

УДК 666.9.035

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 81.09.00

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN usmlqm

DOI 10.62980/2076-0655-2024-284-297

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Козлова И.В.¹, Самченко С.В.¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Современный этап развития строительной индустрии начинает применять нанотехнологии. Нанотехнологии позволяют создавать широкий спектр строительных материалов. Это осуществляется посредством управления как внешней, так и внутренней структурой материалов. Использование нанотехнологий приводит к созданию новых композиционных материалов с поистине уникальными характеристиками. Разработки ученых в области создания строительных материалов на основе нанотехнологий в меньшей степени применяются в промышленном масштабе, чем в других сферах народного хозяйства. В данном исследовании нанотехнологии рассматриваются как совокупность приемов, химических и физико-химических способов, направленных на синтез в объеме или на поверхности материала структур, имеющих хотя бы в одном направлении наноразмер. Методологической основой работы является анализ литературных данных по вопросу использования нанотехнологий в строительном материаловедении. Результатом исследования стало выявление синергического влияния нано и ультрадисперсных частиц на получение новых строительных материалов с использованием нанотехнологий. Получение высококачественного наноструктурного материала, содержащего нано и ультрадисперсные частицы различной природы, связано со значительными трудностями. Их введение в виде порошка в цементную или иную вяжущую матрицу является весьма сложным процессом. Нано- и ультрадисперсные частицы склонны к агрегации. Добиться равномерности их распределения в объеме материала трудная задача, что является предметом многих исследований. В процессе анализа литературных данных авторы пришли к заключению о необходимости применения различных технологических приемов для равномерного распределения наночастиц в объеме материала. Такой подход позволит повысить физико-механические, органолептические и другие свойства строительных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нано и ультрадисперсные частицы, нанотехнологии, углеродные нанотрубки синергический эффект, композиционные материалы, свойства строительных материалов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Козлова И.В., Самченко С.В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов: теоретическое исследование // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 284-297. DOI 10.62980/2076-0655-2024-284-297. EDN usmlqm.

Type of article - review article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN usmlqm

DOI 10.62980/2076-0655-2024-284-297

NANOTECHNOLOGY IN THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS: A THEORETICAL STUDY

Kozlova I.V.¹, Samchenko S.V.¹

¹Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

The modern stage of development of the construction industry begins to apply nanotechnology. Nanotechnology makes it possible to create a wide range of construction materials. This is done by controlling both the external and the internal structure of materials. The use of nanotechnology leads to the creation of new composite materials with truly unique characteristics. Developments of scientists in the field of creation of building materials based on nanotechnology are less applied on an industrial scale than in other spheres of national economy. In this study nanotechnology is considered as a set of techniques, chemical and physicochemical methods aimed at synthesizing in the volume or on the surface of the material structures having at least one direction of nanoscale. The methodological basis of the work is the analysis of literature data on the use of nanotechnology in building materials science. The result of the study was the identification of the synergistic effect of nano- and ultradisperse particles on the production of new building materials using nanotechnology. Obtaining high-quality nanostructured material containing nano- and ultradisperse particles of different nature is associated with significant difficulties. Their introduction in the form of powder into cement or other binding matrix is a very complicated process. Nano- and ultradisperse particles are prone to agglomeration. To achieve uniformity of their distribution in the volume of material is a difficult task, which is the subject of many studies. In the process of analyzing the literature data, the authors came to the conclusion that it is necessary to apply various technological methods for uniform distribution of nanoparticles in the volume of the material. This approach will allow to increase physical-mechanical, organoleptic and other properties of building materials.

KEY WORDS: nano- and ultradisperse particles, nanotechnology, carbon nanotubes, synergistic effect, composite materials, properties of building materials

FOR CITATION: Kozlova I.V., Samchenko S.V. Nanotechnology in the Production of Building Materials: A theoretical study // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No3. – Pp. 284 – 297. DOI 10.62980/2076-0655-2024-284-297. EDN usmlqm.

ВВЕДЕНИЕ

Приоритетным направлением в развитии науки и техники XXI века являются нанотехнологии. Их развитие на уровне атомов и молекул привело к успехам в сферах медицины, радиоэлектроники, машино- и автомобилестроения. В строительном материаловедении также проявлен интерес к нанотехнологиям. Разработки ученых в этой области в меньшей степени применяются в промышленном масштабе, чем в других сферах народного хозяйства. Появление нанотехнологии в строительной отрасли сопровождается значительным прогрессом в строительной индустрии. Конечной целью использования наноматериалов в строительстве является разработка высокоэффективных строительных материалов [1,2].

В настоящее время нанотехнологии рассматриваются как совокупность приемов, химических и физико-химических способов, направленная на синтез в объеме или на поверхности материала структур, имеющих один наноразмер. Это позволяет повысить физико-механические, органолептические и другие свойства материала [3-5]. Такие многофункциональные свойства наноматериалов являются наиболее важными преимуществами использования нанотехнологий по сравнению с другими подходами и обычными материалами [6-9].

Синтез различных видов наночастиц

Сырьем для нанотехнологий служат макрообъекты. Под ними подразумевают любые материалы, диспергированные до объекта размером в несколько нанометров. Такой метод синтеза нанобъектов получил название «bottom down», т.е. сверху вниз. Другой метод получения нанобъектов, связанный с использованием атомов, молекул, наночастиц, называется «bottom up», т.е. снизу вверх [10,11]. Чаще всего получение наночастиц сопровождается методами компьютерного моделирования. С их помощью возможно проследить зарождение и рост наночастиц на подложке. Эти методы позволяют подобрать оптимальные параметры системы и создавать материалы с определенными свойствами [12].

Основными объектами нанотехнологий в настоящее время являются наночастицы, у которых все типичные линейные размеры имеют один порядок величины (не более 100 нм). Если в наночастице прослеживается ярко выраженное упорядоченное расположение атомов или ионов, то их называют нанокристаллитами. Если наночастицы имеют выраженную дискретность системы электронных уровней энергии, то их называют «квантовыми точками» или «искусственными атомами».

Наночастицы по мерности структурного элемента разделяются на [13,14]:

- трехмерные, с размером частиц существенно превышающем 100 нм. Такие наночастицы могут быть сложной формы и строения, но иметь структуру с упорядоченным строением из нанофрагментов;
- двухмерные, это наноструктурированные поверхности, пленки и слои толщиной в несколько нанометров. Два размера в таких наночастицах превышают 100 нм;
- одномерное, это нитевидные частицы, нанотрубки и волокна. Такие наночастицы могут содержать большое количество атомов в одном из измерений, однако их свойства

INTRODUCTION

Nanotechnology is a priority in the development of science and technology of the 21st century. Their development at the level of atoms and molecules has led to successes in the fields of medicine, radio electronics, machine and automobile construction. Building materials science has also shown interest in nanotechnology. Developments of scientists in this field are less applied on an industrial scale than in other spheres of national economy. The emergence of nanotechnology in the construction industry is accompanied by significant progress in the construction industry. The ultimate goal of using nanomaterials in construction is the development of high-performance building materials [1,2].

Currently, nanotechnology is considered as a set of techniques, chemical and physicochemical methods aimed at synthesizing in the volume or on the surface of a material structures having a single nanoscale. This makes it possible to increase physical, mechanical, organoleptic and other properties of the material [3-5]. Such multifunctional properties of nanomaterials are the most important advantages of using nanotechnology compared to other approaches and conventional materials [6-9].

Synthesis of different types of nanoparticles

The raw materials for nanotechnology are macro-objects. They are any material dispersed to an object a few nanometers in size. This method of synthesizing nano-objects is called “bottom down”, i.e. from top to bottom. Another method of obtaining nano-objects associated with the use of atoms, molecules, nanoparticles is called “bottom up”, i.e. bottom up [10,11]. Most often the production of nanoparticles is accompanied by computer modeling methods. With their help, it is possible to trace the nucleation and growth of nanoparticles on the substrate. These methods make it possible to select the optimal parameters of the system and create materials with certain properties [12].

The main objects of nanotechnology at present are nanoparticles, in which all typical linear dimensions have one order of magnitude (not more than 100 nm). If a nanoparticle has a pronounced ordered arrangement of atoms or ions, they are called nanocrystallites. If nanoparticles have a pronounced discrete system of electronic energy levels, they are called “quantum dots” or “artificial atoms”.

Nanoparticles are divided into [13,14] according to the dimensionality of the structural element:

- Three-dimensional, with particle size significantly exceeding 100 nm. Such nanoparticles can be of complex shape and structure, but have a structure with an ordered structure of nanofragments;
- two-dimensional, these are nanostructured surfaces, films and layers a few nanometers thick. Two dimensions in such nanoparticles exceed 100 nm;
- one-dimensional, these are filamentous particles, nanotubes and fibers. Such nanoparticles may contain a large number of atoms in one dimension, but their properties remain characteristic of the nanocrystalline state;

остаются характерными для нанокристаллического состояния;

- нульмерные или нанокластеры, это частицы упорядоченного строения размером от 1 до 5 нм, содержащие до 1000 атомов.

Значительное число атомов в наночастицах находятся на поверхности. Их доля увеличивается с уменьшением размера частиц ниже некоторой пороговой величины. Это вносит существенный вклад в энергию системы и влияет на ряд факторов. Среди таких факторов являются температура плавления, растворимость, сдвиг химического равновесия и другие. [15, 16]. Изменение свойств в системе связано с физической природой прочности наночастиц. Прочность наночастиц обусловлена силами взаимодействия между составляющими их атомами или ионами [17].

В общем случае, с точки зрения нанотехнологий наночастицы можно охарактеризовать, как мельчайшие, доступные в обычных условиях частицы вещества, манипуляция с которыми позволяют создавать наноустройства и материалы с новыми свойствами [11].

Для синтеза различных видов наночастиц, например, смешанных наноксидных систем [18-20], наноцеолитов [21], нанокремнезема [22, 23] и др., чаще всего применяется золь-гель метод. В золь-гель методе основной химический процесс протекает по реакции поликонденсации. Результатом этой реакции является образование и рост наночастиц. Связующие свойства золь в реакции поликонденсации обеспечивают образование геля. При этом происходит переход системы от свободнодисперсного состояния к связнодисперсному состоянию [22]. Это особенно актуально для элементоорганических соединений. Такие соединения являются составляющими композита [24, 25].

Свободная внутренняя энергия дисперсной системы может служить энергетическим критерием, по которому возможно упорядочить сырье для нанотехнологий. Свободная внутренняя энергия возникает в результате самоорганизации предельно высокодисперсной коллоидной системы в жидкой дисперсионной среде. Жидкой дисперсионной средой является золь. Переход на следующий энергетический уровень взаимодействия дисперсных частиц в золе связан с образованием геля. Образование геля происходит в результате действия молекулярных сил различной природы. Образующийся гель обладает некоторыми свойствами твердых тел, таких как прочность, упругость, пластичность, способность сохранять форму [26].

Золь-гель метод может быть реализован при использовании специальных приемов, основанных на механоактивации, приводящий к образованию деформационных структур на наноуровне [27].

Получение наноструктурных порошков оксидов металлов возможно с помощью механохимического синтеза [18]. Вначале синтеза исходную соль обезвоживают, чтобы избежать растворения частиц соли в собственной кристаллизационной воде. Далее проводят механоактивационную обработку соли в планерной мельнице в присутствии фазоразделителя. В качестве фазоразделителя может быть использована соль нитрита натрия NaNO_2 . Фазоразделитель выполняет функцию окислителя и солевой матрицы. Фазоразделитель предотвращает агломерацию образующихся наночастиц оксидов металла. При механоактивации происходит равномерное перемешивание соли с фазоразделителем и изменение размера частиц. Это сопровождается переходом от процесса измельчения к процессу

- zero-dimensional or nanoclusters, these are particles of an ordered structure of 1 to 5 nm in size, containing up to 1000 atoms.

A significant number of atoms in nanoparticles are on the surface. Their fraction increases as the particle size decreases below some threshold value. This makes a significant contribution to the energy of the system and affects a number of factors. Among such factors are melting point, solubility, chemical equilibrium shift and others. [15, 16]. The change in properties in the system is related to the physical nature of nanoparticle strength. The strength of nanoparticles is due to the interaction forces between the constituent atoms or ions [17].

In general, from the point of view of nanotechnology, nanoparticles can be characterized as the smallest, normally accessible particles of matter, manipulation of which allows the creation of nanodevices and materials with new properties [11].

The sol-gel method is most commonly used to synthesize various types of nanoparticles, such as mixed nanoxide systems [18-20], nano-zeolites [21], nanosilica [22, 23], and others. In the sol-gel method, the main chemical process proceeds by polycondensation reaction. The result of this reaction is the formation and growth of nanoparticles. The binding properties of the sols in the polycondensation reaction ensure the formation of the gel. In this case, the transition of the system from a freely dispersed state to a cohesive dispersed state occurs [22]. This is especially relevant for organoelement compounds. Such compounds are components composite [24, 25].

The free internal energy of a disperse system can serve as an energy criterion by which it is possible to order raw materials for nanotechnology. Free internal energy arises as a result of self-organization of an extremely highly dispersed colloidal system in a liquid dispersion medium. The liquid dispersion medium is a sol. The transition to the next energy level of interaction of dispersed particles in the sol is associated with the formation of a gel. Gel formation occurs as a result of the action of molecular forces of different nature. The formed gel has some properties of solids, such as strength, elasticity, plasticity, ability to retain shape [26].

The sol-gel method can be realized by using special techniques based on mechanoactivation leading to the formation of deformation structures at the nanoscale [27].

Obtaining nanostructured metal oxide powders is possible using mechanochemical synthesis [18]. At the beginning of the synthesis, the initial salt is dehydrated to avoid dissolution of salt particles in its own crystallization water. Next, the salt is mechanoactivated in a planer mill in the presence of a phase separator. Sodium nitrite salt NaNO_2 may be used as a phase splitter. The phase splitter acts as an oxidizer and salt matrix. The phase separator prevents agglomeration of the formed metal oxide nanoparticles. During mechanoactivation, the salt and the phase separator are uniformly mixed and the particle size is changed. This is accompanied by a transition from the process of grinding to the process of plastic deformation.

пластической деформации. Частицы обрабатываемого материала накапливают энергию в виде структурных дефектов (дислокаций, ионных и атомных вакансий, междоузельных ионов). Такая особенность наноструктурных порошков позволяет использовать их в качестве дополнительной структурной составляющей в бетонной смеси [28,29].

Эффективной добавкой в цементных бетонах является наноцеолиты, которые получают в результате механоактивации [21, 30, 31]. Цеолиты представляют собой кристаллические водные алюмосиликаты щелочных и щелочноземельных металлов [32]. В их составе содержатся активные Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , обеспечивающие им высокую поверхностную активность и адсорбционную способность. Это позволяет переводить их в нанодисперсное состояние и использовать в бетоне в качестве нанодобавки. Цеолиты, переведенные в нанодисперсное состояние, в составе цементных бетонов способствуют аморфизации гидросиликатов кальция и омоноличиванию структуры затвердевшей цементной матрицы. Введение наноцеолитов в состав бетона приводит к росту водонепроницаемости в 2 – 3 раза и улучшению технологических свойств.

Нанотехнологии используются при гидрофобизации минеральных порошков. Тонкое измельчение минеральных порошков совместно с гидрофильными минеральными породами способствует получению наночастиц. Чем более твердые или абразивные частицы минерального компонента, тем более тонко измельчится гидрофобизатор. Наночастицы минеральных порошков покрывают своими тончайшими частицами поверхность минеральных частиц. Это приводит к полной гидрофобизации гидрофильного материала. Подобные нанотехнологии позволяют проводить процесс гидрофобизации доменного гранулированного шлака стеаратом цинка. В комплексе с зернистым доломитом и алкиларилсульфонатом натрия (ААСН) гидрофобизированным доменным гранулированным шлаком получают высоко гидрофобные композиционные материалы [33].

Наноразмерного состояния товарного продукта можно достичь методом ультразвукового диспергирования в органическом растворителе. Таким способом можно получают нанодисперсный диоксид титана ($d = 86,36 - 187,40$ нм) из порошкообразных титановых белил анатазной и рутильной модификации. Строительные растворы, содержащие в своем составе наночастицы диоксида титана, имеют повышенные прочностные характеристики по сравнению с бездобавочным образцом. При этом, образцы, содержащие анатазную форму нанодисперсного TiO_2 , обладают более высокой прочностью, чем образцы, содержащие рутильную форму диоксида титана. Таким образом, TiO_2 можно применять не только в качестве белого пигмента, но и нанодобавки в композиционных строительных материалах [34-36].

Ультразвуковая обработка в сочетании с пиролизом аэрозолей растворов солей позволяет получать различные нанодисперсные порошки любых оксидов металлов, чистых металлов и металлокерамических композитов. В работе [37] разработана и сконструирована установка пиролиза аэрозолей. Эта установка позволяет получать полые наноструктурные микросферы размером 0,5 – 5 мкм. Стенки наноструктурных микросфер образованы наночастицами с размером 10 – 20 нм. При обработке в ультразвуковом кавитационном поле с частотой 22 МГц микросферы

The particles of the treated material accumulate energy in the form of structural defects (dislocations, ionic and atomic vacancies, interdot ions). This feature of nanostructured powders allows them to be used as an additional structural component in the concrete mixture [28,29].

An effective additive in cement concrete is nanozeolites, which are obtained by mechanical activation [21, 30, 31]. Zeolites are crystalline aqueous aluminosilicates of alkali and alkaline earth metals [32]. They contain active Na_2O , Al_2O_3 , SiO_2 , providing them with high surface activity and adsorption capacity. This allows them to be converted into nanodispersed state and used in concrete as nanoadducts. Zeolites converted into nanodispersed state in the composition of cement concrete contribute to the amorphization of calcium hydrosilicates and monolithization of the structure of the hardened cement matrix. The introduction of nanozeolites into the concrete composition leads to an increase in water resistance by 2 - 3 times and improvement of technological properties.

Nanotechnology is used in the hydrophobization of mineral powders. Fine grinding of mineral powders together with hydrophilic mineral rocks contributes to the production of nanoparticles. The harder or more abrasive the particles of the mineral component, the finer the hydrophobizer will be milled. The mineral powder nanoparticles cover the surface of the mineral particles with their finest particles. This results in complete hydrophobization of the hydrophilic material. Such nanotechnology allows the process of hydrophobization of blast furnace granulated slag with zinc stearate. In complex with granular dolomite and sodium alkylaryl sulfonate (SAS) hydrophobized blast-furnace granulated slag produces highly hydrophobic composite materials [33].

The nanoscale state of the commercial product can be achieved by ultrasonic dispersion in an organic solvent. Nanodispersed titanium dioxide ($d = 86.36 - 187.40$ nm) from powdered titanium whites of anatase and rutile modification can be obtained in this way. The mortars containing titanium dioxide nanoparticles in their composition have increased strength characteristics in comparison with the additive-free sample. Moreover, samples containing the anatase form of nanodispersed TiO_2 have higher strength than samples containing the rutile form of titanium dioxide. Thus, TiO_2 can be used not only as a white pigment but also as a nanoadduct in composite building materials [34-36].

Ultrasonic treatment in combination with pyrolysis of salt solution aerosols allows to obtain various nanodispersed powders of any metal oxides, pure metals and metal-ceramic composites. In [37], an aerosol pyrolysis unit was designed and constructed. This unit allows to obtain hollow nanostructured microspheres of 0.5 - 5 microns in size. The walls of nanostructured microspheres are formed by nanoparticles with the size of 10 - 20 nm. When treated in an ultrasonic cavitation field with a frequency of 22 MHz, the microspheres are destroyed. This

разрушаются. При этом получается однородный нанопорошок с размерами частиц в пределах 10 – 15 нм.

Существуют и другие методы получения нанодисперсных порошков. В работах [38, 39] наноразмерные порошки никеля и композиции Fe-Ni были получены методом жидкофазного восстановления прекурсоров из водных растворов солей. Соль $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ подвергают восстановлению в трубчатой печи в атмосфере водорода при температуре 450°C в течение 10 минут. Полученный порошок наноникеля обладает высокой активностью к спеканию, имеет низкую пористость и повышенную микротвердость [38]. В работах [40, 41] получение добавки на основе системы $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ применялись два способа. Первый способ был твердофазной классической керамической технологией. Вторым способом был цитратный способ. Было установлено, что Средний размер частиц, полученных по твердофазной технологии, составляет 50 мкм. Средний размер частиц, полученных цитратным способом, составляет от 10 до 0,33 мкм. Модифицированные образцы затвердевшей цементной пасты добавкой на основе системы $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ проявляют фотокаталитическую активность [41].

Получение нановолокнистых оксидов и гидроксидов алюминия осуществляется разными способами. Применяются следующие способы: золь-гель метод, гидротермальный синтез путем осаждения или гидролиза алюминийорганических соединений, кислотным и щелочным осаждением глинозема, термическим диспергированием гиббсита. Все эти методы являются сложно реализуемыми. Наиболее эффективно получать нановолокна вследствие взаимодействия алюминия с водой осуществляемого двумя различными приемами [42]. Первый прием заключается во взаимодействии с водой нанодисперсных частиц алюминия, полученных методом электрического взрыва проводника в атмосфере азота. Второй прием заключается в получении наночастиц непосредственно в воде с использованием электроразрядной технологии. Нановолокна оксида и гидроксида алюминия, полученные предложенным методом, могут быть использованы как в производстве катализаторов и сорбентов, так и в производстве специальных цементов и композиционных материалов.

Одним из эффективных способов получения наноразмерных прекурсоров из кристаллогидратов, полученных при гидратации цемента, является гидродинамическое воздействие на предварительно гидратированный цемент. При гидродинамическом воздействии в роторно-пульсационных аппаратах (РПА), возможно получение ультрадисперсной добавки цементной суспензии. Цементная суспензия содержит продукты гидратации минералов портландцемента и ультратонких частиц цемента. При гидродинамическом воздействии на предварительно гидратированный цемент с поверхности цементных зерен в водную среду переходят кристаллогидраты. Ультратонкие частицы образуются за счет сверхтонкого измельчения ранее гидратированных частиц цемента в результате их диспергации. Введение таких ультрадисперсных гидратных образований обеспечивает более высокую прочность твердеющей цементной композиции в начальные сроки твердения [43, 44, 45].

Управление свойствами системы на наноуровне

Многие функциональные свойства строительным материалам могут достигаться применением нанотехнологий,

produces a homogeneous nanopowder with particle sizes in the range of 10 - 15 nm.

There are also other methods for obtaining nanodispersed powders. In [38, 39], nanosized nickel powders and Fe-Ni compositions were obtained by liquid-phase reduction of precursors from aqueous salt solutions. The salt $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ was subjected to reduction in a tube furnace in a hydrogen atmosphere at 450°C for 10 min. The obtained nanonickel powder has high sintering activity, low porosity and increased microhardness [38]. In [40, 41], two methods were used to obtain the additive based on $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ system. The first method was solid-phase classical ceramic technology. The second method was the citrate method. It was found that the Average particle size of the particles obtained by solid-phase technology was 50 μm . The average particle size obtained by the citrate method is 10 to 0.33 μm . The modified samples of hardened cement paste with an additive based on $\text{TiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ system exhibit photocatalytic activity [41].

Production of nanofibrous aluminum oxides and hydroxides is carried out by different methods. The following methods are used: sol-gel method, hydrothermal synthesis by precipitation or hydrolysis of organoaluminum compounds, acid and alkaline precipitation of alumina, thermal dispersion of gibbsite. All these methods are difficult to realize. It is most effective to obtain nanofibers due to the interaction of aluminum with water carried out by two different methods [42]. The first technique consists in the interaction with water of nanodispersed aluminum particles obtained by electric explosion of a conductor in a nitrogen atmosphere. The second technique consists in obtaining nanoparticles directly in water using electrical discharge technology. Aluminum oxide and hydroxide nanofibers obtained by the proposed method can be used both in the production of catalysts and sorbents and in the production of special cements and composite materials.

One of the effective ways to obtain nanosized precursors from crystalline hydrates obtained during cement hydration is hydrodynamic impact on pre-hydrated cement. At hydrodynamic influence in rotary pulsation apparatuses (RPA), it is possible to obtain ultradisperse additive of cement suspension. Cement slurry contains hydration products of Portland cement minerals and ultrafine cement particles. Under hydrodynamic action on the pre-hydrated cement, crystalline hydrates are transferred from the surface of cement grains to the aqueous medium. Ultrafine particles are formed due to ultrafine grinding of previously hydrated cement particles as a result of their dispersion. The introduction of such ultrafine hydrate formations provides higher strength of the hardening cement composition in the initial curing period [43, 44, 45].

Control of system properties at the nanoscale

Many functional properties of building materials can be achieved by using nanotechnology, which allows

которые позволяют управлять различными свойствами и параметрами системы на наноуровне. Наноуровень располагается сразу за атомным [5, 46], вследствие чего физико-химические процессы, протекающие в цементной матрице, тесно связаны с поромеханикой. Возникающие внутри материала поры заполняются структурной водой. Получается элементарная твердая фаза, имеющая размеры порядка $5,6 \times 10^{-9}$ м и отвечающая за пороупругие свойства системы. Такие свойства предопределяют поведение цементных материалов при высушивании, под нагрузкой и при старении.

Управление свойствами системы на наноуровне и повышение качества изделий способствует использованию новых наноструктурированных материалов. Получение, исследование структуры и свойств наноструктурированных материалов является сложным и трудоемким процессом. Разнообразие уже существующих наноматериалов и высокая реакционная способность входящих в их состав наночастиц, делает возможным получать новые композиционные материалы и изучать их свойства. Некоторые недостатки портландцемента, такие как низкие значения прочности на изгиб, пластичности и вязкости, а также проблемы сопротивления при взаимодействии с химическими веществами, вызывают опасения относительно надежности и долговечности таких материалов [2, 47, 48]. Таким образом, использование наноматериалов наряду с цементными материалами может решить эти проблемы и значительно повысить механические свойства бетона.

В настоящее время наиболее известными наноматериалами являются углеродные нанотрубки (УНТ), которые сочетают в себе свойства молекул и твердого тела. Такие свойства обеспечивают высокие физико-механические характеристики, такие как прочность и модуль упругости (в 8 и 5 раз выше стали, соответственно).

УНТ обладают не только уникальными техническими характеристиками, но также интересны с позиции химии и физикохимии. Это связано со способностью УНТ присоединять к своей поверхности разнообразные радикалы, которые могут служить каталитическими центрами или зародышами для осуществления различных химических превращений [49].

Функциональные группы УНТ можно использовать в качестве основы для химических реакций присоединения большого числа элементов и функциональных групп. Это приводит к ориентированию кластерных образований вдоль оси УНТ и способствует сращиванию с кристаллогидратами портландцемента. Такое сращивание с кристаллогидратами обуславливает армирование цементной системы. Затвердевшая цементная паста с наночастицами имеет более плотную структуру по сравнению с обычной цементной пастой из-за уменьшения количества пор и присутствия большего количества кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а также увеличения количества C-S-H [50,51].

За последнее десятилетие значительно возросло число работ, отражающих прикладной характер УНТ и других углеродсодержащих наноматериалов в производстве различных строительных материалов [52-55].

Примером применения УНТ в производстве строительных материалов является модифицирование ими ангидридных и фторангидридных композитов [56, 57]. Было установлено, что введение многослойных УНТ меняет структуру кристаллов гипса. Морфология кристаллов из пластинчатой переходит в ромбическую с более плотной упаковкой кристаллов. Это способствует уменьшению

controlling various properties and parameters of the system at the nanoscale. The nanoscale is located just after the atomic level [5, 46], so that physicochemical processes occurring in the cement matrix are closely related to poromechanics. The pores appearing inside the material are filled with structural water. An elementary solid phase of the order of 5.6×10^{-9} m is obtained, which is responsible for the porosity properties of the system. Such properties predetermine the behavior of cement materials during drying, under load and aging.

Control of system properties at the nanoscale and improvement of product quality promotes the use of new nanostructured materials. Obtaining, studying the structure and properties of nanostructured materials is a complex and time-consuming process. The variety of already existing nanomaterials and the high reactivity of their constituent nanoparticles, makes it possible to obtain new composite materials and study their properties. Some disadvantages of Portland cement, such as low values of flexural strength, ductility and toughness, as well as resistance problems when interacting with chemicals, raise concerns about the reliability and durability of such materials [2, 47, 48]. Thus, the use of nanomaterials along with cementitious materials can solve these problems and significantly improve the mechanical properties of concrete.

Currently, the best known nanomaterial is carbon nanotubes (CNTs), which combine the properties of molecules and solids. Such properties provide high physical and mechanical characteristics such as strength and elastic modulus (8 and 5 times higher than steel, respectively).

CNTs have not only unique technical characteristics, but are also interesting from the point of view of chemistry and physicochemistry. This is due to the ability of CNTs to attach a variety of radicals to their surface, which can serve as catalytic centers or germs for various chemical transformations [49].

The functional groups of CNTs can be used as a basis for chemical reactions of addition of a large number of elements and functional groups. This leads to the orientation of cluster formations along the CNT axis and promotes the bonding with Portland cement crystalline hydrates. Such splicing with crystalline hydrates determines the reinforcement of the cement system. The hardened cement paste with nanoparticles has a denser structure compared to conventional cement paste due to the reduced number of pores and the presence of more $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals, as well as an increased amount of C-S-H [50,51].

Over the last decade, the number of works reflecting the applied nature of CNTs and other carbon-containing nanomaterials in the production of various building materials has increased significantly [52-55].

An example of the application of CNTs in the production of construction materials is their modification of anhydrite and fluorohydrite composites [56, 57]. It was found that the introduction of multilayer CNTs changes the structure of gypsum crystals. The morphology of crystals from lamellar to rhombic with denser packing of crystals. This contributes to the reduction of defectivity of the

дефектности самих кристаллов. В результате ангидритовая матрица уплотняется, а прочность затвердевшего материала увеличивается.

Большинство исследователей придерживается мнения, что сначала актуально проводить структурирование воды УНТ, а потом затворять ею цемент с целью повышения эксплуатационных свойств затвердевшего продукта. В работах [58-62] отмечен положительный эффект от использования наноструктурированной воды при затворении вяжущего. Наблюдалось увеличение прочности бетонов до 20 – 30 % [58, 59] и пенобетонов до 50% [62].

Широко используется ультразвуковая обработка [63-65] с использованием теплового диспергирования наноразмерного модификатора. Среда, в которой происходит диспергирования наноразмерного модификатора является лиофильной по отношению к модификатору. Леофильность среды позволяет добиться положительного эффекта распределения частиц в среде.

Помимо акустической кавитации (ультразвуковой обработки) были предложены и другие способы диспергирования. Такие способы основаны на эффекте гидродинамической кавитации и диспергировании нано и ультрадисперсных частиц в высокоскоростных роторных смесителях. Эти способы позволяют получать минеральные дисперсии, обеспечивающие повышение эксплуатационных свойств композиционных материалов и бетонов на их основе [43, 44, 66].

Наряду с задачей повышения прочности портландцемента также актуальной проблемой является повышение его биостойкости. Образование плесени в помещениях с повышенной влажностью может достигать до критических значений. Для предотвращения образования плесневых грибов или устранения микологических последствий требуется вводить в цемент или бетон, биоактивные добавки. Такие добавки способны ингибировать биодеструктивные процессы в цементном камне и при этом не оказывать губительного действия на окружающую среду. Нами разработана добавка на основе системы $TiO_2-Bi_2O_3$ для цементных композитов [68] позволяющая получать композиции с противогрибковыми свойствами [67, 69].

Среди техногенных материалов, относящимся к наноминеральным дисперсиям, являются шламовые отходы. Образование шламовых отходов происходит в системе золь-гель (сточная вода-осадок). Наноминеральные частицы имеют фрактальную структуру. Благодаря такой структуре их можно рассматривать в качестве нанокompонента в многокомпонентных смесях.

В настоящее время для различных целей в промышленном масштабе выпускается широкий ассортимент продуктов на основе SiO_2 в виде золь-нано- и ультрадисперсного кремнезема. Такие добавки эффективно применяются в производстве строительных материалов [70]. В составе бетона ультрадисперсный кремнезем одновременно выполняет две функции: наполнителя и активной добавки. Такое его использование способствует формированию плотной структуры камня и увеличению прочности материала, а также снижают высолообразование и щелочно-силикатную коррозию [70-72].

В последнее время актуально получать порошки с модифицированной поверхностью. Интерес к ним обусловлен возможностью регулирования свойств композиционных материалов, в составе которых они могут быть применены. Примером использования наномодифицированных

crystals themselves. As a result, the anhydrite matrix compacts and the strength of the hardened material increases.

The majority of researchers are of the opinion that it is important to first structure water with CNTs and then to mix cement with it in order to improve the performance properties of the hardened product. In [58-62], a positive effect of using nanostructured water in binder mixing was observed. An increase in the strength of concrete up to 20-30% [58, 59] and foam concrete up to 50% [62] was observed.

Ultrasonic treatment [63-65] using thermal dispersion of nanoscale modifier is widely used. The medium in which the dispersion of the nanoscale modifier takes place is lyophilic with respect to the modifier. The lyophilicity of the medium allows to achieve a positive effect of particle distribution in the medium.

In addition to acoustic cavitation (ultrasonic treatment), other dispersing methods have been proposed. Such methods are based on the effect of hydrodynamic cavitation and dispersion of nano- and ultradisperse particles in high-speed rotary mixers. These methods make it possible to obtain mineral dispersions that provide an increase in the performance properties of composite materials and concrete based on them [43, 44, 66].

Along with the task of increasing the strength of Portland cement, increasing its biostability is also an urgent problem. Mold formation in rooms with high humidity can reach critical values. To prevent the formation of mold fungi or to eliminate mycological consequences it is necessary to introduce into cement or concrete, bioactive additives. Such additives are able to inhibit biodegradative processes in cement stone and at the same time do not have a destructive effect on the environment. We have developed an additive based on $TiO_2-Bi_2O_3$ system for cement composites [68], which allows to obtain compositions with antifungal properties [67, 69].

Among the anthropogenic materials related to nanomineral dispersions are sludge wastes. The formation of sludge waste occurs in the sol-gel system (wastewater-sludge). Nanomineral particles have a fractal structure. Due to this structure, they can be considered as a nanocomponent in multicomponent mixtures.

At present, a wide range of SiO_2 -based products in the form of nano- and ultradispersed silica sols are produced on an industrial scale for various purposes. Such additives are effectively used in the production of building materials [70]. In the composition of concrete, ultradispersed silica simultaneously performs two functions: filler and active additive. Its use contributes to the formation of a dense stone structure and increases the strength of the material, as well as reducing the formation of efflorescence and alkali-silicate corrosion [70-72].

Recently, it is urgent to obtain powders with modified surface. The interest to them is due to the possibility of regulating the properties of composite materials in which they can be used. An example of the use of nanomodified materials in the production of new generation concretes is

материалов в производстве бетонов нового поколения может служить разработка А.С. Иноземцева [73-75]. С целью получения высокопрочных легких бетонов он применял в качестве наполнителя стеклянные и алюмосиликатные полые микросферы, поверхность которых была обработана наномодификатором, состоящим из золь кремневой кислоты и гидроксида железа (III). В ходе проведенных исследований им было установлено следующее: комплексный наноразмерный модификатор в составе микросфер интенсифицирует гидратацию цемента и увеличивает количество гидросиликатов кальция на границе раздела фаз «цементный камень – наномодифицированная микросфера». Это качество обеспечивает формирование плотной и прочной структуры, способной сопротивляться трещинообразованию. Использование наномодифицированных микросфер обеспечивает снижение хрупкости бетона, увеличение модуля упругости на 13 – 36 %, а также увеличение его водостойкости (коэффициент водостойкости более 0,95) и морозостойкости (марка F300). Такие высокие эксплуатационные характеристики легкого бетона были получены вследствие совмещения рецептурных и технологических факторов. Рецептурные факторы отвечают за количественный состав компонентов (вяжущее, наполнитель, наноразмерный модификатор, пластификатор) и прочность на границе раздела фаз «наполнитель – цементно-минеральная матрица». Технологические факторы отвечают за продолжительность и интенсивность перемешивания компонентов, температуру и интенсивность тепловлажностной обработки и другие технологические процедуры. Рецептурные и технологические факторы с использованием наноразмерного компонента, можно рассматривать как элементы нанотехнологий в строительном материаловедении [76].

Нанотехнологический и энергосберегающий подход к созданию новых материалов дорожного и гидротехнического строительства был применен и в серных композитах [77, 78]. Серные композиты с наномодифицирующими компонентами могут служить в защите от различных видов агрессивных воздействий среды. Разработанный коррозионностойкий композит на аппретированном кварцевом наполнителе обладает практически универсальной стойкостью. Такая стойкость композитов объясняется созданием на поверхности частиц наполнителя тонкого наноразмерного слоя аппрета (каучука марки СКДН-11). Образование наноразмерного слоя обеспечивает снижение внутренних напряжений и предотвращает химическое взаимодействие на границе «сера-наполнитель». При этом увеличиваются физико-механические свойства до 50 % и эксплуатационные до 20 – 30%.

Заключение

В процессе анализа литературных данных авторы пришли к заключению, что нанотехнологии становятся предметом многих исследователей в строительном материаловедении.

Под категорию наноструктурных минеральных вяжущих и широкой гаммы других материалов строительного и отделочного назначения попадают не только материалы, содержащие в своем составе УНТ и углеродсодержащие нанокomпоненты, но и другие нано- и ультрадисперсные частицы различного генезиса.

Получение высококачественного наноструктурного материала, содержащего нано- и ультрадисперсные частицы различной природы, связано со значительными

the development of A.S. Inozemtsev [73-75]. In order to obtain high-strength lightweight concrete, he used glass and aluminosilicate hollow microspheres as fillers, the surface of which was treated with a nanomodifier consisting of silicic acid and iron (III) hydroxide sols. In the course of his research, he found the following: complex nanosized modifier in the composition of microspheres intensifies the hydration of cement and increases the amount of calcium hydrosilicates at the interface “cement stone - nanomodified microsphere”. This quality ensures the formation of a dense and strong structure capable of resisting cracking. The use of nanomodified microspheres provides a reduction in the brittleness of concrete, an increase in the modulus of elasticity by 13 - 36 %, as well as an increase in its water resistance (water resistance coefficient of more than 0.95) and frost resistance (grade F300). Such high performance characteristics of lightweight concrete were obtained due to the combination of formulation and technological factors. The formulation factors are responsible for the quantitative composition of the components (binder, aggregate, nanoscale modifier, plasticizer) and the strength at the interface “aggregate - cement-mineral matrix”. Technological factors are responsible for the duration and intensity of mixing of components, temperature and intensity of heat and moisture treatment and other technological procedures. The formulation and technological factors using nanoscale component can be considered as elements of nanotechnology in building materials science [76].

Nanotechnological and energy-saving approach to the creation of new materials for road and hydraulic engineering was also applied to sulfur composites [77, 78]. Sulfur composites with nanomodifying components can serve in protection against various types of aggressive environmental influences. The developed corrosion resistant composite on appretized quartz filler has almost universal resistance. Such resistance of composites is explained by creation on the surface of filler particles of a thin nanoscale layer of the appretizer (rubber of SKDN-11 mark). The formation of nanoscale layer provides reduction of internal stresses and prevents chemical interaction at the boundary “sulfur-filler”. This increases physical and mechanical properties up to 50 % and operational properties up to 20 - 30 %.

Conclusion

In the process of analyzing the literature data, the authors concluded that nanotechnology is becoming the subject of many researchers in building materials science.

The category of nanostructured mineral binders and a wide range of other materials for construction and finishing purposes includes not only materials containing CNTs and carbon-containing nanocomponents, but also other nано- and ultradisperse particles of various genesis.

Obtaining high-quality nanostructured material containing nano- and ultradisperse particles of different nature is associated with significant difficulties. Their introduction in the form of powder into cement or other

трудностями. Их введение в виде порошка в цементную или иную вяжущую матрицу является весьма сложным процессом. Нано- и ультрадисперсные частицы склонны к агломерации. Добиться равномерности их распределения в объеме материала трудная задача, что является предметом многих исследований. Анализ литературных данных позволяет заключить о необходимости применения различных технологических приемов для равномерного распределения наночастиц в объеме материала. Такой подход позволит повысить физико-механические, органолептические и другие свойства строительных материалов.

Инновации, относящиеся к наноцементам и бетонам, связаны с оптимизацией физико-механических свойств и формированием дополнительных качеств. Это приводит к экономии материальных и энергетических ресурсов на каждом этапе производства. Использование нанотехнологий в производстве строительных материалов обуславливает оригинальность дизайна конструкций и нового архитектурного видения зданий и сооружений.

Учитывая уникальные характеристики наноматериалов, интерес исследователей заключается в изучении влияния включения различных типов этих материалов на улучшение свойств различных строительных материалов. Однако необходимы дальнейшие исследования для оценки дополнительной гибридизации и синергического влияния наноматериалов как на макро-, так и на микроструктуру материалов.

Литература:

1. Balaguru, P.; Chong, K. Nanotechnology and Concrete: Research Opportunities; ACI Special Publication; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2008; pp. 15–28. [[Google Scholar](#)]
2. Moses Karakouzian, Visar Farhangi, Marzieh Ramezani Farani, Alireza Joshaghani, Mehdi Zadehmohamad and Mohammad Ahmadzadeh Mechanical Characteristics of Cement Paste in the Presence of Carbon Nanotubes and Silica Oxide Nanoparticles: An Experimental Study // *Materials* 2021, 14(6), 1347; <https://doi.org/10.3390/ma14061347>
3. Королев, Е.В. Некоторые положения нанотехнологии в строительном материаловедении / Е.В. Королев, А.Н. Гришина // Сб. трудов международной научной конференции «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образованию» – М.: МГСУ, 2011. – Т.2. – С. 94 – 102.
4. Родионов Р.Б. Нанотехнологии – инновационное направление развития строительной индустрии / Р.Б. Родионов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* – 2006. – №9. – С. 62 – 64.
5. Фаликман, В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в строительстве: сегодня и завтра / В.Р. Фаликман // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* – 2009. – №1. – С. 64 – 68.
6. Gong, K.; Pan, Z.; Korayem, A.H.; Qiu, L.; Li, D.; Collins, F.; Wang, C.M.; Duan, W.H. Reinforcing effects of graphene oxide on Portland cement paste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2015, 27, 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Muzenski, S.; Flores-Vivian, I.; Farahi, B.; Sobolev, K. Towards ultrahigh performance concrete produced with aluminum oxide nanofibers and reduced quantities of silica fume. *Nanomaterials* 2020, 10, 2291. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Tahmouresi, B.; Nemati, P.; Asadi, M.A.; Saradar, A.; Mohtasham Moein, M. Mechanical strength and microstructure of engineered cementitious composites: A new configuration for direct tensile strength, experimental and numerical analysis. *Constr. Build. Mater.* 2021, 269, 121361. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Satvati, S.; Cetin, B.; Ashlock, J.C.; Ceylan, H.; Rutherford, C. Binding Capacity of Quarry Fines for Granular Aggregates.

binding matrix is a very complicated process. Nano- and ultradisperse particles are prone to agglomeration. To achieve uniformity of their distribution in the volume of the material is a difficult task, which is the subject of many studies. Analysis of literature data allows us to conclude that it is necessary to apply various technological methods for uniform distribution of nanoparticles in the volume of the material. This approach will allow to increase physical-mechanical, organoleptic and other properties of building materials.

Innovations related to nano-cements and concretes are associated with optimization of physical and mechanical properties and formation of additional qualities. This leads to savings of material and energy resources at every stage of production. The use of nanotechnologies in the production of building materials determines the originality of design of structures and new architectural vision of buildings and structures.

Given the unique characteristics of nanomaterials, the interest of researchers is to study the effect of incorporating different types of these materials to improve the properties of various building materials. However, further research is needed to evaluate the additional hybridization and synergistic effects of nanomaterials on both macro- and microstructure of materials.

References:

1. Balaguru, P.; Chong, K. Nanotechnology and Concrete: Research Opportunities; ACI Special Publication; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2008; pp. 15–28. [[Google Scholar](#)]
2. Moses Karakouzian, Visar Farhangi, Marzieh Ramezani Farani, Alireza Joshaghani, Mehdi Zadehmohamad and Mohammad Ahmadzadeh Mechanical Characteristics of Cement Paste in the Presence of Carbon Nanotubes and Silica Oxide Nanoparticles: An Experimental Study // *Materials* 2021, 14(6), 1347; <https://doi.org/10.3390/ma14061347>
3. Korolev, E.V. Nekotorye polozheniya nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii / E.V. Korolev, A.N. Grishina // *Sb. trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii «Integraciya, partnerstvo i innovacii v stroitel'noy nauke i obrazovaniiu» – M.: MGSU, 2011. – T.2. – S. 94 – 102.*
4. Rodionov R.B. Nanotekhnologii – innovacionnoe napravlenie razvitiya v stroitel'noy industrii / R.B. Rodionov // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka.* – 2006. – №9. – S. 62 – 64.
5. Falikman, V.R. Nanomaterialy i nanotekhnologii v stroitel'stve: segodnya i zavtra / V.R. Falikman // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka.* – 2009. – №1. – S. 64 – 68.
6. Gong, K.; Pan, Z.; Korayem, A.H.; Qiu, L.; Li, D.; Collins, F.; Wang, C.M.; Duan, W.H. Reinforcing effects of graphene oxide on Portland cement paste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2015, 27, 1–6. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Muzenski, S.; Flores-Vivian, I.; Farahi, B.; Sobolev, K. Towards ultrahigh performance concrete produced with aluminum oxide nanofibers and reduced quantities of silica fume. *Nanomaterials* 2020, 10, 2291. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Tahmouresi, B.; Nemati, P.; Asadi, M.A.; Saradar, A.; Mohtasham Moein, M. Mechanical strength and microstructure of engineered cementitious composites: A new configuration for direct tensile strength, experimental and numerical analysis. *Constr. Build. Mater.* 2021, 269, 121361. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Satvati, S.; Cetin, B.; Ashlock, J.C.; Ceylan, H.; Rutherford, C. Binding Capacity of Quarry Fines for Granular

- In Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2020; pp. 457–466. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Рыжонков, Д.И. Наноматериалы / Д.И. Рыжонков, В.В. Левина, Э.Л. Дзидзигури. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 365 с.
 11. Губин, С.П. Химия и технология наночастиц и материалов на их основе / С.П. Губин. – М.: изд-во МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2008. – Ч.1: Наночастицы – «сырье» для нанотехнологий. Общие сведения о наночастицах. – 41 с.
 12. Аммон, Л.Ю. Моделирование процесса роста наночастиц методом ограниченной диффузией агрегации [электронный ресурс] / Л.Ю. Аммон // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech. – М., 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
 13. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.
 14. Петрова, Л.Г. Методы получения и исследования наноструктурных материалов / Л.Г. Петрова, А.А. Брежнев // Сб. трудов «Современные методы получения и исследования наноструктурных материалов и покрытий». – МАДИ, 2009. – С. 3 – 19.
 15. Сергеев, Г.Б. Нанохимия / Г.Б. Сергеев. М.: Изд-во МГУ, 2007. – 336 с.
 16. Сергеев Г.Б. Размерные эффекты в нанохимии / Г.Б. Сергеев // Рос. хим. журнал. – 2002. - №5. - Т. XLVI. – С. 22 – 29.
 17. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 594 с.
 18. Сенатов, Ф.С. Получение нанопорошков оксидов металлов из солей методом механохимического синтеза / Ф.С. Сенатов, Д.В. Кузнецов, С.Д. Калоскин, В.В. Чердышев [электронный ресурс] // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech. - М., 2009 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
 19. Борило, Л.Н. Синтез наноструктурных тонких пленок на основе двойных оксидных систем [электронный ресурс] / Л.Н. Борило // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech. – М., 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
 20. Гаврилова, Н.Н. Синтез и коллоидно-химические свойства гидрозоль $\text{CeO}_2 - \text{ZrO}_2$: Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. кандидата хим. наук / Н.Н. Гаврилова. – М., 2009. - 17 с.
 21. Хакимова, Э.Ш. Цементные бетоны с нанодобавками синтетического цеолита / Э.Ш. Хакимова // Вестник ЮУрГУ. - 2008. - №25. - С.16-21.
 22. Шабанова, Н.А. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема / Н.А. Шабанова, П.Д. Саркисов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 208 с.
 23. Потапов, В.В. Производство нанодисперсных порошков кремнезема с применением мембран и криохимической вакуумной сублимации / В.В. Потапов, Д.С. Горев // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2012. - № 1(4). – С. 51 – 60.
 24. Лисичкин, Г.В. Химия привитых поверхностных соединений / Г.В., Лисичкин, А.А. Фадеев, А.А. Сердан и др. – М.: Физматлит, 2003. – 589 с.
 25. Старовойтова, И.А., Гибридные органо-неорганические связующие, получаемые по золь-гель технологии, и их практическое использование в композиционных материалах / И.А. Старовойтова, В.Г. Хозин, Л.А. Абдрахманова, Г.Г. Ушаква // Известия КазГАСУ. - 2010. - № 2 (14). - С.273 – 277.
 26. Комохов, П.Г. Золь-гель как концепция нанотехнологии цементного композита, структура системы и пути ее реализации [электронный ресурс] / П.Г. Комохов // Материалы научно-практической конференции студенческого клуба «Альтернатива» «Образование, наука, промышленность: взгляд в будущее» // Ре-жим доступа: www.techros.ru/text/2615.
 27. Евтушенко, Е.И. Активационные процессы в технологии строительных материалов / Е.И. Евтушенко. – Белгород, 2003. – 209 с.
 28. Соловьева, В.Я., Степанова И.В. Разработка высокопрочного бетона повышенной трещиностойкости / В.Я. Аггрегаты. In Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2020; pp. 457–466. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 10. Ryzhonkov, D.I. Nanomaterialy / D.I. Ryzhonkov, V.V. Levina, E.L. Dzidziguri. – М.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013. – 365 s.
 11. Gubin, S.P. Himiya i tehnologiya nanochastich i materialov na ih osnove / S.P. Gubin. – М.: izd-vo MITHT im. M.V. Lomono-sova, 2008. – Ch.1: Nanochasticity – «syr'e» dlya nanotehnologiy. Obschie svedeniya o nanochastichah. – 41 s.
 12. Ammon, L.Yu. Modelirovanie processa rosta nanochastich metodom ogranichennoy diffuziey agregacii [elektronnyy resurs] / L.Yu. Ammon // Mezhdunarodnyy forum po nanotehnologiyam Rusnanotech. – М., 2009. – 1 elektron. opt. disk (SD-ROM).
 13. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotehnologii / A.I. Gusev. – М.: FIZMATLIT, 2009. – 416 s.
 14. Petrova, L.G. Metody polucheniya i issledovaniya nanostrukturnykh materialov / L.G. Petrova, A.A. Brezhnev // Sb. trudov «Sovremennye metody polucheniya i issledovaniya nanostrukturnykh materialov i pokrytiy». – MADI, 2009. – S. 3 – 19.
 15. Sergeev, G.B. Nanohimiya / G.B. Sergeev. М.: Izd-vo MGU, 2007. – 336 s.
 16. Sergeev G.B. Razmernye efekty v nanohimii / G.B. Sergeev // Ros. him. zhurnal. – 2002. - №5. - T. HLVI. – S. 22 – 29.
 17. Fizicheskiy enciklopedicheskiy slovar'. – М.: Sov. enciklopediya, 1984. – 594 s.
 18. Senatov, F.S. Poluchenie nanoporoshkov oksidov me-tallov iz soley metodom mehanohimicheskogo sinteza / F.S. Senatov, D.V. Kuznecov, S.D. Kaloshkin, V.V. Cherdyshev [elek-tronnyy resurs] // Mezhdunarodnyy forum po nanotehnologiyam Rusnanotech. - М., 2009 – 1 elektron. opt. disk (SD-ROM).
 19. Borilo, L.N. Sintez nanostrukturnykh tonkih plenok na osnove dvoynykh oksidnykh sistem [elektronnyy resurs] / L.N. Borilo // Mezhdunarodnyy forum po nanotehnologiyam Rusnanotech. – М., 2009. – 1 elektron. opt. disk (SD-ROM).
 20. Gavrilova, N.N. Sintez i kolloidno-himicheskie svoystva gidrozoley $\text{SeO}_2 - \text{ZrO}_2$: Avtoreferat diss. na soisk. uch. st. kandidata him. nauk / N.N. Gavrilova. – М., 2009. - 17 s.
 21. Shabanova, N.A. Osnovy zol'-gel' tehnologii nano-dispersnogo kremnezema / N.A. Shabanova, P.D. Sarkisov. – М.: IKC «Akademkniga», 2004. – 208 s.
 22. Shabanova, N.A. Osnovy zol'-gel' tehnologii nano-dispersnogo kremnezema / N.A. Shabanova, P.D. Sarkisov. – М.: IKC «Akademkniga», 2004. – 208 s.
 23. Potapov, V.V. Proizvodstvo nanodispersnykh poroshkov kremnezema s primeneniem membran i kriohimicheskoy vaku-umnoy sblimacii / V.V. Potapov, D.S. Gorev // Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki. – 2012. - № 1(4). – S. 51 – 60.
 24. Lisichkin, G.V. Himiya privityy poverhnostnykh soedineniy / G.V., Lisichkin, A.A. Fadeev, A.A. Serdan i dr. – М.: Fizmatlit, 2003. – 589 s.
 25. Starovoytova, I.A., Gibridnye organo-neorganicheskie svyazuyuschie, poluchaemye po zol'-gel' tehnologii, i ih prakticheskoe ispol'zovanie v kompozitsionnykh materialah / I.A. Starovoytova, V.G. Hozin, L.A. Abdrahmanova, G.G. Ushakova // Izvestiya KazGASU. - 2010. - № 2 (14). - S.273 – 277.
 26. Komohov, P.G. Zol'-gel' kak koncepciya nanotehnologii cementnogo kompozita, struktura sistemy i puti ee realizacii [el-ektronnyy resurs] / P.G. Komohov // Materialy nauch-noprak-ticheskoy konferencii studencheskogo kluba «Al'-ternativa» «Obrazovanie, nauka, promyshlennost': vzglyad v buduschee» // Rezhim dostupa: www.techros.ru/text/2615
 27. Evtushenko, E.I. Aktivacionnye processy v tehnologii stroitel'nykh materialov / E.I. Evtushenko. – Belgorod, 2003. – 209 s.
 28. Solov'eva, V.Ya., Stepanova I.V. Razrabotka vysoko-prochnogo betona povyshennoy treshchinostoykosti / V.Ya.

- Соловьева, И.В. Степанова // Известия Петербургского университета путей сообщений. - Спб., 2004. - В. 1. - С. 31-34.
29. Щербина, М. Золь-гель «Заливное» для строителей [электронный ресурс] / М. Щербина // Российские нанотехнологии. - 2010. - Т.5. - №1-2. - С.21. Режим доступа: www.nanorf.ru.
30. Королев, А.С. Полимеризация нанодобавками гидратной структуры цементного камня в композитах / А.С. Королев, Э.Ш. Хакимова, Д.В. Макридин, Е.А. Волошин // Цемент и его применение. - 2007. - № 5. - С. 82 – 84.
31. Козлова, И. В. Варианты применения цеолитов в производстве строительных материалов / И. В. Козлова, М. В. Синотова // Техника и технология силикатов. - 2023. - Т. 30, № 2. - С. 116-128. - EDN ABUURF.
32. Жданов, С.П. Синтетические цеолиты / С.П. Жданов. - М.: Химия, 1981. - 264 с
33. Калашников, В.И. Нанотехнология гидрофобизации минеральных порошков стеаратами металлов / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, В.А. Худяков // Строительные материалы. - 2008. - № 7. - 45 – 47.
34. Joshaghani, A. Evaluating the effects of titanium dioxide (TiO₂) and carbon-nanofibers (CNF) as cement partial replacement on concrete properties. MOJ Civ. Eng. 2018, 4, 00094. [Google Scholar] [CrossRef]
35. Исследование физико-механических и фотокаталитических свойств цементных композитов, модифицированных промышленным диоксидом титана / С. В. Самченко, И. В. Козлова, А. В. Коршунов [и др.] // Техника и технология силикатов. - 2023. - Т. 30, № 2. - С. 152-161. - EDN LFEMUW.
36. Гребениук А.А. Состав, структура и свойства гидратированного белого портландцемента с диоксидом титана / Гребениук А.А., Ерошенко Т.С., Борисов И.Н., Вагин С.А. // Техника и технология силикатов. - 2024. - Т. 31, № 1. - С. 77-87.
37. Лысов, Д.В. Исследование нанопорошков оксидов металлов, полученных методом пиролиза ультразвуковых аэрозолей [электронный ресурс] / Д.В. Лысов, А.Г. Юдин, Д.С. Муратов // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech. - М., 2009. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
38. Анциферов, В.Н. Получение, структура и свойства нанопорошка никеля и материалов с его использованием / В.Н. Анциферов, С.А. Оглезнева, В.В. Штейникова и др. // Нанотехнологии и наноматериалы Пермского края: сборник статей / Под общ. ред. В.Н. Анциферова. - Пермь: Пермский ЦНТИ, 2009. - С 21 – 26.
39. Захаров, Ю.А. Изучение синтеза наноразмерных твердых растворов FeNi [электронный ресурс] / Ю.А. Захаров, А.Н. Попова, В.М. Пугачев // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech. - М., 2009. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
40. Варианты синтеза фотокаталитически активной добавки для цементных систем / И. В. Козлова, О. В. Земскова, С. В. Самченко, М. О. Дударева // Техника и технология силикатов. - 2023. - Т. 30, № 3. - С. 206-216. - EDN HJAAJE.
41. Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems / S. V. Samchenko, I. V. Kozlova, A. V. Korshunov [et al.] // Materials. - 2023. - Vol. 16, No. 18. - P. 6262. - DOI 10.3390/ma16186262. - EDN RU-WOWH.
42. Пустовалов, А.В. Исследование условий формирования нановолокон при взаимодействии алюминиевых порошков с водой / А.В. Пустовалов [электронный ресурс] // Международный форум по нанотехнологиям Rusnanotech - М., 2009 - 1 электрон. опт. диск. (CD-ROM)
43. Самченко С.В. Особенности повторного использования цементных суспензий при реализации технологии рециклинга бетонных смесей / Самченко С.В., Егоров Е.С., Абрамов М.А. // Вестник МГСУ. - 2021. - Т. 16, №12, С. 1573-1581
44. Samchenko, S.V., Abramov, M.A., Egorov, E.S. Properties of Concrete Modified by Ultrafine Cement Admixture // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1079, 032078 doi:10.1088/1757-899X/1079/3/032078
- Solov'eva, I.V. Stepanova // Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobscheniy. - Spb., 2004. - V. 1. - S. 31-34.
29. Scherbina, M. Zol'-gel' «Zalivnoe» dlya stroiteley [elektronnyy resurs] / M. Scherbina // Rossiyskie nanotekhnologii. - 2010. - T.5. - №1-2. - S.21. Rezhim dostupa: www.nanorf.ru.
30. Korolev, A.S. Polimerizatsiya nanodobavkami gidratnoy struktury cementnogo kamnya v kompozitah / A.S. Korolev, E.Sh. Hakimova, D.V. Makridin, E.A. Voloshin // Cement i ego primeneniye. - 2007. - № 5. - S. 82 – 84.
31. Kozlova I.V., Sinotova M.V. Options for the use of zeolites production building materials // Technique and technology of silicates. - 2023. - Vol. 30, No2. - Pp. 116 – 128 EDN ABUURF
32. Zhdanov, S.P. Sinteticheskie ceolity / S.P. Zhdanov. - M.: Himiya, 1981. - 264 s
33. Kalashnikov, V.I. Nanotekhnologiya gidrofobizatsii mineral'nykh poroshkov stearatami metallov / V.I. Kalashnikov, M.N. Moroz, V.A. Hudyakov // Stroitel'nye materialy. - 2008. - № 7. - 45 – 47.
34. Joshaghani, A. Evaluating the effects of titanium dioxide (TiO₂) and carbon-nanofibers (CNF) as cement partial replacement on concrete properties. MOJ Civ. Eng. 2018, 4, 00094. [Google Scholar] [CrossRef]
35. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O., Agafonova N.Z. Investigation of physico-mechanical and photocatalytic properties of cement composites modified with industrial titanium dioxide // Technique and technology of silicates. - 2023. Vol. - 30, No2. - Pp. 152 – 161. EDN LFEMUW
36. Grebeniuk A.A. Composition, structure and properties of hydrated white Portland cement with titanium dioxide / Grebeniuk A.A., Eroshenko T.S., Borisov I.N., Vagin S.A. // Technique and technology of silicates. - 2024. Vol. - 31, No1. - Pp. 77 – 87.
37. Lysov, D.V. Issledovanie nanoporoshkov oksidov metallov, poluchennykh metodom piroliza ul'trazvukovykh aero-zoley [elektronnyy resurs] / D.V. Lysov, A.G. Yudin, D.S. Muratov // Mezhdunarodnyy forum po nanotekhnologiyam Rusnanotech. - M., 2009. - 1 elektron. opt. disk (SD-ROM).
38. Anciferov, V.N. Poluchenie, struktura i svoystva nanoporoshka nikelya i materialov s ego ispol'zovaniem / V.N. Anciferov, S.A. Oglezneva, V.V. Shteynikova i dr. // Nanotekhnologii i nanomaterialy Permskogo kraya: sbornik statey / Pod obsch. red. V.N. Anciferova. - Perm': Permskiy CNTI, 2009. - S 21 – 26.
39. Zaharov, Yu.A. Izuchenie sinteza nanorazmernykh tverdyykh rastvorov FeNi [elektronnyy resurs] / Yu.A. Zaharov, A.N. Popova, V.M. Pugachev // Mezhdunarodnyy forum po nanotekhnologiyam Rusnanotech. - M., 2009. - 1 elektron. opt. disk (SD-ROM).
40. Kozlova I.V., Zemskova O.V., Samchenko S.V., Dudareva M.O. Methods of synthesis of a photocatalytic additive for cement systems. // Technique and technology of silicates. - 2023. Vol. - 30, No. 3 - Pp. 206-216. EDN HJAAJE.
41. Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems / S. V. Samchenko, I. V. Kozlova, A. V. Korshunov [et al.] // Materials. - 2023. - Vol. 16, No. 18. - P. 6262. - DOI 10.3390/ma16186262. - EDN RU-WOWH.
42. Pustovalov, A.V. Issledovanie usloviy formirovaniya nanovolokon pri vzaimodeystvii alyuminievykh poroshkov s vodoy / A.V. Pustovalov [elektronnyy resurs] // Mezhdunarodnyy forum po nanotekhnologiyam Rusnanotech - M., 2009 - 1 elektron. opt. disk. (SD-ROM)
43. Samchenko S.V. Osobennosti povtornogo ispol'zovaniya cementnykh suspenziy pri realizatsii tekhnologii reciklinga betonnykh smesey / Samchenko S.V., Egorov E.S., Abramov M.A. // Vestnik MGSU. - 2021. - T. 16, №12, S. 1573-1581
44. Samchenko, S.V., Abramov, M.A., Egorov, E.S. Properties of Concrete Modified by Ultrafine Cement Admixture // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1079, 032078 doi:10.1088/1757-899X/1079/3/032078

45. Increasing the Hydration Activity of Tricalcium Silicate by Adding Microdispersed Ettringite as a Nucleating Agent / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko, A. V. Korshunov [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, No. 22. – P. 7078. – DOI 10.3390/ma16227078. – EDN TQJBDC.
46. Фаликман, В.Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах / В.Р. Фаликман // *Международное аналитическое обозрение Цемент. Бетон. Сухие смеси*. – СПб.: АлитИнформ, 2011. – № 5 -6 (22). – С. 34 – 48.
47. Salimi, J.; Ramezaniapour, A.M.; Moradi, M.J. Studying the effect of low reactivity metakaolin on free and restrained shrinkage of high performance concrete. *J. Build. Eng.* 2020, 28, 101053. [Google Scholar] [CrossRef]
48. Shahmansouri, A.A.; Akbarzadeh Bengar, H.; AzariJafari, H. Life cycle assessment of eco-friendly concrete mixtures incorporating natural zeolite in sulfate-aggressive environment. *Constr. Build. Mater.* 2021, 268, 121136. [Google Scholar] [CrossRef]
49. Samchenko, S. V. Stabilization of carbon nanotubes with superplasticizers based on polycarboxylate resin ethers / S. V. Samchenko, O. V. Zemskova, I. V. Kozlova // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – Vol. 87, No. 12. – P. 1872-1876. – DOI 10.1134/S1070427214120131. – EDN UGGDLX.
50. Wang, Q.; Wang, J.; Lu, C.X.; Liu, B.W.; Zhang, K.; Li, C.Z. Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Mater.* 2015, 30, 349–356. [Google Scholar] [CrossRef]
51. Mohammadyan-Yasouj, S.E.; Ghaderi, A. Experimental investigation of waste glass powder, basalt fibre, and carbon nanotube on the mechanical properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 252, 119115. [Google Scholar] [CrossRef]
52. Danula Udumulla, Thusitha Ginigaddara, Thushara Jayasinghe, Priyan Mendis and Shanaka Baduge Effect of Graphene Oxide Nanomaterials on the Durability of Concrete: A Review on Mechanisms, Provisions, Challenges, and Future Prospects // *Materials* 2024, 17(10), 2411; <https://doi.org/10.3390/ma17102411>
53. MacLeod, A.J.N.; Fehervari, A.; Gates, W.P.; Garcez, E.O.; Aldridge, L.P.; Collins, F. Enhancing fresh properties and strength of concrete with a pre-dispersed carbon nanotube liquid admixture. *Constr. Build. Mater.* 2020, 247, 118524. [Google Scholar] [CrossRef]
54. Renata Boris, Iwona Wilińska, Barbara Pacewska and Valentin Antonovič Investigations of the Influence of Nano-Admixtures on Early Hydration and Selected Properties of Calcium Aluminate Cement Paste // *Materials* 2022, 15(14), 4958; <https://doi.org/10.3390/ma15144958>
55. Ляшенко Д. А., Перфилов В. А. Наномодифицированная цементная композиция // *Вестник МГСУ* 2024, 19, doi: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124
56. Гипсовые материалы, модифицированные комплексной добавкой на основе наносилики / М. Д. Батова, Н. С. Жукова, А. Ф. Гордина [и др.] // *Строительные материалы*. – 2022. – № 4. – С. 64-71. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-801-4-64-71. – EDN UNVXNB.
57. Влияние углеродсодержащего модификатора на структуру и свойства фторангидритового вяжущего / А. Н. Гуменюк, И. С. Полянских, А. Ф. Гордина [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2022. – № 2(758). – С. 16-30. – DOI 10.32683/0536-1052-2022-758-2-16-30. – EDN LMFMNS.
58. Кнаховский, В.В. Применение наноструктурированной воды для повышения прочности бетона / В.В. Кнаховский, В.Б. Стецьк, К.Н. Богачев и др. // *Технология бетонов*. – 2008. – № 9. – С. 72 – 75.
59. Пухаренко Ю.В. Наноструктурирование воды затвердения как способ повышения эффективности пластификаторов бетонных смесей / Ю.В. Пухаренко, В.А. Никитин, Д.Г. Летенко // *Строительные материалы*. – 2006. – №8. – С.11 – 13.
60. Taewan Kim, Jae Hong Kim and Yubin Jun Properties of Alkali-Activated Slag Paste Using New Colloidal Nano-Silica Mixing Method // *Materials* 2019, 12(9), 1571; <https://doi.org/10.3390/ma12091571>
45. Increasing the Hydration Activity of Tricalcium Silicate by Adding Microdispersed Ettringite as a Nucleating Agent / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko, A. V. Korshunov [et al.] // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, No. 22. – P. 7078. – DOI 10.3390/ma16227078. – EDN TQJBDC.
46. Falikman, V.R. Nanomaterialy i nanotehnologii v sovremennykh betonah / V.R. Falikman // *Mezhdunarodnoe analiticheskoe obozrenie Cement. Beton. Suhie smesi*. – SPb.: AlitInform, 2011. – № 5 -6 (22). – S. 34 – 48.
47. Salimi, J.; Ramezaniapour, A.M.; Moradi, M.J. Studying the effect of low reactivity metakaolin on free and restrained shrink-age of high performance concrete. *J. Build. Eng.* 2020, 28, 101053. [Google Scholar] [CrossRef]
48. Shahmansouri, A.A.; Akbarzadeh Bengar, H.; AzariJafari, H. Life cycle assessment of eco-friendly concrete mixtures incorporating natural zeolite in sulfate-aggressive environment. *Constr. Build. Mater.* 2021, 268, 121136. [Google Scholar] [CrossRef]
49. Samchenko, S. V. Stabilization of carbon nanotubes with superplasticizers based on polycarboxylate resin ethers / S. V. Samchenko, O. V. Zemskova, I. V. Kozlova // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – Vol. 87, No. 12. – P. 1872-1876. – DOI 10.1134/S1070427214120131. – EDN UGGDLX.
50. Wang, Q.; Wang, J.; Lu, C.X.; Liu, B.W.; Zhang, K.; Li, C.Z. Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. *Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Mater.* 2015, 30, 349–356. [Google Scholar] [CrossRef]
51. Mohammadyan-Yasouj, S.E.; Ghaderi, A. Experimental investigation of waste glass powder, basalt fibre, and carbon nanotube on the mechanical properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 252, 119115. [Google Scholar] [CrossRef]
52. Danula Udumulla, Thusitha Ginigaddara, Thushara Jayasinghe, Priyan Mendis and Shanaka Baduge Effect of Graphene Oxide Nanomaterials on the Durability of Concrete: A Review on Mechanisms, Provisions, Challenges, and Future Prospects // *Materials* 2024, 17(10), 2411; <https://doi.org/10.3390/ma17102411>
53. MacLeod, A.J.N.; Fehervari, A.; Gates, W.P.; Garcez, E.O.; Aldridge, L.P.; Collins, F. Enhancing fresh properties and strength of concrete with a pre-dispersed carbon nanotube liquid admixture. *Constr. Build. Mater.* 2020, 247, 118524. [Google Scholar] [CrossRef]
54. Renata Boris, Iwona Wilińska, Barbara Pacewska and Valentin Antonovič Investigations of the Influence of Nano-Admixtures on Early Hydration and Selected Properties of Calcium Aluminate Cement Paste // *Materials* 2022, 15(14), 4958; <https://doi.org/10.3390/ma15144958>
55. Lyashenko D. A., Perfilov V. A. Nanomodificirovannaya cementnaya kompoziciya // *Vestnik MGSU* 2024, 19, doi: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124
56. Gipsovye materialy, modifitsirovannye kompleksnoy dobavkoy na osnove nanosiliki / M. D. Batova, N. S. Zhukova, A. F. Gordina [i dr.] // *Stroitel'nye materialy*. – 2022. – № 4. – S. 64-71. – DOI 10.31659/0585-430X-2022-801-4-64-71. – EDN UNVXNB.
57. Vliyanie uglerodsoderzhashego modifikatora na strukturu i svoystva ftorangidritovogo vyazhushego / A. N. Gumenyuk, I. S. Polyanskiy, A. F. Gordina [i dr.] // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. – 2022. – № 2(758). – S. 16-30. – DOI 10.32683/0536-1052-2022-758-2-16-30. – EDN LMFMNS.
58. Knahovskiy, V.V. Primenenie nanostrukturirovannoy vody dlya povysheniya prochnosti betona / V.V. Knahovskiy, V.B. Stecyk, K.N. Bogachev i dr. // *Tehnologiya betonov*. – 2008. – № 9. – S. 72 – 75.
59. Puharenko Yu.V. Nanostrukturirovanie vody zatvoreniya kak sposob povysheniya effektivnosti plastifikatorov betonnykh smesey / Yu.V. Puharenko, V.A. Nikitin, D.G. Letenko // *Stroitel'nye materialy*. – 2006. – №8. – S.11 – 13.
60. Taewan Kim, Jae Hong Kim and Yubin Jun Properties of Alkali-Activated Slag Paste Using New Colloidal Nano-Silica Mixing Method // *Materials* 2019, 12(9), 1571; <https://doi.org/10.3390/ma12091571>

61. Влияние способов активации на структурно-технологические характеристики наномодифицированных цементных композиций / Н. О. Копаница, О. В. Демьяненко, А. А. Куликова [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2022. – Т. 14, № 6. – С. 481-492. – DOI 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492. – EDN PFYSQZ.
62. Nanomodification of Non-Autoclaved Foam Concrete / I. A. Prischepa, Y. S. Sarkisov, N. P. Gorlenko [et al.] // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 66, No. 2. – P. 205-212. – DOI 10.1007/s11182-023-02927-y. – EDN MJNEHG.
63. Kozlova, I. Physico-Chemical Substantiation of Obtaining an Effective Cement Composite with Ultrafine GGBS Admixture / I. Kozlova, S. Samchenko, O. Zemskova // Buildings. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – P. 925. – DOI 10.3390/buildings13040925. – EDN SAIXTM.
64. Королев, Е.В. Параметры ультразвука для гомогенизации дисперсных систем с наноразмерными модификаторами / Е.В. Королев, М.И. Кувшинова – 2010. – № 9 – С. 85 – 88.
65. Королев, Е.В. Эффективность физических воздействий для диспергирования наноразмерных модификаторов / Е.В. Королев, А.С. Иноземцев // Строительные материалы. – 2012. – № 1. – С. 1 – 4.
66. Гидродинамический способ диспергации многослойных углеродных нанотрубок при модификации минеральных вяжущих / И. А. Пудов, Г. И. Яковлев, А. А. Лушникова, О. В. Изряднова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1(17). – С. 285-293. – EDN NXVFVB.
67. Козлова, И. В. Перспективная добавка на основе системы TiO₂-Bi₂O₃ для цементных композитов / И. В. Козлова, М. О. Дударева // Строительные материалы. – 2023. – № 11. – С. 100-103. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-819-11-100-103. – EDN OPOEZB.
68. Патент № 2820534 C1 Российская Федерация, МПК C09D 5/00, C01G 29/00, C01G 23/047. Способ получения композиции с противогрибковыми свойствами: № 2023115713: заявл. 15.06.2023: опубл. 05.06.2024 / М. О. Дударева, И. В. Козлова, О. В. Земскова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет". – EDN CJNSBV.
69. Zemskova, O., Erofeev, V., Samchenko, S., Kozlova, I., Dudareva, M., & Korshunov, A. (2024). Biocidal Properties of Gypsum Stone Modified with Reynoutria sachalinensis Raw Materials. BioResources, 19(4), 8912–8919. Retrieved from <https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/23792>
70. Наноструктурирование композитов в строительном материаловедении / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первущин, И. С. Полянский [и др.]; под общей редакцией Г.И. Яковлева. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2014. – 196 с. – ISBN 978-5-7526-0681-6. – EDN TJJZRL.
71. Ларсен, О. А. Критерии оценки структурно-технологических характеристик бетона / О. А. Ларсен, В. В. Воронин, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 129-143. – EDN QXSDZK.
72. Исследование свойств тонкодисперсных материалов для получения самоуплотняющегося бетона / О. А. Ларсен, А. А. Солодов, В. В. Наруть [и др.] // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 359-368. – EDN HVMYMV.
73. Иноземцев, А. С. Высокопрочные лёгкие бетоны / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-9227-1265-1. – EDN UCJRAZ.
74. Иноземцев, А. С. Полые микросферы – эффективный заполнитель для высокопрочных легких бетонов / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 10. – С. 80-83. – EDN PPSLRX.
75. Иноземцев, А. С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов / А. С. Иноземцев // Инженерно-интернет-журнал // Materials 2019, 12(9), 1571; <https://doi.org/10.3390/ma12091571>
61. Vliyanie sposobov aktivatsii na strukturno-tehnologicheskie harakteristiki nanomodifitsirovannykh cementnykh kompozitsii / N. O. Kopanica, O. V. Dem'yanenko, A. A. Kulikova [i dr.] // Nanotehnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal. – 2022. – T. 14, № 6. – S. 481-492. – DOI 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492. – EDN PFYSQZ.
62. Nanomodification of Non-Autoclaved Foam Concrete / I. A. Prischepa, Y. S. Sarkisov, N. P. Gorlenko [et al.] // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol. 66, No. 2. – P. 205-212. – DOI 10.1007/s11182-023-02927-y. – EDN MJNEHG.
63. Kozlova, I. Physico-Chemical Substantiation of Obtaining an Effective Cement Composite with Ultrafine GGBS Admixture / I. Kozlova, S. Samchenko, O. Zemskova // Buildings. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – P. 925. – DOI 10.3390/buildings13040925. – EDN SAIXTM.
64. Korolev, E.V. Parametry ultrazvuka dlya gomogenizatsii dispersnykh sistem s nanorazmernymi modifikatorami / E.V. Korolev, M.I. Kuvshinova – 2010. – № 9 – S. 85 – 88.
65. Korolev, E.V. Effektivnost' fizicheskikh vozdeystviy dlya dispergirovaniya nanorazmernykh modifikatorov / E.V. Korolev, A.S. Inozemcev // Stroitel'nye materialy. – 2012. – № 1. – S. 1 – 4.
66. Gidrodinamicheskiy sposob dispergatsii mnogoslownykh uglerodnykh nanotrubok pri modifikatsii mineral'nykh vyazhushchih / I. A. Pudov, G. I. Yakovlev, A. A. Lushnikova, O. V. Izryadnova // Intel'ektual'nye sistemy v proizvodstve. – 2011. – № 1(17). – S. 285-293. – EDN NXVFVB.
67. Kozlova, I. V. Perspektivnaya dobavka na osnove si-stemy TiO₂-Bi₂O₃ dlya cementnykh kompozitov / I. V. Kozlova, M. O. Dudareva // Stroitel'nye materialy. – 2023. – № 11. – S. 100-103. – DOI 10.31659/0585-430X-2023-819-11-100-103. – EDN OPOEZB.
68. Patent № 2820534 C1 Rossiyskaya Federaciya, MPK C09D 5/00, C01G 29/00, C01G 23/047. Sposob polucheniya kom-pozitsii s protivogribkovymi svoystvami: № 2023115713: za-yavl. 15.06.2023: opubl. 05.06.2024 / M. O. Dudareva, I. V. Kozlova, O. V. Zemskova [i dr.]; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego ob-ra-zovaniya "Nacional'nyy issledovatel'skiy Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet". – EDN CJNSBV.
69. Zemskova, O., Erofeev, V., Samchenko, S., Kozlova, I., Dudareva, M., & Korshunov, A. (2024). Biocidal Properties of Gypsum Stone Modified with Reynoutria sachalinensis Raw Materials. BioResources, 19(4), 8912–8919. Retrieved from <https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/23792>
70. Nanostrukturirovanie kompozitov v stroitel'nom materi-alovedenii / G. I. Yakovlev, G. N. Pervushin, I. S. Polyanskiy [i dr.]; pod obshchey redaktsiey G.I. Yakovleva. – Izhevsk: Izhevskiy gosudarstvennyy tehnikeskii universitet imeni M.T. Kalashnikova, 2014. – 196 s. – ISBN 978-5-7526-0681-6. – EDN TJJZRL.
71. Larsen, O. A. Kriterii ocenki strukturno-tehnologicheskikh harakteristik betona / O. A. Larsen, V. V. Voronin, S. V. Samchenko // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2023. – T. 30, № 2. – S. 129-143. – EDN QXSDZK.
72. Larsen O.A., Solodov A.A., Narut V.V., Butenko K.A., Veselov V.K. Study of the properties of finely dispersed materials for self-compacting concrete // Technique and technology of silicates. 2022.Vol. 29. No4. Pp 359 – 368. EDN HVMYMV
73. Inozemcev, A. S. Vysokoprochnye legkie betony / A. S. Inozemcev, E. V. Korolev. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arhitekturno-stroitel'nyy universitet, 2022. – 192 s. – ISBN 978-5-9227-1265-1. – EDN UCJRAZ.
74. Inozemcev, A. S. Polye mikrosfery – effektivnyy zapolnitel' dlya vysokoprochnykh legkiy betonov / A. S. Inozemcev, E. V. Korolev // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 10. – S. 80-83. – EDN PPSLRX.

строительный журнал. – 2014. – № 7(51). – С. 31-37. – DOI 10.5862/MCE.51.4. – EDN SYSMUH.

76. Серенко, А.Ф. Оценка влияния технологических факторов на структурные параметры наноуровня и прочность цементного камня / А.Ф. Серенко, А.М. Харитонов // Изв. Вузov. Строительство. – 2008. - №6. – С. 27 – 34.

77. Баженов Ю.М. Наномодифицированные коррозионно-стойкие серные строительные материалы / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев, И.Ю. Евстифеева, О.Г. Васильева. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2008. – 167 с.

78. Шашпан, Ж.А. Применение нанотехнологий при производстве серных композиционных материалов / Ж.А. Шашпан // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2009. - № 2. – С. 60 – 61.

75. Inozemcev, A. S. Srednyaya plotnost' i poristost' vysokoprochnykh legkih betonov / A. S. Inozemcev // Inzhenernostroitel'nyy zhurnal. – 2014. – № 7(51). – С. 31-37. – DOI 10.5862/MCE.51.4. – EDN SYSMUH.

76. Serenko, A.F. Ocenka vliyaniya tehnologicheskikh faktorov na strukturnye parametry nanourovnya i prochnost' cementnogo kamnya / A.F. Serenko, A.M. Haritonov // Izv. Vuzov. Stroitel'stvo. – 2008. - №6. – С. 27 – 34.

77. Bazhenov Yu.M. Nanomodificirovannye korrozionnostoykie sernye stroitel'nye materialy / Yu.M. Bazhenov, E.V. Korolev, I.Yu. Evstifeeva, O.G. Vasil'eva. – М.: Izd-vo RGAU-MSHA im. K.A. Timiryazeva, 2008. – 167 s.

78. Shashpan, Zh.A. Primenenie nanotehnologiy pri pro-izvodstve sernykh kompozitsionnykh materialov / Zh.A. Shashpan // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. – 2009. - № 2. – С. 60 – 61.

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

Козлова Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры строительного материаловедения, заместитель директора Института промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: iv.kozlova@mail.ru (автор для связи)

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: samchenko@list.ru

Вклад авторов: *Козлова И.В.* – идея, обработка материала, написание статьи, *Самченко С.В.* – научное руководство. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Kozlova Irina Vasilievna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Associate Professor of the Department of Construction Materials Science, Deputy Director of the Institute of Industrial and Civil Engineering of the National Research Moscow State Construction University,

E-mail: iv.kozlova@mail.ru (author for contact)

Samchenko Svetlana Vasilievna - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State Construction University,
E-mail: samchenko@list.ru

Contribution of the author: *Kozlova I.V.* – idea, material processing, article writing, *Samchenko S.V.* - scientific guidance.

The authors declare that there is no conflict of interest.