование закономерностей изменения прочностных свойств цементного камня в результате направленного формирования структуры дисперсных частиц «снизу-вверх», от нано- к микродисперсным масштабам.

В работе были использованы следующие материалы: портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Н, по ГОСТ 31108–2003, микрокремнезем – побочный продукт переработки ферросилиция производства Братского алюминиевого завода (БрАЗ), нано-SiO₂ (Ts38), разработанный и полученный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН и Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск) [18].

Характеристики используемых материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов

Наименование показателя	Нано-SiO ₂ (Ts38)	Микрокремнезем	Цемент
Удельная поверхность, м ² /г	38	20	3,0
Средний размер частиц	20–40 нм	0,2 мкм	5–40 мкм

Состав и структурные характеристики аморфного нано-SiO₂, определенные методом рентгеноструктурного анализа и имитационного моделирования [18], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Данные качественного фазового анализа образцов

Образец	Фазы	Интенсивность, %	Весовая доля, %	$R_{вр}$
Ts38	α -SiO ₂	87,28	93,90	3,798
	β -SiO ₂	10,40	6,01	

Из данных табл. 2 видно, что интенсивность фазы β -SiO₂ значительно ниже, чем интенсивность фазы α -SiO₂. Проведено моделирование аморфного состояния решеток α -SiO₂ и β -SiO₂, в рамках молекулярной динамики показано, что полученные домены аморфных фаз α -SiO₂ и β -SiO₂ являются стабильными. Расчеты полной энергии решеток указанных соединений показывают, что для аморфного домена α -SiO₂ энергия смешения составляет $E_c = -165,816$ эВ, а для аморфного домена β -SiO₂ $E_c = -425,88$ эВ. Отрицательные энергии смешения доменов указывают на стабильность аморфных конфигураций атомов в оксидах α -SiO₂ и β -SiO₂.

Модель предполагаемой структуры цементного камня с добавками разного масштабного уровня представлена на рис. 1.

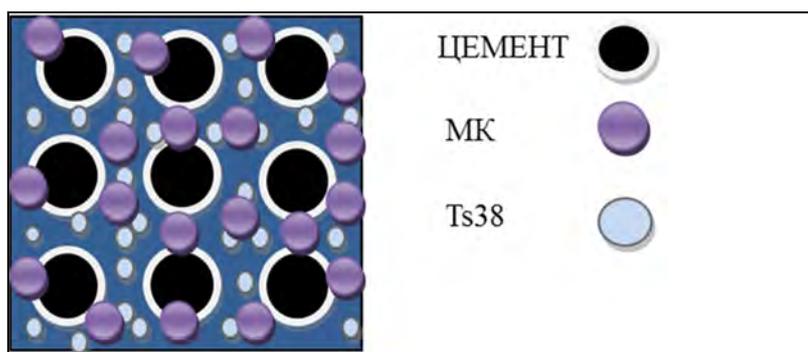


Рис. 1. Модель цементного камня

Концентрация добавок к массе цемента определялась по совокупности характеристик цементного камня и составила для микрокремнезема 5 %, а для нано-SiO₂ – 0,03 % [19–20].

Для определения физико-механических характеристик модифицированного цементного камня готовились образцы-кубики из цементного теста нормальной густоты размером 20×20×20 мм, образцы хранились 1 сут в формах при $t = 20\text{--}22\text{ }^\circ\text{C}$, $W = 90\text{--}95\%$, затем без форм, в эксикаторе, над водой в течение 27 сут.

Прочность на сжатие образцов оценивалась в 7, 14 и 28 сут твердения. Результаты представлены на рис. 2.

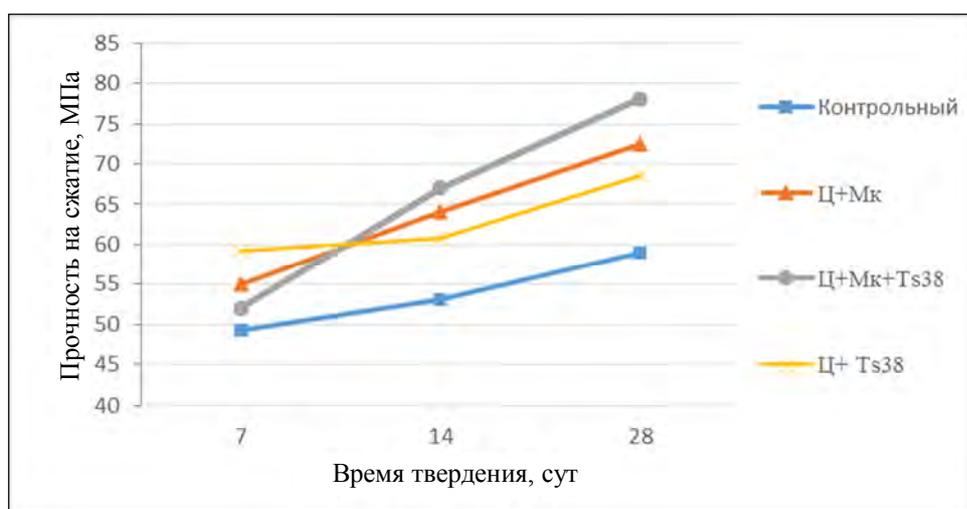


Рис. 2. Кинетические кривые роста прочности цементного камня

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что предложенные способы модифицирования цемента являются эффективными по отношению к контрольному составу и подтверждают правильность выбора добавок, близких по составу к цементу. Последовательное введение микрокремнезема и нано-SiO₂

приводит к увеличению прочности при сжатии в ранние сроки на 10–20 %, к 28 суткам – на 16–24 %, а при совместном введении добавок прочность повышается на 30 %.

Для исследования фазового состава ЦК и определения степени его гидратации был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) (рис. 3). Дифрактограммы снимались на дифрактометре XRD-60000 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Анализ фазового состава цементного камня, проведенный с использованием баз данных PCPDFWIN и PDF-4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDERCELL 2.5, позволил установить влияние различных способов модификации цементного камня кремнеземистыми добавками.

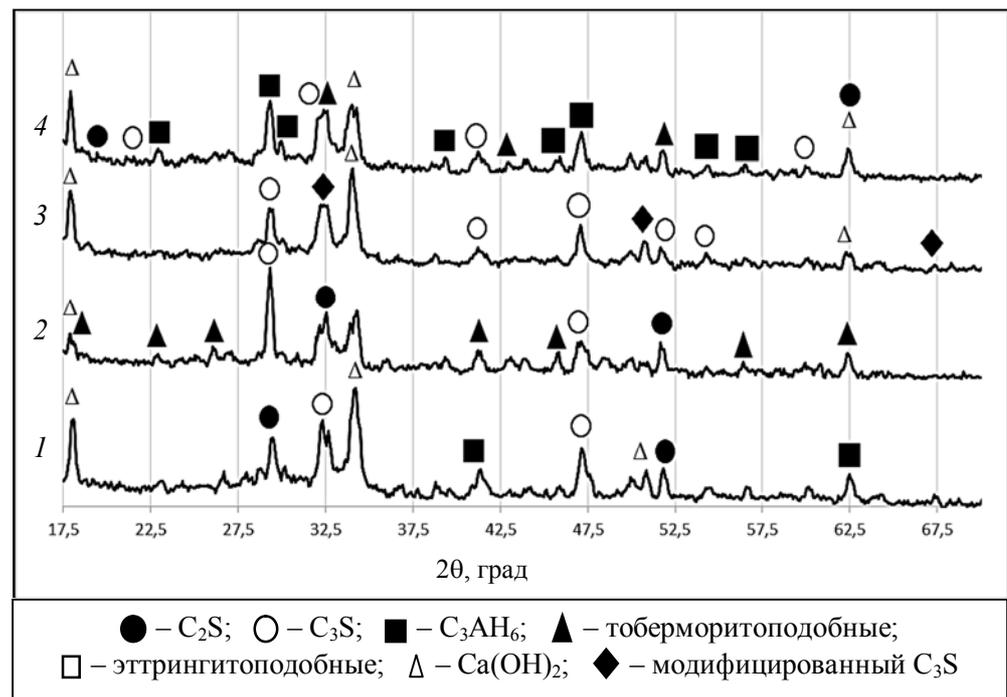


Рис. 3. Рентгенограмма цементного камня на 28-е сутки твердения:
1 – контрольный; 2 – Ц + МК; 3 – Ц + Ts38; 4 – Ц + МК + Ts38

Установлено, что нанодисперсные добавки оказывают влияние на формирование фазового состава и структуры цементного камня за счет образования дополнительного объема низкоосновых гидросиликатов кальция (ГСК) (рис. 3–7). Согласно данным РФА (рис. 3), отдельное введение добавки микрокремнезема и нанодиоксида кремния в разной степени влияет на содержание портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($4,91; 2,63; 1,79 \cdot 10^{-10}$ м), с введением микрокремнезема интенсивность дифракционных линий портландита заметно уменьшается за счет высокой пуццолановой активности МК, а с введением нанодиоксида кремния, наоборот, увеличивается по сравнению с контрольным образцом, что связано с незначительным содержанием добавки. При совместном введении добавок интенсивность линий $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вновь снижается. Раздельное введение

кремнеземистых добавок разной дисперсности хотя и стимулирует образование дополнительных гидратных новообразований, таких как C_2S_2H (2,09; 1,82; $1,76 \cdot 10^{-10}$ м), $CSH(B)$ (3,02; 2,8; $1,83 \cdot 10^{-10}$ м), $C_3S_2H_3$ (1,92; 1,87; $1,69 \cdot 10^{-10}$ м) $C_3S_3H_3$ (2,74; 2,35; $1,92 \cdot 10^{-10}$ м), но при совместном действии двух разных по дисперсности кремнеземистых добавок состав и количество новообразований в цементном камне увеличивается, что и приводит к повышению прочности цементного камня. Совместное применение добавок МК и Ts38 активизирует связывание гидроксида кальция, создавая дополнительные объемы низкоосновных гидросиликатов кальция. Значительное уменьшение доли свободного гидроксида кальция способствует предотвращению процессов коррозии затвердевшего ЦК и бетона на его основе. Таким образом, эффективность исследуемой комбинированной добавки очевидна и приобретает особую актуальность [21].

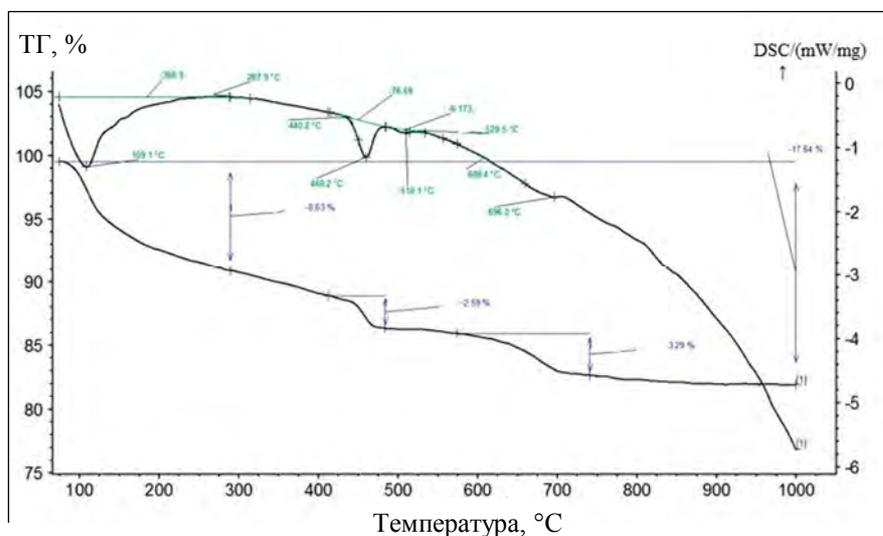


Рис. 4. Дериватограмма контрольного образца ЦК

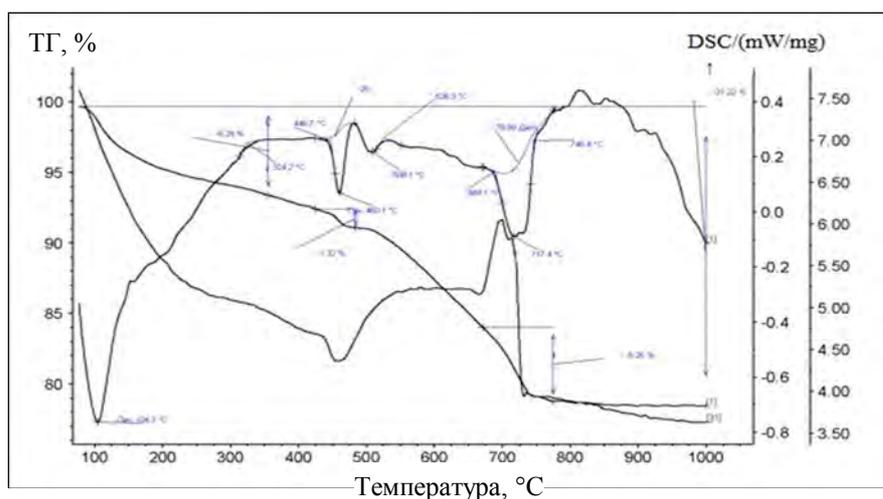


Рис. 5. Дериватограмма образца ЦК + МК

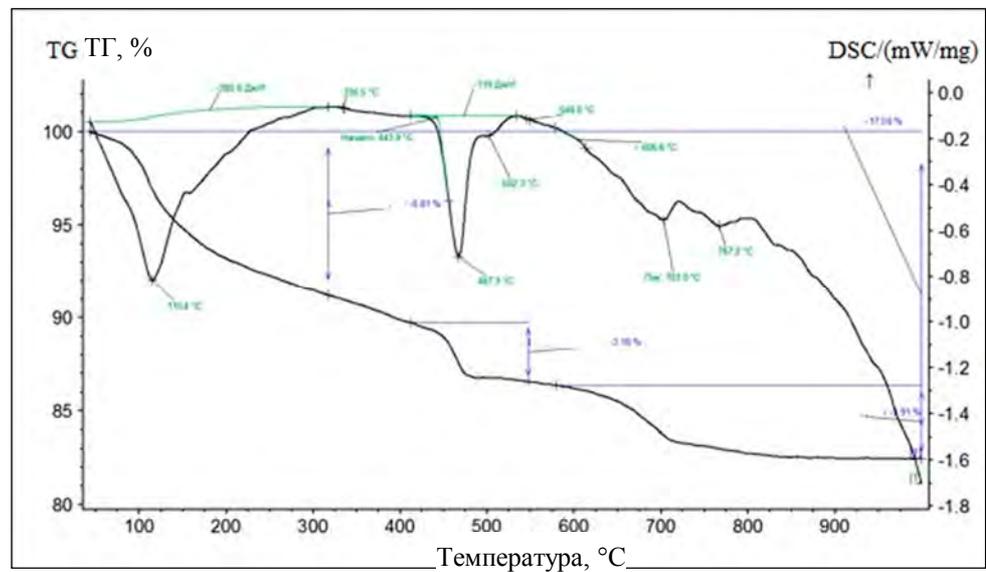


Рис. 6. Дериватограмма образца ЦК + Ts38

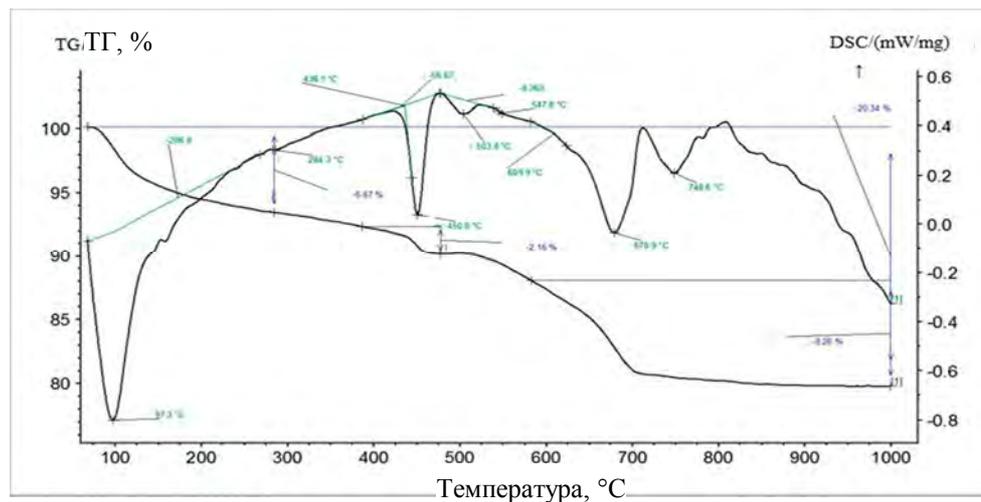


Рис. 7. Дериватограмма образца ЦК + МК + Ts38

Исследование фазового состава контрольного и модифицированных образцов цементного камня с применением дифференциально-термического анализ (ДТА) дополнило данные РФА.

На всех дериватограммах цементного камня к 28 суткам твердения были зафиксированы эндоэффекты при 97–104 °C (удаление свободной воды), на ДТА ЦК + Ts38 эндоэффект фиксируется при 115 °C, что может быть связано с дегидратацией CSH с потерей массы 3,51 %. На всех дериватограммах есть эндоэффекты в интервале 466–495 °C, связанные с дегидратацией Ca(OH)₂, но потери в массе у всех образцов различные: 2,59 % – у контрольного, 1,32 % –

с добавкой МК и 2,16 % – с комплексной добавкой. Разные значения по потере в массе свидетельствуют о более высокой степени связывания портландита для модифицированных образцов по сравнению с контрольным. Эндотермические эффекты в диапазоне температур 620–730 °С [22–25] характерны для дегидратации низкоосновных тоберморитоподобных гидросиликатов кальция типа CSH (В), хотя по другим источникам эндоэффекты на дериватограмме в интервале 678–767 °С соответствуют дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция. Значительный температурный интервал связан с тем, что присутствие добавок приводит к образованию дополнительных объемов различных гидросиликатов кальция.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволили выявить закономерности повышения прочности цементного камня с комплексной добавкой микрокремнезема и нано-SiO₂. Методами рентгенофазового и дериватографического анализа изучены особенности структурного состояния и фазового состава цементного камня с добавками. Установлено, что прочность модифицированного комплексной добавкой цементного камня в 28 суток твердения возрастает до 30 %, по сравнению с контрольными образцами, показаны закономерности синергетического влияния на свойства цементного камня кремнеземистых добавок с разной степенью дисперсности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Королев, Е.В.* Модифицирование строительных материалов нанокремнеземными трубками и фуллеренами / Е.В. Королев, Ю.М. Баженов, В.А. Береговой // *Строительные материалы*. – 2006. – № 8. – С. 2–4.
2. *Баженов, Ю.М.* Нанотехнология и наномодифицирование в строительном материаловедении. Зарубежный и отечественный опыт / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2007. – № 2. – С. 16–19.
3. *Модифицирование строительных материалов углеродными нанотрубками: актуальные направления разработки промышленных технологий* / Ю.Н. Толчков, З.А. Михалева А.Г. Ткачев, А.И. Попов // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2012. – № 6 (22). – С. 57–68.
4. *Баженов, Ю.М.* Наноматериалы и нанотехнологии в современной технологии бетонов / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман, Б.И. Булгаков // *Вестник МГСУ*. – 2012. – № 12. – С. 125–133.
5. *Настоящее и будущее применения нанотехнологий в производстве строительных материалов* / А.И. Шуйский, Х.С. Явруян, Е.А. Торлина, И.А. Филонов, Д.А. Фесенко // *Вестник МГСУ*. – 2012. – № 12. – С. 154–160.
6. *Калашников, В.И.* Бетоны: макро-, микро-, нано- и пикомасштабные сырьевые компоненты. Реальные нанотехнологии бетонов / В.И. Калашников // *Дни современного бетона: сб. докладов конференции*. – Запорожье, 2012. – С. 38–50.
7. *Орешкин, Д.В.* Проблемы строительного материаловедения и пути развития производства строительных материалов / Д.В. Орешкин // *Вестник МГСУ. Спецвыпуск*. – 2009. – № 3. – С. 13–17.
8. *Орешкин, Д.В.* Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов / Д.В. Орешкин // *Строительные материалы*. – 2010. – № 11. – С. 6–8.
9. *Сахаров, Г.П.* О краткосрочной перспективе нанотехнологий в производстве строительных материалов и изделий / Г.П. Сахаров // *Технологии бетонов*. – 2009. – № 4. – Ч. 1. – С. 65–67; № 5. – Ч. 2. – С. 13–15.
10. *Комохов, П.Г.* Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита / П.Г. Комохов // *Строительные материалы*. – 2006. – № 9. – С. 14–15.

11. *Модификация цементных бетонов* многослойными углеродными нанотрубками / Г.И. Яковлев, Г.Н. Первушин, А.А. Корженко, А.Ф. Бурьянов, И.А. Пудов // *Строительные материалы*. – 2011. – № 2. – С. 47–51.
12. *Лхасаранов, С.А.* Модифицированный бетон на композиционных вяжущих с применением нанокремнезема : дис. ... канд. тех. наук. – Улан-Удэ : ВСГУТУ, 2013.
13. *Батраков, В.Г.* Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М. : Высшая школа, 1998. – 768 с.
14. *Влияние добавки микрокремнезема* на гидратацию алита и сульфатостойкость цементного камня / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Л.С. Талисман, Ф.М. Иванов, В.М. Колбасов // *Цемент*. – 1989. – № 6. – С. 14–17.
15. *Модификаторы цементных бетонов и растворов* (Технические характеристики и механизм действия) / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий, Т.Н. Черных, В.В. Зимич. – Челябинск : ООО «Искра-Профи», 2012. – 202 с.
16. *Коренькова, С.Ф.* Добавки к бетонам / С.Ф. Коренькова // *Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси*. Ч. I : справочник. – СПб. : НПО «Профессионал», 2007. – С. 236–265.
17. *Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов* / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, М.Н. Мороз, И.Ю. Троянов, В.М. Володин, О.В. Суздальцев // *Строительные материалы*. – 2014. – № 5. – С. 88–91.
18. *Моделирование структурного состояния аморфного таркосила* / Ю.А. Абзаев, Н.О. Копаница, В.А. Клименов [и др.] // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2015. – № 3. – С. 121–133.
19. *Демьяненко, О.В.* Влияние наноразмерного диоксида кремния на свойства цементного камня / О.В. Демьяненко, Н.О. Копаница, Ю.С. Саркисов // *Молодежь, наука, технологии: Новые идеи и перспективы (МНТ-2015) : избранные доклады II Международной научной конференции студентов и молодых ученых*. – 2016. – С. 193–196.
20. *Демьяненко, О.В.* Влияние наночастиц диоксида кремния на эксплуатационные свойства цементных систем / О.В. Демьяненко, Н.О. Копаница // *Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием*. Томский государственный архитектурно-строительный университет. – 2015. – С. 408–411.
21. *Коррозия как фактор деградации материалов* / Ю.С. Саркисов, Т.С. Шепеленко, Н.П. Горленко, Д.А. Афанасьев // *Техника и технология силикатов*. – 2014. – Т. 21. – № 4. – С. 21–25.
22. *Харченко, Е.А.* Синтез и свойства низкоосновных гидросиликатов кальция нестабильной кристаллической структуры / Е.А. Харченко, В.А. Свицерский, И.В. Глуховский // *International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE»*. – № 3 (3). – V. 1. – С. 50–54.
23. *Urukhanova, L.A.* Build. Mater / L.A. Urukhanova, S.A. Lkhasaranov, S.P. Bardakhanov. – 2014. – № 8. – P. 52–55.
24. *Саркисов, Ю.С.* О некоторых аспектах применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве / Ю.С. Саркисов, Н.О. Копаница, А.В. Касаткина // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2012. – № 4. – С. 226–234.
25. *Копаница, Н.О.* Эффективные органоминеральные добавки на основе местного сырья / Н.О. Копаница, Ю.С., Саркисов А.В. Касаткина // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – № 4. – С. 184–190.

REFERENCES

1. *Korolev E.V., Bazhenov Ju.M., Beregovoy V.A.* Modifitsirovanie stroitel'nykh materialov nanouglerodnymi trubkami i fullerenami [Carbon nanotube and fullerene modification of building materials]. *Construction Materials*. 2006. No. 8. Pp. 2–4. (rus)
2. *Bazhenov Ju.M., Korolev E.V.* Nanotekhnologiya i nanomodifitsirovanie v stroitel'nom materialovedenii. Zarubezhnyi i otechestvennyi opyt [Nanotechnology and nano-modification in construction materials science. Russian and foreign experience]. *Bulletin of BSTU*. 2007 No. 2. Pp. 16–19. (rus)
3. *Tolchkov Ju.N., Mihaleva Z.A. Tkachev A.G., Popov A.I.* Modifitsirovanie stroitel'nykh materialov uglerodnymi nanotrubkami: aktual'nye napravleniya razrabotki promyshlennykh tekhnologii [Modification of building materials with carbon nanotubes: current trends in the

- development of industrial technologies]. *Nanotechnologies in Construction*. 2012. No. 6 (22). Pp. 57–68. (rus)
4. *Bazhenov Ju.M., Falikman V.R., Bulgakov B.I.* Nanomaterialy i nanotekhnologii v sovremennoi tekhnologii betonov [Advanced concrete nanomaterials and nanotechnology]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2012. No. 12. Pp. 125–133. (rus)
 5. *Shujskij A.I., Javrujan H.S., Torlina E.A., Filonov I.A., Fesenko D.A.* Nastoyashchee i budushchee primeneniya nanotekhnologii v proizvodstve stroitel'nykh materialov [Present and future applications of nanotechnology in the production of building materials]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2012. № 12. Pp. 154–160. (rus)
 6. *Kalashnikov V.I.* Betony: makro-, mikro-, nano- i pikomasshtabnye syr'evye komponenty. Real'nye nanotekhnologii betonov [Concretes: macro-, micro-, nano- and large-scale raw materials. Real concrete nanotechnologies]. *Proc. Sci. Conf. 'Modern Concrete'*, Zaporozhye. 2012. Pp. 38–50. (rus)
 7. *Oreshkin D.V.* Problemy stroitel'nogo materialovedeniya i puti razvitiya proizvodstva stroitel'nykh materialov [Problems of building materials and the development of the production of building materials]. *Scientific and Technical Journal on Construction and Architecture*. 2009. No. 3. Pp. 13–17. (rus)
 8. *Oreshkin D.V.* Problemy stroitel'nogo materialovedeniya i proizvodstva stroitel'nykh materialov [Problems of construction materials science and building materials production]. *Construction Materials*. 2010. No. 11. Pp. 6–8. (rus)
 9. *Saharov G.P.* O kratkosrochnoi perspektive nanotekhnologii v proizvodstve stroitel'nykh materialov i izdelii [Short-term perspective of building materials nanotechnology]. *Tekhnologii betonov*. 2009. No. 4. Pt. 1. Pp. 65–67, No. 5. Pt. 2. Pp. 13–15. (rus)
 10. *Komohov P.G.* Zol'-gel' kak kontseptsiya nanotekhnologii tsementnogo kompozita [Sol-gel concept of cement composite nanotechnology]. *Construction Materials*. 2006. No. 9. Pp. 14–15. (rus)
 11. *Jakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A.A., Bur'janov A.F., Pudov I.A.* Modifikatsiya tsementnykh betonov mnogosloinymi uglerodnymi nanotrubkami [Cement concrete modification by multi-layer carbon nanotubes]. *Construction Materials*. 2011. No. 2. Pp. 47–51. (rus)
 12. *Lhasaranov S.A.* Modifitsirovannyi beton na kompozitsionnykh vyazhushchikh s primeneniem nanokremnezema : dis. ... kand. tekhn. nauk [Modified concrete based on composite binders with nano silicon dioxide. PhD Thesis]. Ulan-Ude: VSGUTU Publ., 2013. (rus)
 13. *Batnikov V.G.* Modificirovannyye betony. Teoriya i praktika [Modified concretes. Theory and practice]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1998. Pp. 768. (rus)
 14. *Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Talisman L.S., Ivanov F.M., Kolbasov V.M.* Vliyanie dobavki mikrokremnezema na gidratatsiyu alita i sul'fatostoikost' tsementnogo kamnya [Influence of microsilica additives on hydration of alite fume and sulphate resistance of cement brick]. *Tsement*. 1989. No. 6. Pp. 14–17. (rus)
 15. *Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Gamalii E.A., Chernykh T.N., Zimich V.V.* Modifikatory tsementnykh betonov i rastvorov [Tekhnicheskie kharakteristiki i mekhanizm deistviya] [Cement concrete and mortar modifiers]. Chelyabinsk: OOO Iskra-Profi, 2012. Pp. 202. (rus)
 16. *Koren'kova S.F.* Dobavki k betonam [Cement additives]. Tsementy, betony, stroitel'nye rastvory i sukhie smesi. Ch. I [Cement, concrete, mortars and dry mixes. Pt. I]. St.-Petersburg: Professional Publ., 2007. Pp. 236–265. (rus)
 17. *Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Moroz M.N., Trojanov I.Ju., Volodin V.M., Suzdal'cev O.V.* Nanogidrosilikatnye tekhnologii v proizvodstve betonov [Nano hydrosilicate technologies in concrete production]. *Construction Materials*. 2014. No. 5. Pp. 88–91. (rus)
 18. *Abzaev Ju.A., Kopanica N.O., Klimenov V.A. et al.* Modelirovanie strukturnogo sostoyaniya amorfnoho Tarkosila [Structural state modeling of amorphous Tarkosil]. *Vestnik TSUAB*. 2015. No. 3. Pp. 121–133. (rus)
 19. *Dem'janenko O.V., Kopanica N.O., Sarkisov Ju.S.* Vliyanie nanorazmernogo dioksida kremniya na svoystva tsementnogo kamnya [Influence of nano-sized silicon dioxide on cement stone properties]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Youth, Science and Technology: New Ideas and Perspectives'*. 2016. Pp. 193–196. (rus)
 20. *Dem'janenko O.V., Kopanica N.O.* Vliyanie nanochastits dioksida kremniya na ekspluatatsionnye svoystva tsementnykh sistem [Silicon dioxide nanoparticles effect on operating

- properties of cement systems]. *Proc. 2nd All-Rus. Sci. Conf. of Young Scientists*. Tomsk, 2015. Pp. 408–411. (rus)
21. *Sarkisov Ju.S., Shepelenko T.S., Gorlenko N.P., Afanas'ev D.A.* Korroziya kak faktor degradatsii materialov [Corrosion as material degradation factor]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2014. V. 21. No. 4. Pp. 21–25. (rus)
 22. *Kharchenko E.A., Sviderskii I.V.* Glukhovskii Sintez i svoistva nizkoosnovnykh gidrosilikatov kal'tsiya nestabil'noi kristallicheskoj struktury [Synthesis and properties of low-basic calcium hydrosilicates of unstable crystal structure]. *Int. Sci. Conf. 'World Science'*. No. 3. V. 1. Pp. 50–54. (rus)
 23. *Urukhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P.* *Construction Materials*. 2014. No. 8. Pp. 52–55. (rus)
 24. *Sarkisov Yu.S., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V.* O nekotorykh aspektakh primeneniya nanomaterialov i nanotekhnologii v stroitel'stve [Some aspects of construction use of nanomaterials and nanotechnologies]. *Vestnik TSUAB*. 2012. No. 4. Pp. 226–234. (rus)
 25. *Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., Kasatkina A.V.* Effektivnye organomineral'nye dobavki na osnove mestnogo [Efficient organomineral agents based on local raw materials]. *Vestnik TSUAB*. 2013. No. 4. Pp. 184–190. (rus)