НАНОТЕХНОЛОГИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ¹

Е.В. Королев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. В статье представлен анализ современных подходов к реализации принципов нанотехнологии в строительном материаловедении. Проведен критический анализ области применения нанотехнологии. Дано определение нанотехнологии с учетом достигаемого результата. Предложена зависимость для оценки технико-экономической эффективности новых технологических решений, в т.ч. достигаемых с применением приемов нанотехнологии. Произведена оценка влияния первичных наноматериалов на начальный этап процесса структурообразования — гетерогенную нуклеацию (зародышеобразование). Исследовано влияние основных факторов, влияющих на гетерогенную нуклеацию, и показано, что указанные факторы формируют три механизма влияния первичных наноматериалов на структурообразование материала.

Представленные сведения можно использовать как при разработке нового технологического решения, в частности, основанного на применении первичных наноматериалов и обеспечивающего повышение качества материала, так и при анализе экспериментальных зависимостей, выявлении новых эффектов и знаний, а также закономерностей, на основе которых могут быть усовершенствованы традиционные или новые технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнология, первичные наноматериалы, наноструктурированный материал, рецептурно-технологический дуализм, гетерогенная нуклеация, зародышеобразование, параметры структуры, технико-экономическая эффективность, правило молекулярного отбора, пересыщение, краевой угол смачивания, концентрация первичных наноматериалов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Королев Е.В. Нанотехнология в строительном материаловедении // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 7 (106). С. 711–717. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.711-717

NANOTECHNOLOGIES IN MATERIALS AND COMPONENTS SCIENCE¹

E.V. Korolev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavlshoshe, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT. The article presents the analysis of modern approach to realization of fundamentals of nanotechnology in materials and components science. The critical analysis of scope for nanotechnology was given. The paper gives definition of the term 'nanotechnology' considering the achieved outcomes. Relationship for assessment of technical-and-economic efficiency of new technological concepts was proposed including those achieved with the use of nanotechnology approach. Assessment of the impact of main factors effecting heterogeneous nucleation was researched, thus it was shown that indicated factors form three mechanisms of impact of original nanomaterials on structure formation of material. The presented data could be used not only for development of technological concepts, in particular based on application of original nanomaterials and providing improvement of quality of material, but also for analysis of empirical dependence, finding new effects and knowledge, and conformities for advancing traditional and innovative technologies.

KEY WORDS: nanotechnology, original nanomaterials, nanostructured material, formulation and technological parallelism, heterogeneous nucleation, nucleus formation, structure parameters, technical-and-economic efficiency, principle of molecular selection, oversaturation, limiting wetting angle, concentration of original nanomaterials

FOR CITATION: Korolev E.V. Nanotekhnologiya v stroitel'nom materialovedenii [Nanotechnologies in Materials and Components Science]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 7 (106), pp. 711–717. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.711-717

¹ Статья подготовлена на основе доклада, представленного на международной конференции «Наноматериалы и нанотехнологии в строительстве: теория, практика, техническое регулирование» (<http://icnnc.org/ru/>).

The article is based on the report presented on the International conference “Nanomaterials and Nanotechnologies in Construction: Theory, Practice, and Technical Regulations”.

Исследователи, работающие в направлении строительного материаловедения — в области научной деятельности, занимающейся изучением механизмов, установлением закономерностей структурообразования и разработкой технологических решений по получению новых технико-экономических эффективных строительных композитов, — также активно пытаются применять приемы нанотехнологии. Некоторые результаты отечественных исследований в этом направлении даны в обзоре [1].

Существует несколько определений нанотехнологии, которые базируются на различных особенностях этой технологии: на масштабном факторе [2], на достижении выдающегося результата (эффекта) [3]. При этом ключевым является получение структуры материала, «содержащей граничащие² элементы, один или более размеров которых находятся в нанометровом диапазоне, исключая любые первичные атомные или молекулярные структуры (например, упорядочивание атомов в кристаллах)» [2].

Для строительного материаловедения с учетом требований отрасли, на наш взгляд, ключевым является достижение максимального положительного эффекта при минимальных затратах ресурсов (под эффектом понимается качество материала [11], под расходом ресурса управления структурообразованием материала — концентрация модификатора и/или технологическое воздействие, приводящее к достижению требуемого и/или максимального качества материала). При этом масштабный фактор не может быть доминирующим, а являться лишь следствием эффективности разработанного технологического решения. Поэтому нанотехнология — это научно-обоснованные технологические решения, обеспечивающие достижение максимального значения отношения эффекта к расходу ресурса управления структурообразованием (отношения эффект/ресурс) и/или к появлению нового свойства материала, позволяющего расширить область его применения, посредством управления структурообразованием материала на атомно-молекулярном масштабном уровне. Применение приставки «нано» предполагает, что достижение требуемого эффекта возможно только при организации управления структурообразования на атомно-молекулярном уровне. О том, что областью применения нанотехнологии является этап агрегирования вещества материала (в сущности, реализация стратегии «снизу вверх»), хорошо продемонстрировано в серии работ профессора Е.М. Чернышова [4–9, 11]. Для строительных композитов получение новых результатов возможно часто и без применения приемов нанотехнологии. Это подтверждается многочисленными исследованиями и теоретически обосновано в работе [10] в виде идеи рецептурно-

технологического дуализма: применение приемов нанотехнологии эффективно только после исчерпания возможностей управления структурообразованием на вышележащих структурных уровнях.

Реализация этих принципов требует разработки методики оценки технико-экономической эффективности предлагаемых технологических решений [10]. Эта методика не лишена недостатков, особенно связанных с «чисто математическими» эффектами расчета. Поэтому в данной работе в продолжение идеи, изложенной в работе [10], предлагается оценку технико-экономической эффективности рассчитывать по коэффициенту

$$k_{ef} = k_i \left(\frac{F_n}{F_b} - 1 \right) \left(2 - \frac{C_n}{C_b} \right),$$

где k_i — коэффициент, характеризующий возможность реализации технического эффекта нового технологического эффекта; F_i — обобщенный показатель качества материала; C_i — стоимость материала с учетом всех затрат на его производство (а индексами n и b обозначены параметры соответственно нового и базового материалов).

Представленная формула разработана с учетом повышения качества материала при реализации новых технологических решений, т.е. $F_n > F_b$, и при максимально возможном увеличении стоимости материала $C_n = 2C_b$. При реализации нового технологического решения, результатом которого является выполнение условия $F_n = F_b$, формулу для оценки технико-экономической эффективности необходимо преобразовать к виду

$$[k_{ef}]_{F_n=F_b} = k_i \left(2 - \frac{C_n}{C_b} \right).$$

В настоящее время в строительном материаловедении реализация приемов нанотехнологии осуществляется посредством введения первичных наноматериалов. Предполагается, что наночастицы выполняют функцию центров кристаллизации. Это соответствующим образом влияет на кинетику процесса твердения и параметры структуры материала. При этом необходимо отметить, что наночастицы в достаточно высокой концентрации представлены в окружающей среде. Так, например, в 1 м³ атмосферного воздуха находится порядка $10^{+10} \dots 10^{+14}$ наночастиц; в высокочистой воде — $10^{+6} \dots 10^{+7}$ м⁻³ [13]. Оценка концентрации углеродных нанотрубок (УНТ), введенных в бетон с расходом портландцемента 350...450 кг/м³, в концентрации $(1-5) \cdot 10^{-3} \%$ от массы портландцемента и диспергированных до характерных размеров агрегатов УНТ 0,5 мкм дает значения $C_{УНТ} = (1-9) \cdot 10^{+13}$ м⁻³, а при полном диспергировании нанотрубок — $C_{УНТ} = (0,3-2) \cdot 10^{+14}$ м⁻³, т.е. значения $C_{УНТ}$ сопоставимы с концентрацией наночастиц в атмосферном воздухе.

Научным обоснованием применения первичных наноматериалов требуемой химической при-

² Термин «граничащий» подразумевает, что сфера диаметром около 100 нм, вписанная в наноструктурированный материал, пересечет более одного элемента структуры.

роды является анализ основных закономерностей гетерогенной нуклеации [13], протекающей со скоростью

$$J = (J_0 + N_n \omega_n e^{-\omega_n t}) \left[\left(\frac{C}{C_\infty} \right)^m - 1 \right],$$

где J_0 — скорость гомогенной нуклеации; N_n — число примесных наночастиц в единице объема; ω_n — вероятность превращения примесной наночастицы в зародыш в единицу времени; C — концентрация вещества; C_∞ — растворимость вещества; m — показатель чувствительности нуклеации к пересыщению среды.

Из последнего уравнения следует, что факторами, влияющими на кинетику гетерогенной нуклеации, являются: концентрация наночастиц N_n , вероятность превращения примесной наночастицы в зародыш кристалла ω_n и чувствительность нуклеации к пересыщению среды m .

Влияния указанных факторов описываются следующими формулами:

влияние концентрации наночастиц на гетерогенную нуклеацию

$$\frac{\partial J}{\partial N_n} = \left[\left(\frac{C}{C_\infty} \right)^m - 1 \right] \omega_n e^{-\omega_n t};$$

влияние вероятности превращения наночастиц в зародыши (центры кристаллизации) на гетерогенную нуклеацию

$$\frac{\partial J}{\partial \omega_n} = N_n \left[\left(\frac{C}{C_\infty} \right)^m - 1 \right] \left(\frac{1 - \omega_n t}{e^{\omega_n t}} \right);$$

влияние чувствительности нуклеации к пересыщению

$$\frac{\partial J}{\partial m} = (J_0 + N_n \omega_n e^{-\omega_n t}) \left(\frac{C}{C_\infty} \right)^m \ln \left(\frac{C}{C_\infty} \right).$$

Анализ представленных зависимостей показывает, что концентрация наночастиц N_n линейно влияет на процесс гетерогенной нуклеации; увеличение количества наночастиц приводит к ускорению процесса зародышеобразования. Здесь важно отметить, что не обнаруживается наличие экстремума от количества наночастиц.

Влияние вероятности превращения наночастиц в зародыши посредством образования вокруг них «шубы» из растворенного вещества указывает на следующие явления:

1. Если наночастицы не превращаются в зародыши ($\omega_n = 0$), то скорость нуклеации не зависит от наличия наночастиц. В данном случае наночастицы поглощаются основным веществом и, вероятно, образуют включение, дефект, который будет оказывать влияние на свойства вещества, т.е. введение таких наночастиц регулирует дефектность структуры материала.

2. При превращении наночастиц в зародыш ($\omega_n = 1$) скорость нуклеации быстро снижается, что свидетельствует об их участии только на начальном этапе нуклеации (рис. 1). Это также указывает на то, что для таких систем должна наблюдаться повышенная мера неоднородности кристаллической структуры.

Ориентировочно выбор значения ω_n можно провести, используя правило молекулярного от-

Рис. 1. Зависимость $\frac{\partial J}{\partial \omega_n} = f(\omega_n)$

бора, сущность которого заключается в том, что зародышами становятся кластеры молекул (атомов), содержащие мало различающиеся молекулы одного-двух веществ [13].

Таким образом, для родственных молекул (например, молекул продуктов гидратации портландцемента, молекул солей кремневой кислоты) вероятность $\omega_n = 1$, для различных молекулярных систем (например, таковы углеродные молекулярные системы, молекулы поверхностно-активных веществ, молекулы пластификаторов/гиперпластификаторов) — $\omega_n = 0$. Анализ влияния поверхностно-активных веществ на агрегирование представлен в работе [14].

Правомерность представленных заключений следует также из классической теории гетерогенной нуклеации [15]:

$$\frac{\Delta G_{\text{гет}}}{\Delta G_{\text{гом}}} = \frac{1}{2} - \frac{3}{4} \cos(\theta) + \frac{1}{4} \cos^2(\theta),$$

где $\Delta G_{\text{гом}}$ и $\Delta G_{\text{гет}}$ — соответственно затраты на осуществление гомогенного и гетерогенного процессов нуклеации; θ — краевой угол смачивания.

Анализ представленной зависимости показывает, что при обеспечении смачивания ($\theta < 180^\circ$) работа гетерогенного процесса всегда меньше работы гомогенного процесса нуклеации (рис. 2). При одинаковом объеме гетерогенный кристаллический зародыш будет иметь меньший размер [15]:

$$r_0 = \frac{2\sigma \sin \theta}{\Delta G_v},$$

где r_0 — критический размер зародыша кристалла; σ — поверхностное натяжение на границе раздела фаз «кристаллический зародыш — примесная частица»; ΔG_v — энергия Гиббса на образование единицы объема новой фазы, следовательно, для его образования необходимо меньшее пересыщение.

Отсюда следует, что для управления параметрами структуры материала необходимо вводить родственные по химической природе модификаторы. В частности, эффективность применения синтезированных гидросиликатов различных металлов для управления структурообразованием цементного камня продемонстрирована в работах [16–27].

Чувствительность системы к перенасыщению, которая характеризуется величиной m , также указывает на значительное повышение скорости нуклеации с ростом ее величины.

Все представленные уравнения характеризуют различные механизмы влияния наночастиц:

- влияние наночастиц на окружающую их среду. Этот процесс описывается зависимостью $\frac{\partial J}{\partial m}$;
- роль наночастиц как центров нуклеации (кристаллизации), которая описывается зависимостью $\frac{\partial J}{\partial \omega_n}$ и условием $\omega_n = 1$;
- роль наночастиц, выполняющих функции физических «барьеров», которая описывается зависимостью $\frac{\partial J}{\partial \omega_n}$ и условием $\omega_n = 0$.

Все указанные механизмы и оценочные расчеты концентрации первичных наноматериалов, обеспечивающие формирование структуры с нанометрическими параметрами, представлены в исследовании [27], где показано, что концентрация первичных наноматериалов зависит от их размеров:

$$v_n \approx \left(\frac{d_n}{D_k} \right)^3,$$

где v_n — объемная доля первичных наноматериалов; d_n — характерный размер первичного наноматериала; D_k — характерный размер структуры

Рис. 2. Зависимости $\Delta G_{\text{гет}}/\Delta G_{\text{гом}} = f(\theta)$ и $r_0 = f(\theta)$

материала (для наноструктурированного материала $d_k < 100$ нм).

Таким образом, представленные сведения можно использовать как при разработке нового технологического решения, в частности, основанного на применении первичных наноматериалов и

обеспечивающего повышение качества материала, так и при анализе экспериментальных зависимостей, выявлении новых эффектов и знаний, а также закономерностей, на основе которых могут быть усовершенствованы традиционные или новые технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Королев Е.В.* Нанотехнология в строительном материаловедении. Анализ состояния и достижений. Пути развития // *Строительные материалы*. 2014. № 11. С. 47–80.
2. *Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов* / под ред. С.В. Калужного. М. : Физматлит, 2010. 528 с.
3. *Алфимов М.В., Гохберг Л.М., Фурсов К.С.* Нанотехнологии: определения и классификация // *Российские нанотехнологии*. 2010. Т. 5. № 7–8. С. 8–16.
4. *Артамонова О.В., Чернышов Е.М.* Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 1: Общие проблемы фундаментальности, основные направления исследований и разработок // *Строительные материалы*. 2013. № 9. С. 82–95.
5. *Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С.* Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 2: К проблеме концептуальных моделей наномодифицирования структур // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 73–83.
6. *Чернышов Е.М., Артамонова О.В., Славчева Г.С.* Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 3: Эффективное наномодифицирование систем твердения цемента и структуры цементного камня (критерии и условия) // *Строительные материалы*. 2015. № 10. С. 54–64.
7. *Чернышов Е.М., Потамошинева Н.Д., Артамонова О.В.* Концепции и основания технологии наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 4: Золь-гель технология нано-, микродисперсных кристаллов портландита для контактно-конденсационного компактирования структур портландитового камня и композитов на его основе // *Строительные материалы*. 2015. № 11. С. 65–74.
8. *Чернышов Е.М., Попов В.А., Артамонова О.В.* Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 5: Эффективное микро-, наномодифицирование систем гидротермально-синтезного твердения и структуры силикатного камня (критерии и условия) // *Строительные материалы*. 2016. № 9. С. 38–46.
9. *Артамонова О.В.* Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Ч. 6: Получение наномодифицированных термально-синтезированных систем твердения для конструкционной и функциональной керамики специального назначения // *Строительные материалы*. 2017. № 5. С. 98–104.
10. *Королев Е.В.* Принцип реализации нанотехнологии в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 60–64.
11. *Королев Е.В.* Техничко-экономическая эффективность новых технологических решений. Анализ и совершенствование // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 85–89.
12. *Мелихов И.В.* Физико-химическая эволюция твердого вещества М. : Бинум, 2014. 309 с.
13. *Королев Е.В., Гришина А.Н., Пустовгар А.П.* Поверхностное натяжение в структурообразовании материалов. значение, расчет и применение // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 104–109.
14. *Рябцев Н.Г.* Материалы квантовой электроники. М. : Сов. радио, 1972, 384 с.
15. *Brykov A.S., Danilov B.V., Larichkov A.V.* Specific features of portland cement hydration in the presence of sodium hydrosilicates // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006. Vol. 79. No. 4. Pp. 521–524.
16. *Korolev E.V., Grishina A.N.* Influence of nanoscale barium hydrosilicates on composition of cement stone // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 683. Pp 90–94.
17. *Кузнецова Т.В., Гувалов А.А., Аббасова С.И.* Модификатор на основе цеолитсодержащей породы для получения цементных композиций // *Техника и технология силикатов*. 2016. Vol. 23. No. 1. Pp. 22–24.
18. *Brykov A.S., Danilov V.V., Korneev V.I., Larichkov A.V.* Effect of hydrated sodium silicates on cement paste hardening // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2002. Vol. 75. No. 10. Pp. 1577–1579.
19. *Mazurok P., Buyun M., Tokarchuk V., Sviderskiy V.* Utilization of the heat-treated silicate rocks in the cement and cement slurry manufacturing // *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. Vol. 2. No. 4 (28). Pp. 68–74.
20. *Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Smirnov V.A.* Nanoscale modifier as an adhesive for hollow microspheres to increase the strength of high-strength lightweight concrete // *Structural Concrete*. 2017. Vol. 18. No. 1. Pp. 67–74.
21. *Калашиников В.И., Ерофеев В.Т., Мороз М.Н. и др.* Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов // *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 88–91.
22. *Максимова И.Н., Макридин Н.И., Суров И.А.* Влияние наногидросиликатов кальция, модифицированных апротонными кислотами, на формирование прочности дисперсно-кристаллитной структуры цементного камня // *Региональная архитектура и строительство*. 2014. № 2. С. 63–68.
23. *Калашиников В.И., Володин В.М., Ерофеева И.В., Абрамов Д.А.* Высокоэффективные самоуплотняющиеся порошково-активированные песчаные бетоны и фибробетоны // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–2. С. 110.
24. *Макридин Н.И., Вернигорова В.Н., Максимова И.Н.* О микроструктуре и синтезе прочности цементного камня с добавками ГСК // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2003. № 8. С. 37–42.
25. *Morrison C., Hooper R., Lardner K.* The use of ferro-silicate slag from isf zinc production as a sand replacement in concrete // *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33. No. 12. Pp. 2085–2089.

26. Atzeni C., Massidda L., Sanna U. Use of granulated slag from lead and zinc processing in concrete technology // *Cement and Concrete Research*. 1996. Vol. 26. No. 9. Pp. 1381–1388.

27. Королев Е.В. Оценка концентрации первичных наноматериалов для модифицирования строительных композитов // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 31–34.

Поступила в редакцию в июне 2017 г.

Принята в доработанном виде в июне 2017 г.

Одобрена для публикации в июне 2017 г.

Об авторе: **Королев Евгений Валерьевич** — доктор технических наук, профессор, проректор, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, KorolevEV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Korolev E.V. Nanotekhnologiya v stroitel'nom materialovedenii. analiz sostoyaniya i dostizheniy. Puti razvitiya [Nanotechnology in Building Materials Science. Analysis of State and Achievements. Ways of Development]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 11, pp. 47–80. (In Russian)

2. Slovar' nanotekhnologicheskikh i svyazannykh s nanotekhnologiyami terminov [Dictionary of Nanotechnology and Related Terms]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 528 p. (In Russian)

3. Alfimov M.V., Gokhberg L.M., Fursov K.S. Nanotekhnologii: opredeleniya i klassifikatsiya [Nanotechnologies: Definitions and Classification]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnologies]. 2010, vol. 5, no. 7–8, pp. 8–16. (In Russian)

4. Artamonova O.V., Chernyshov E.M. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Ch. 1: Obshchie problemy fundamental'nosti, osnovnye napravleniya issledovaniy i razrabotok [Concepts and Foundations of Technologies For Nanomodifying Building Composites Structures. Part 1: General Fundamental Problems, Main Directions of Research and Development]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 9, pp. 82–95. (In Russian)

5. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Ch. 2: K probleme kontseptual'nykh modeley nanomodifitsirovaniya struktury [Concepts and Foundations of Technologies For Nanomodifying Building Composites Structures. Part 2: on the Problem of the Conceptual Models of Structure Nanomodification]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 4, pp. 73–83. (In Russian)

6. Chernyshov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Ch. 3: Effektivnoe nanomodifitsirovanie sistem tverdeniya tsementa i struktury tsementnogo kamnya (kriterii i usloviya) [Concepts and Foundations of Technologies for Nanomodifying Building Composites Structures. Part 3: Efficient Nanomodification of Cement Hardening Systems and Cement Stone Structure (Criteria and Conditions)]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 10, pp. 54–64. (In Russian)

7. Chernyshov E.M., Potamoshneva N.D., Artamonova O.V. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologii nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Ch. 4: Zol'-gel' tekhnologiya nano-, mikrodispersnykh kristallov portlandita dlya kontaktno-kondensatsionnogo kompaktirovaniya struk-

tur portlanditovogo kamnya i kompozitov na ego osnove [Concepts and Foundations of Technology for Nanomodifying Building Composites Structures. Part 4: Sol-gel Technology of Nano-, Microdispersed Crystals of Portlandite for Contact-Condensation Compaction of Portlandite Stone Structures and Portlandite Based Composites]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 11, pp. 65–74. (In Russian)

8. Chernyshov E.M., Popov V.A., Artamonova O.V. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Ch. 5: Effektivnoe mikro-, nanomodifitsirovanie sistem gidrotermal'no-sinteznogo tverdeniya i struktury silikatnogo kamnya (kriterii i usloviya) [Concepts and Foundations of Technologies For Nanomodifying Structures of Building Composites. Part 5: Effective Micro-, Nanomodification of Hydrothermal-Synthesis Hardening Systems and Silicate Stone Structure (Criteria and Conditions)]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2016, no. 9, pp. 38–46. (In Russian)

9. Artamonova O.V. Kontseptsii i osnovaniya tekhnologiy nanomodifitsirovaniya struktur stroitel'nykh kompozitov. Ch. 6: Poluchenie nanomodifitsirovannykh termal'no-sintezirovannykh sistem tverdeniya dlya konstruksionnoy i funktsional'noy keramiki spetsial'nogo naznacheniya [Concepts and Foundations of Technologies for Nanomodifying Building Composites Structures. Part 6: Preparation of Nanomodified Thermal-Synthesized Hardening Systems For Structural and Functional Special Purpose Ceramics]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2017, no. 5, pp. 98–104. (In Russian)

10. Korolev E.V. Printsip realizatsii nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii [Principle of Realization of Nanotechnology in Building Materials Science]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 6, pp. 60–64. (In Russian)

11. Korolev E.V. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' novykh tekhnologicheskikh resheniy. Analiz i sovershenstvovanie [Technical and Economic Efficiency of New Technological Solutions. Analysis and Improvement]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2017, no. 3, pp. 85–89. (In Russian)

12. Melikhov I.V. *Fiziko-khimicheskaya evolyutsiya tverdogo veshchestva* [Physico-Chemical Evolution of Solid Substance]. Moscow, Binom Publ., 2014, 309 p. (In Russian)

13. Korolev E.V., Grishina A.N., Pustovgar A.P. Poverkhnostnoe natyazhenie v strukturoobrazovanii materialov. Znachenie, raschet i primeneniye [Surface Tension in the

Structuring of Materials. Value, Calculation and Application]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2017, no. 1–2, pp. 104–109. (In Russian)

14. Ryabtsev N. G. *Materialy kvantovoy elektroniki* [Materials of Quantum Electronics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972, 384 p. (In Russian)

15. Brykov A.S., Danilov B.V., Larichkov A.V. Specific Features of Portland Cement Hydration in the Presence of Sodium Hydrosilicates. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006, vol. 79, no. 4, pp. 521–524.

16. Korolev E.V., Grishina A.N. Influence of Nanoscale Barium Hydrosilicates on Composition of Cement Stone. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 683, pp. 90–94.

17. Kuznetsova T.V., Guvalov A.A., Abbasova S.I. Modifikator na osnove tseolitsoderzhashchey porody dlya polucheniya tsementnykh kompozitsiy [Modifier Based on Zeolite-Containing Rock For Obtaining Cement Compositions]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov* [Technique and Technology of Silicates]. 2016, vol. 23, no. 1, pp. 22–24. (In Russian)

18. Brykov A.S., Danilov V.V., Korneev V.I., Larichkov A.V. Effect of Hydrated Sodium Silicates on Cement Paste Hardening. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2002, vol. 75, no. 10, pp. 1577–1579. (In Russian)

19. Mazurok P., Buyun M., Tokarchuk V., Sviderskiy V. Utilization of the Heat-Treated Silicate Rocks in the Cement and Cement Slurry Manufacturing. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva* [Technological Audit and Production Reserves]. 2016, vol. 2, no. 4 (28), pp. 68–74.

20. Inozemtsev A.S., Korolev E.V., Smirnov V.A. Nanoscale Modifier as an Adhesive for Hollow Microspheres to Increase the Strength of High-Strength Lightweight Concrete. *Structural Concrete*. 2017, vol. 18, no. 1, pp. 67–74. (In Russian)

21. Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Moroz M.N. et al. Nanogidrosilikatnye tekhnologii v proizvodstve betonov [Nanohydrosilicate Technologies in the Concretes Production]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 5, pp. 88–91. (In Russian)

22. Maksimova I.N., Makridin N.I., Surov I.A. Vliyanie nanogidrosilikatov kal'tsiya, modifitsirovannykh aprotonnymi kislotami, na formirovanie prochnosti dispersno-kristallitnoy struktury tsementnogo kamnya [Effect of Calcium Nanohydrosilicates Modified with Aprotic Acids on the Formation of the Strength of the Dispersed-Crystalline Structure of Cement Stone]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Construction]. 2014, no. 2, pp. 63–68. (In Russian)

23. Kalashnikov V.I., Volodin V.M., Erofeeva I.V., Abramov D.A. Vysokoeffektivnye samouplotnyayushchiesya poroshkovo-aktivirovannye peschanye betony i fibrobetony [Highly Efficient Self-Compacting Powder-Activated Sand Concretes and Fibrous Concrete]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2015, no. 1–2, pp. 110. (In Russian)

24. Makridin N.I., Vernigorova V.N., Maksimova I.N. O mikrostrukture i sinteze prochnosti tsementnogo kamnya s dobavkami GSK [On the Microstructure and Synthesis of the Strength of Cement Stone with CHS Additives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2003, no. 8, pp. 37–42. (In Russian)

25. Morrison C., Hooper R., Lardner K. The Use of Ferro-Silicate Slag from ISF Zinc Production as a Sand Replacement in Concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003, vol. 33, no. 12, pp. 2085–2089.

26. Atzeni C., Massidda L., Sanna U. Use of Granulated Slag from Lead and Zinc Processing in Concrete Technology. *Cement and Concrete Research*. 1996, vol. 26, no. 9, pp. 1381–1388.

27. Korolev E.V. Otsenka kontsentratsii pervichnykh nanomaterialov dlya modifitsirovaniya stroitel'nykh kompozitov [Assessment of Primary Nano-materials Concentration for Modification of Building Composites]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 6, pp. 31–34. (In Russian)

Received in June 2017.

Adopted in revised form in June 2017.

Approved for publication in June 2017.

About the author: **Korolev Evgeniy Valer'evich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; KorolevEV@mgsu.ru.