

Высокопрочные ремонтные и подливочные составы на цементной основе, модифицированные нанодисперсным кремнеземом

Александра Игоревна Буковцова* , Евгений Олегович Кузьмин , Марина Вячеславовна Антоненко ,
Валерия Валерьевна Строкова 

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: bondarenko-sana@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность разработки высокопрочных ремонтных и подливочных составов на цементной основе, модифицированных нанодисперсным кремнеземом (НК), для повышения долговечности восстанавливаемых конструкций.

Методы и материалы. Использован портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н и золь-гель НК с разными сроками хранения (1 сутки – 1,5 года). Кислотно-основные свойства поверхности оценены индикаторным методом, кинетика гидратации – неизотермической калориметрией. Исследованы четыре состава: контроль, НК, НК+ПК тип S, НК + ПФМ. Прочность на сжатие определяли до 28 суток. Микроструктуру и фазовый состав изучали методами РЭМ, РФА и ДТА. **Результаты.** Установлено, что поверхность золь-гель синтезированного НК характеризуется полифункциональным кислотно-основным спектром. Длительное хранение не приводит к деградации активности: концентрация сильных кислотных центров ($pK_a = -4,4$) возрастает от 7,42 до 260–265 мг-экв/г, а сильных основных центров ($pK_a = 8,8$) сохраняется на уровне 515–628 мг-экв/г. Методом неизотермической калориметрии подтверждено, что образец НК, хранившийся 1,5 года, не только сохраняет, но и интенсифицирует тепловыделение при гидратации цемента. Физико-механические испытания показали, что к 28 суткам твердения прирост прочности на сжатие составил 14,5% для состава с индивидуальным НК, 16% – для НК + ПФМ и 18% – для НК + ПК тип S по сравнению с контролем. Данные РЭМ, РФА и ДТА подтвердили, что комплексное введение НК с ПАВ способствует связыванию портландита, формированию плотной низкоосновной гидросиликатной матрицы и повышению термической стабильности материала (минимальная потеря массы при нагреве – 9% для состава с ПФМ). **Обсуждение.** Бифункциональная поверхность НК обеспечивает синергетический эффект: основные центры сорбируют ионы Ca^{2+} , иницируя нуклеацию, а кислотные центры Льюиса участвуют в координации гидроксильных групп и молекул воды, активируя их. Комплексные составы НК с ПАВ улучшают распределение наночастиц и интенсифицируют пуццолановую реакцию. **Заключение.** Впервые доказано сохранение активности НК после 1,5 лет хранения за счет формирования бифункциональных центров. Комплексные составы НК с пластификаторами обеспечивают синергетический эффект. Разработаны ремонтные составы класса R3 (B35) и подливочные смеси для ответственных конструкций, включая ремонт коллекторов, подливку оборудования и установку анкерных болтов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанодисперсный кремнезем, цементный камень, ремонтные составы, подливочные смеси, структурообразование, гидратация цемента, пуццолановая активность, прочность на сжатие, кислотно-основные центры, поверхностно-активные вещества, растровая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2026-0005 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Буковцова А.И., Кузьмин Е.О., Антоненко М.В., Строкова В.В. Высокопрочные ремонтные и подливочные составы на цементной основе, модифицированные нанодисперсным кремнеземом. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026;18(3):307–316. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-307-316>. – EDN: NTYCYM.

High-strength cement-based repair and grouting compositions modified with nanodispersed silica

Alexandra I. Bukovtsova* , Evgeny O. Kuzmin , Marina V. Antonenko , Valeria V. Strokovva 

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, 46 Kostyukova Street, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: bondarenko-sana@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. The development of high-strength repair and grouting compositions for restoring concrete structures is a relevant task. The aim of the research is to study the effect of long-term stored nanodispersed silica (NS) on cement stone properties. **Methods and Materials.** Portland cement CEM I 42.5 N and sol-gel NS (storage: 1 day – 1.5 years) were used. Surface acid-base properties – indicator method; hydration kinetics – non-isothermal calorimetry. Four compositions: control, NS, NS + PC type S, NS + PFM. Compressive strength – up to 28 days; SEM, XRD, DTA. **Results.** NS surface has a polyfunctional acid-base spectrum. Long-term storage does not degrade activity: strong acid centers ($pK_a = -4.4$) increase from 7.42 to 260–265 mg eq/g; strong basic centers ($pK_a = 8.8$) remain at 515–628 mg eq/g. NS stored for 1.5 years intensifies heat release (max ~ 25.5 °C). Compressive strength increase by day 28: NS – 14.5%; NS + PFM – 16.7%; NS + PC type S – 18% vs control. SEM, XRD, DTA confirm portlandite binding and dense low-basic C–S–H matrix formation (min. weight loss on heating – 9.1% for NS+PFM). Discussion. Bifunctional NS surface provides a synergistic effect: basic centers adsorb Ca^{2+} ions, initiating nucleation; Lewis acid centers coordinate OH^- and H_2O , activating them. Complex NS + surfactants improve nanoparticle distribution and intensifying pozzolanic reaction. **Conclusion.** NS activity remains after 1.5 years of storage. Complex NS+plasticizers provide a synergistic effect. Developed compositions are recommended as class R3 (B35) repair compounds and grouting mixtures for critical structures, including collector repair, equipment grouting and anchor bolt installation.

KEYWORDS: nanodispersed silica, cement stone, repair compound, grouting mixture, structure formation, cement hydration, pozzolanic activity, compressive strength, acid-base sites, surfactants, scanning electron microscopy, X-ray phase analysis, differential thermal analysis

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: The work was realized within the framework of the implementation of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. FZWN-2026-0005 using equipment of High Technology Center at BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION:

Bukovtsova A.I., Kuzmin E.O., Antonenko M.V., Strokovva V.V. High-strength cement-based repair and grouting compositions modified with nanodispersed silica. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(3):307–316. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-3-307-316>. – EDN: NTYCYM.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современном строительном материаловедении одним из наиболее перспективных направлений является разработка высокоэффективных ремонтных и подливочных составов, способных обеспечить долговечность и надежность восстанавливаемых бетонных и железобетонных конструкций [1–3]. К таким материалам предъявляются повышенные требования: высокая прочность на сжатие (не менее 25 МПа для класса R3 по EN 1504-3), адгезия к бетону $\geq 1,5$ МПа, безусадочность и способность к раннему набору прочности [4, 5]. Ключевым фактором, определяющим комплекс свойств этих систем, является плотная и однородная микроструктура цементной матрицы [6, 7].

Традиционные методы модификации цементных композитов не всегда позволяют достичь требуемо-

го уровня оптимизации структуры на наноуровне. В связи с этим все большее внимание исследователей привлекают наноразмерные добавки, способные направленно влиять на процессы гидратации и структурообразования цементного камня. Среди них особое место занимает нанодисперсный кремнезем (НК), который выступает не только как эффективный пуццолановый компонент, связывающий портландит с образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция (C–S–H), но и как центр нуклеации, ускоряющий кристаллизацию новообразований [8, 9].

Важно отметить, что не только концентрация, но и морфология наночастиц кремнезема (сферическая, агрегированная, гелеобразная) существенно влияет на кинетику гидратации и конечные свойства цементных композитов [21].

Известно, что использование НК в композиции с поверхностно-активными веществами (ПАВ) позволяет достичь синергетического эффекта за счет улучшения диспергации наночастиц и дополнительной пластификации смеси [10-12]. Аналогичные подходы с применением комплексных нанодисперсных систем, включающих углеродные нанотрубки и микрокремнезем, также демонстрируют значительное упрочнение цементной матрицы [13, 14]. Однако большинство существующих работ посвящены применению свеже синтезированного или коммерческого НК. Вопрос об эволюции химической активности нанодисперсного кремнезема в процессе его длительного хранения (более 1 года) остается недостаточно изученным, что имеет важное практическое значение для промышленного производства и логистики ремонтных материалов. Как показано в работах [15, 16], поверхностные свойства наночастиц могут существенно трансформироваться со временем, однако систематических исследований влияния сроков хранения золь-гель НК на его активность в цементных системах не проводилось.

Кроме того, в литературе широко представлены работы по модификации цементных композитов гидротермальным нанокремнеземом [17], минеральными волокнами [18], высокопрочными фибробетонами [20] и их композициями [19], однако комплексное влияние длительно хранившегося НК в сочетании с различными типами ПАВ на процессы структурообразования цементного камня изучено недостаточно. Отсутствуют данные о кинетике гидратации цемента при введении НК с разными сроками хранения, а также о характере трансформации микроструктуры и фазового состава под действием таких добавок.

Целью настоящей работы является исследование эволюции поверхностной активности нанодисперсного кремнезема в процессе длительного хранения (до 1,5 лет) и оценка его влияния на свойства цементного камня при индивидуальном и комплексном введении с пластифицирующими добавками. На основе полученных результатов предполагается разработать рецептуры высокопрочных ремонтных составов класса R3 (B35) и подливочных смесей для ответственных конструкций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

Изучить изменение кислотно-основного спектра поверхности НК в зависимости от срока хранения (от 1 суток до 1,5 лет) индикаторным методом.

Оценить влияние НК с различными сроками хранения на кинетику гидратации цементного теста методом неизотермической калориметрии.

Исследовать физико-механические характеристики (прочность на сжатие) цементного камня, мо-

дифицированного индивидуальным НК и его композициями с ПАВ (ПК тип S, ПФМ), в различные сроки твердения.

Проанализировать микроструктуру, фазовый состав и термическое поведение модифицированного цементного камня методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгенофазового анализа (РФА) и дифференциально-термического анализа (ДТА).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов для исследования выступали:

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (АО «Себряковцемент»), соответствующий ГОСТ 31108-2020, с нормальной плотностью цементного теста 26,2%, сроками схватывания: начало – 145 мин, конец – 215 мин.

Нанодисперсный кремнезем (НК), синтезированный золь-гель методом из тетраэтоксисилана (ТЭОС) с использованием поверхностно-активного вещества-стабилизатора Span 83 [11]. Исследовались образцы с различными сроками хранения: 1 сутки, 1 неделя, 1 месяц и 1,5 года.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ): суперпластификатор поликарбоксилатный тип S (ПК тип S) и пластификатор ПФМ-НЛК (ПФМ).

Характеристику поверхностных свойств нанодисперсного кремнезема проводили индикаторным методом, позволяющим идентифицировать и количественно определять кислотно-основные центры Бренстеда и Льюиса по адсорбции индикаторов с заданными значениями рКа. Влияние модификатора на кинетику структурообразования цементного камня оценивали методом неизотермической калориметрии путем непрерывного мониторинга температуры цементного теста в адиабатических условиях. Для изучения физико-механических характеристик были изготовлены четыре серии образцов: контрольная (без добавок), с введением 1,5% нанодисперсного кремнезема (НК), с комплексной добавкой НК + ПФМ, а также с добавкой НК + ПК тип S. Из каждой серии формовали по три образца для испытаний в возрасте 1, 3, 7, 14 и 28 суток твердения. Прочность на сжатие определяли по ГОСТ 5802-86, после чего фрагменты разрушенных образцов помещали в изопропиловый спирт для немедленной остановки гидратации. Структуру и фазовый состав цементного камня исследовали комплексом методов: растровая электронная микроскопия (РЭМ) на приборе TESCAN MIRA 3 LMU, рентгенофазовый анализ (РФА) на спектрометре ARL 9900, а также дифференциальный термический анализ (ДТА).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Эволюция активности нанодисперсного кремнезема при хранении

Для исследования изменения кислотно-основных свойств поверхности синтезированного нанодисперсного кремнезема в зависимости от длительности его хранения был применен индикаторный метод. В исследовании были изучены четыре образца, отличающиеся сроком хранения после синтеза: образец 1 (1 сутки), образец 2 (1 неделя), образец 3 (1 месяц) и образец 4 (1,5 года). Полученные кислотно-основные спектры распределения поверхностных центров представлены на рисунке 1.

Примечание к рисунку: по оси абсцисс – значения рКа индикаторов, характеризующие силу центров; по оси ординат – q рКа (мг-экв/г), концентрация адсорбированного индикатора, пропорциональная количеству центров соответствующей силы.

Полученные данные демонстрируют сложную нелинейную динамику изменения состояния поверхности. Ключевым выводом является отсутствие монотонного снижения общей химической активности. Наблюдается выраженная перестройка кислотно-основного спектра, свидетельствующая о процессах релаксации и трансформации поверхностных

силанольных групп (Si–OH) и активных центров Льюиса. Концентрация сильных кислотных центров ($pK_a = -4,4$) возрастает от 7,42 мг-экв/г у образца 1 до 260–265 мг-экв/г у образцов 2 и 3, а к полутора годам снижается до 185 мг-экв/г, оставаясь на порядок выше исходной. Концентрация сильных основных центров ($pK_a = 8,8$) сохраняется на высоком уровне во всех образцах (515–628 мг-экв/г). Таким образом, процесс естественного старения не приводит к необратимой потере реакционной способности материала.

Для подтверждения этих выводов проведено исследование влияния НК на кинетику гидратации цементного теста методом неизотермической калориметрии (рис. 2, 3). Во все изучаемые составы вводилось 1,5% НК от массы цемента.

Образец 4, хранившийся 1,5 года, демонстрирует не только сохранение, но и интенсификацию тепловыделения: достигается наибольшая абсолютная температура (около 25,5 °С), а зона основного экзотермического пика является наиболее выраженной и продолжительной. Это находится в соответствии с результатами индикаторного метода, выявившего у образца 4 высокую концентрацию как сильных основных, так и сильных кислотных центров. Бифункциональный характер поверхности обеспечивает синергетический эффект: основные

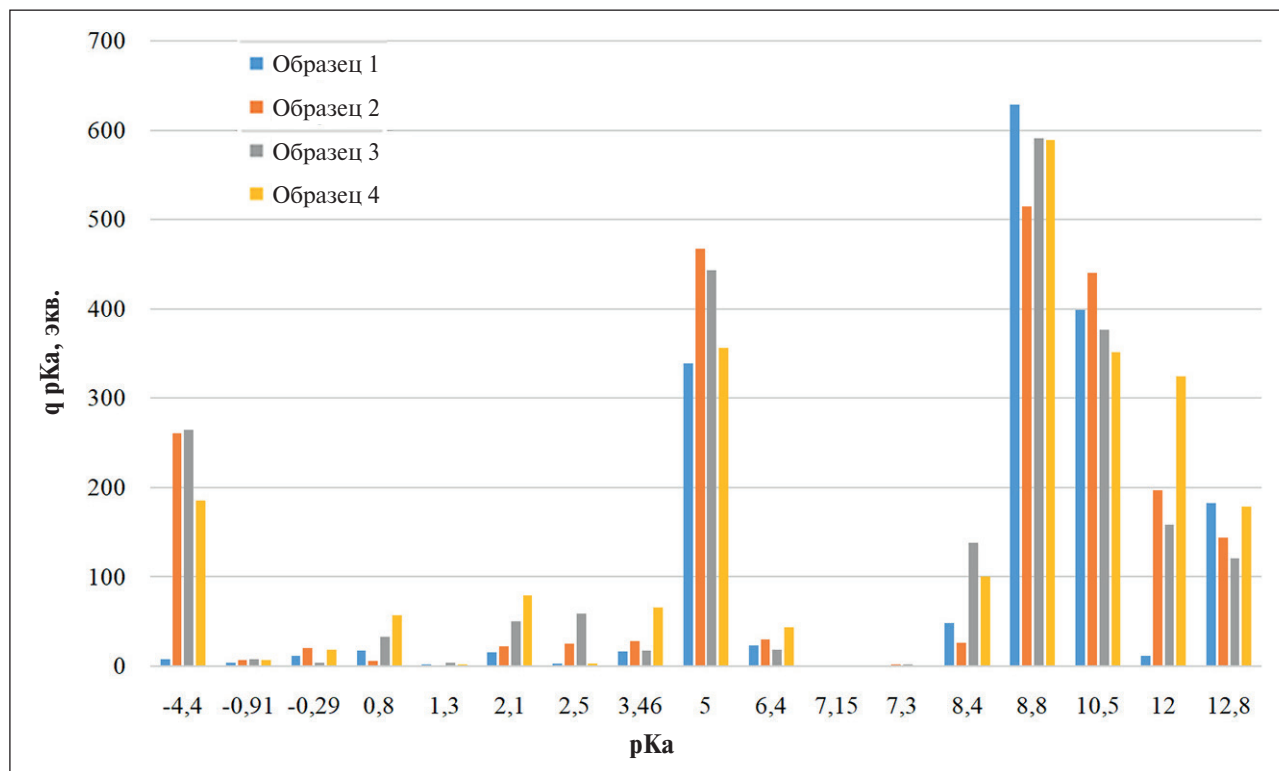


Рис. 1. Распределение кислотно-основных центров на поверхности нанодисперсного кремнезема в зависимости от продолжительности хранения

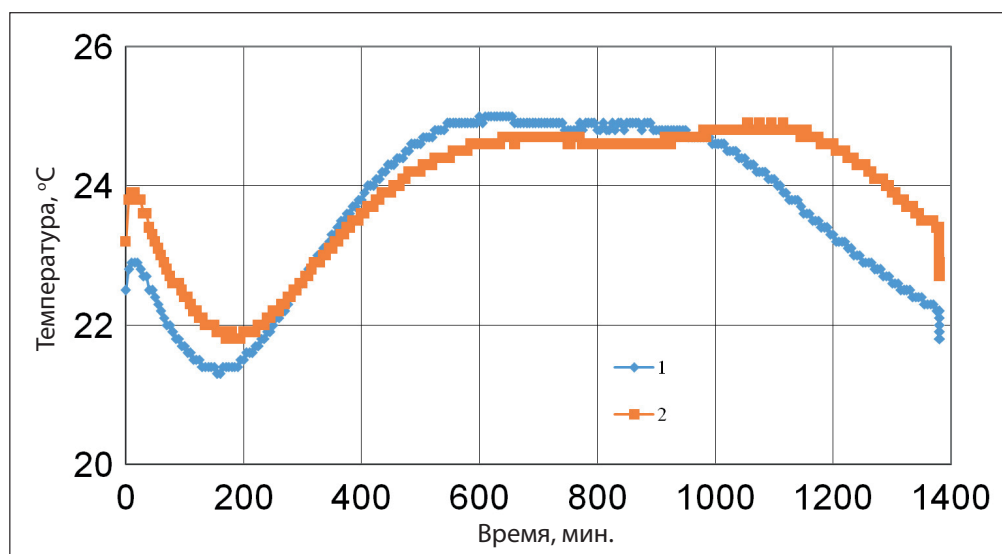


Рис. 2. Термокинетические кривые тепловыделения цементного теста с добавлением нанодисперсного кремнезема (образцы 1 и 2)

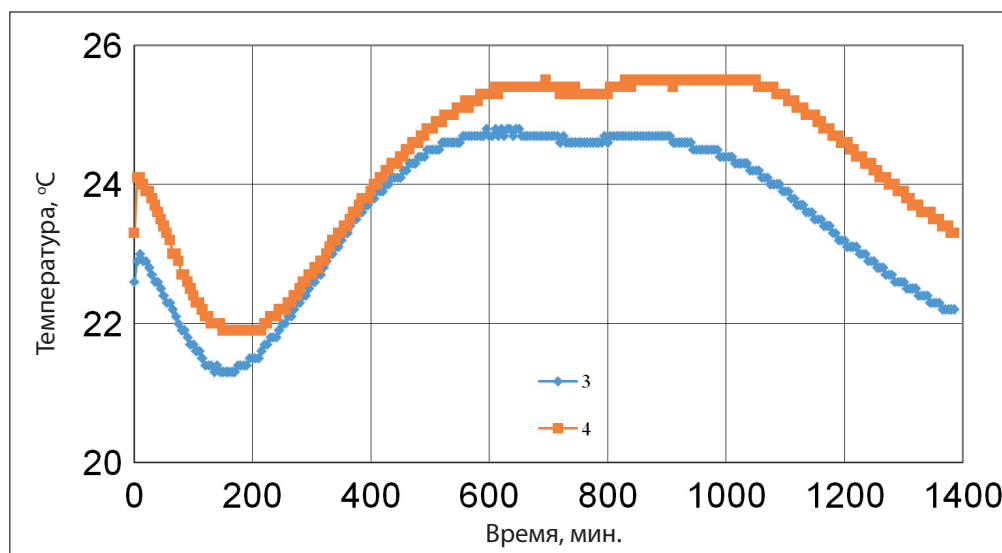


Рис. 3. Термокинетические кривые тепловыделения цементного теста с добавлением нанодисперсного кремнезема (образцы 3 и 4)

центры сорбируют ионы кальция, инициируя нуклеацию, а кислотные центры Льюиса участвуют в координации гидроксильных групп и молекул воды, активируя их.

2. Влияние модификаторов на физико-механические свойства

После подтверждения гипотезы о том, что с течением времени не происходит падения активности нанодисперсного кремнезема, были изготовлены образцы цементного камня с различными добавками. Показатели прочности на сжатие приведены в таблице 1.

Анализ результатов показывает, что в ранние сроки (1 сутки) наблюдается незначительное снижение прочности для образца с добавкой чистого

нанокремнезема относительно контроля, что может быть связано с замедлением начальных стадий гидратации вследствие адсорбции молекул воды на высокоразвитой поверхности наночастиц. Однако уже к 7 суткам образцы с нанокремнеземом превосходят контрольный состав. К 28 суткам все модифицированные составы показывают прирост прочности: для состава с индивидуальным НК – 14,5%, для НК + ПФМ – 16,7%, для НК + ПК тип S – 18% по сравнению с контролем.

3. Микроструктура и фазовый состав

Для верификации выводов о характере структурообразования проведен анализ микроструктуры цементного камня методом растровой электронной микроскопии (рис. 4).

Таблица 1. Результаты прочности на сжатие образцов, МПа

Сутки	Контроль	НК	НК + ПФМ	НК + ПК тип S
1	9,56	9,39	10,06	11,85
3	37,69	33,92	27,12	34,37
7	41,72	45,24	40,87	42,59
14	40,38	49,77	51,15	51,64
28	53,52	61,28	62,45	63,24

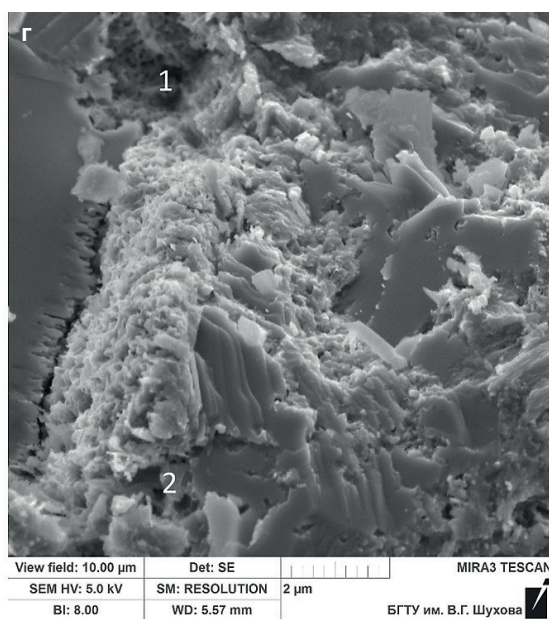
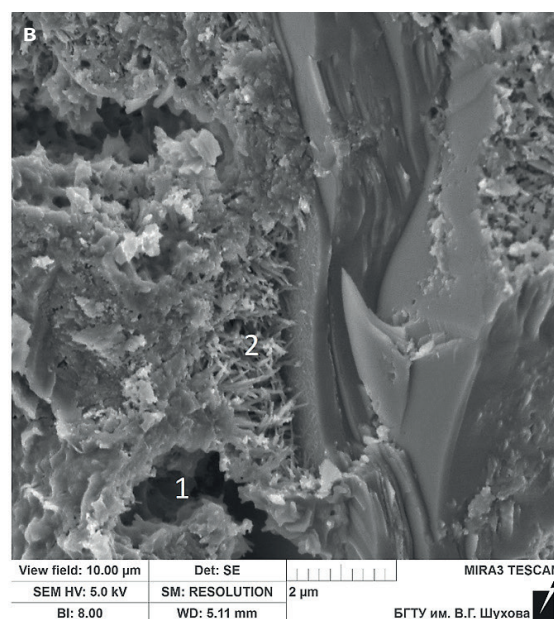
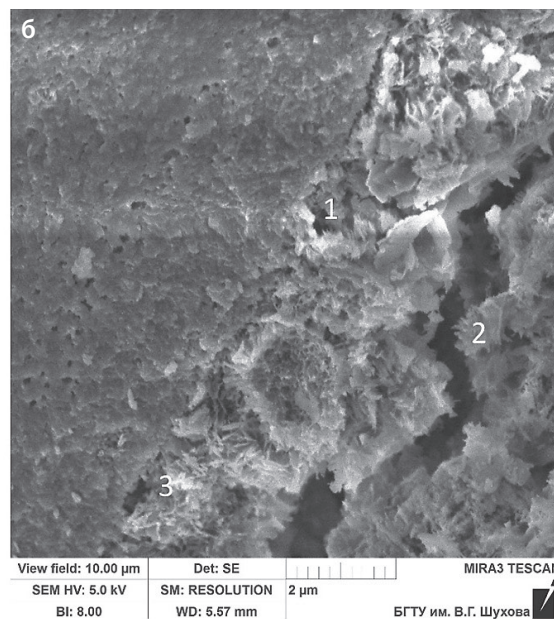
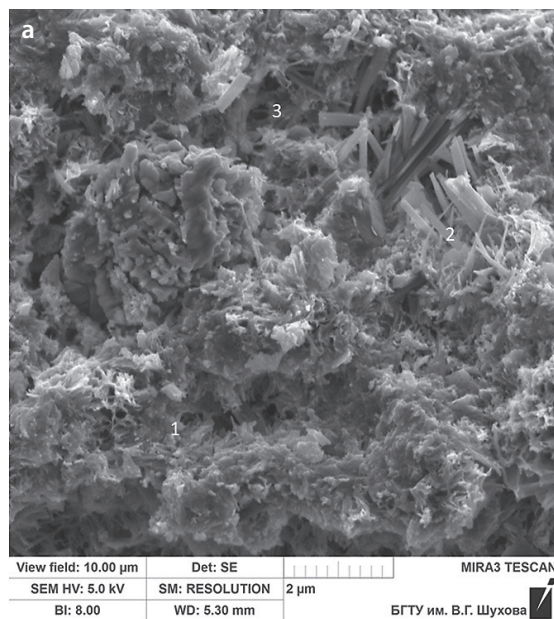


Рис. 4. Микроструктура цементного камня, модифицированного нанодисперсным кремнеземом и его композициями с ПАВ: а – контрольный образец; б – образец с НК; в – образец с НК + ПК тип S; г – образец с НК + ПФМ

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Контрольный образец характеризуется формированием развитого пространственного каркаса из игловидных кристаллов этtringита и крупных пластинчатых образований портландита. Введение НК приводит к трансформации морфологии: кристаллические продукты представлены более мелкими смешанными фазами, наблюдается интенсивное заполнение пор и формирование более плотной гелеобразной матрицы. Применение комплексных добавок с ПАВ усиливает положительный эффект. В системе с НК + ПК тип S гелевая фаза отличается повышенной дисперсностью, а добавка ПФМ способствует активному зарастанию пористых зон.

Для подтверждения фазового состава проведен комплексный анализ методами РФА (рис. 5) и ДТА (рис. 6).

Образец с НК демонстрирует увеличение доли аморфной составляющей (диффузное гало) по сравнению с контролем, что обусловлено протеканием пуццолановой реакции и дополнительным образованием низкоосновных С–S–Н фаз. Наблюдается тенденция к снижению интенсивности рефлексов портландита в модифицированных образцах, что свидетельствует о его связывании в результате взаимодействия с активным кремнеземом.

Образец с НК демонстрирует наибольшую потерю массы (17%) в интервале температур 445–454 °С, соответствующем разложению портландита, что свидетельствует о повышенном содержании гидратных фаз. Введение ПАВ приводит к снижению потерь массы до 10% (ПК тип S) и 9,1% (ПФМ), что указывает на формирование более плотной и термически стабильной матрицы. Аналогичные результаты получены в исследовании [22], где показано, что коллоидный нанокремнезем способствует формированию высокоплотных С–S–Н фаз даже в системах с вторичным наполнителем. Наименьшая потеря массы у образца с ПАВ ПФМ свидетельствует о наиболее эффективной модификации структуры цементного камня.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные показывают, что поверхность золь-гель синтезированного нанодисперсного кремнезема (НК) характеризуется полифункциональным кислотно-основным спектром. Длительное хранение не приводит к монотонной деградации активности. Напротив, происходит перестройка кислотно-основного спектра с формированием бифункциональных центров. Это подтверждается данными

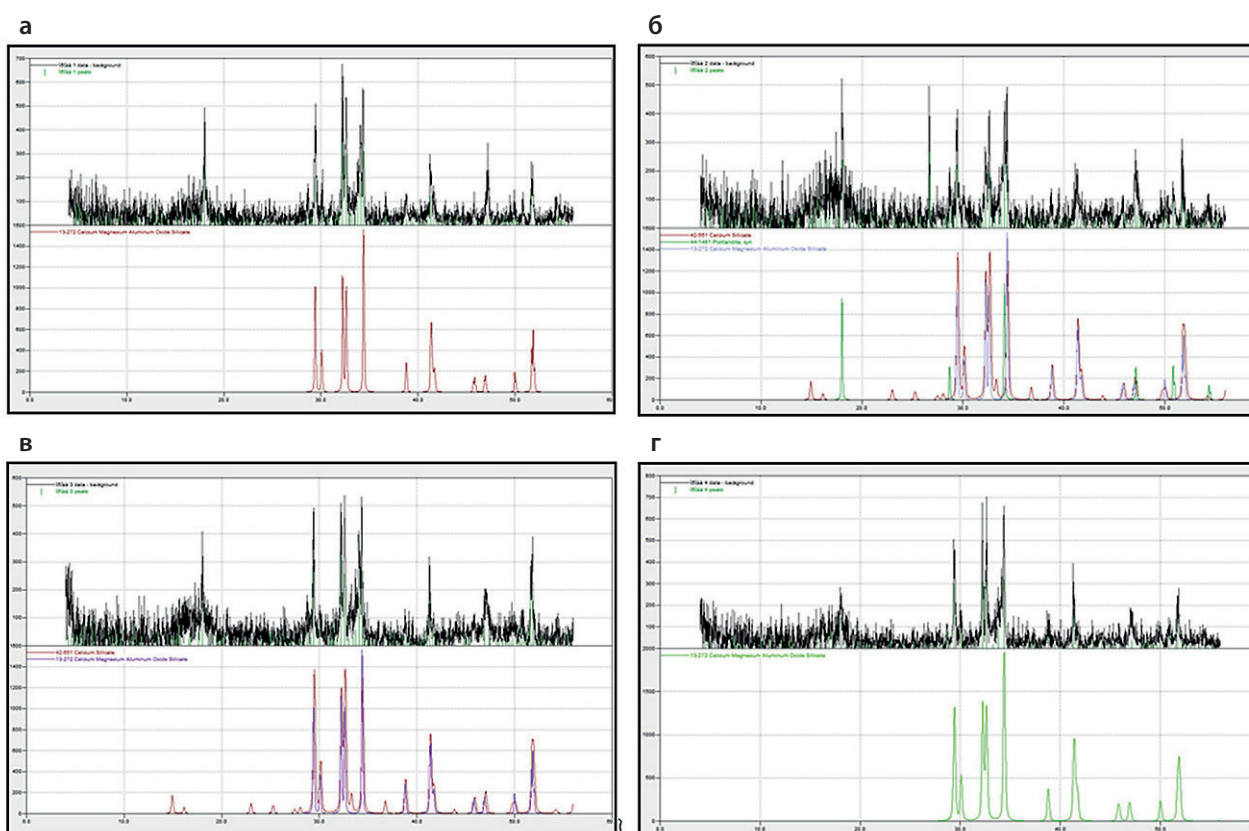


Рис. 5. Дифрактограммы цементного камня контрольного и модифицированных составов: а – контроль; б – НК; в – НК + ПК тип S; г – НК + ПФМ

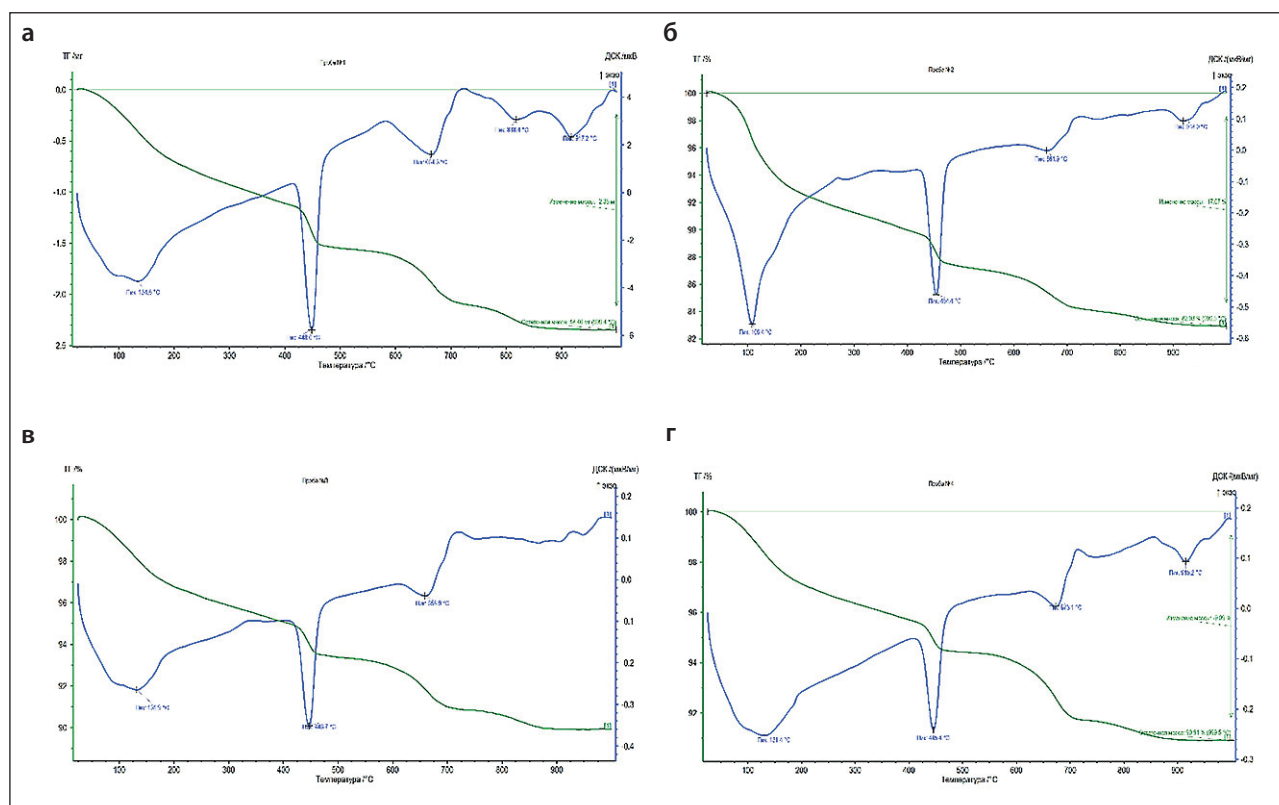


Рис. 6. Термограммы цементного камня контрольного и модифицированных составов: а – контроль; б – НК; в – НК + ПК тип S; г – НК + ПФМ

калориметрии: НК, хранившийся 1,5 года, не только сохраняет, но и интенсифицирует тепловыделение.

Бифункциональная поверхность обеспечивает синергетический эффект: основные центры адсорбируют ионы кальция, инициируя нуклеацию; кислотные центры Льюиса участвуют в координации гидроксильных групп и молекул воды, активируя их.

Физико-механические испытания показали, что к 28 суткам все модифицированные составы превосходят контрольный. Наивысший результат (прирост 18%) получен для состава НК + ПК тип S. Незначительное снижение прочности в ранние сроки (1 сутки) для состава с индивидуальным НК объясняется адсорбцией воды на высокоразвитой поверхности наночастиц.

Методы РЭМ, РФА и ДТА подтвердили связывание портландита за счет пуццолановой реакции, увеличение доли низкоосновных C–S–H и формирование более плотной и однородной микроструктуры. Наименьшая потеря массы при нагреве (9,1% для состава НК + ПФМ) свидетельствует о наивысшей термической стабильности данного состава.

Таким образом, разработанные комплексные составы НК + ПАВ рекомендованы в качестве ремонтных составов класса R3 (B35) и подливочных смесей для ответственных конструкций.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

1. Индикаторным методом установлено, что поверхность синтезированного нанокремнезема характеризуется полифункциональным кислотно-основным спектром. Ключевым результатом является доказательство отсутствия деградации его химической активности в процессе длительного (до 1,5 лет) хранения. Наблюдаемая перестройка поверхностных центров носит характер релаксационной трансформации, приводящей к формированию бифункциональной поверхности, сохраняющей высокую реакционную способность, что подтверждено данными неизотермической калориметрии, демонстрирующими интенсификацию тепловыделения для образцов с длительным сроком хранения.

2. Экспериментально доказано, что введение нанодисперсного кремнезема в цементную систему обеспечивает существенное повышение прочностных характеристик: к 28 суткам твердения прирост прочности на сжатие для состава с индивидуальным НК составил 14,5%, а для комплексных добавок с ПАВ ПК тип S и ПФМ – 18% и 16,7% соответственно. Механизм упрочнения обусловлен пуццолановым связыванием портландита активными центрами наночастиц.

3. Методами РЭМ, РФА и ДТА подтверждено, что наночастицы НК способствуют формированию более дисперсных и плотных низкоосновных гидросиликатов кальция, что приводит к уплотнению микроструктуры и повышению ее гомогенности. Комплексное введение нанокремнезема с поверхностно-активными веществами обеспечивает синергетический эффект: ПАВ способствуют равномерному распределению наночастиц и дополнительной пластификации смеси, что интенсифицирует пуццолановую реакцию и формирование термически стабильной, гомогенной микроструктуры (минимальная

потеря массы при нагреве – 9,09% для состава с ПАВ ПФМ).

4. Разработанные составы рекомендованы для создания высокоэффективных ремонтных составов класса R3 (B35) и подливочных смесей для ответственных конструкций, включая ремонт коллекторов, подливку оборудования и установку анкерных болтов. Практическая значимость работы подтверждается также доказанной стабильностью свойств нанодисперсного кремнезема при длительном хранении, что критически важно для промышленного производства и логистики ремонтных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ganesh P., Murthy A.R., Kumar S.S., Rehman M.M.S., Iyer N.R. Influence of nanosilica on durability and mechanical properties of high-strength concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2015;68(5):229–236. <https://doi.org/10.1680/jmacr.14.00338>
2. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций. *Строительные науки*. 2015;1:93–102. EDN: TLLYWH
3. Абдуллаев М.А.В., Абдуллаев А.М., Абдуллаев Р.М. Сульфатостойкий высокопрочный нанобетон на основе комплексной добавки. *Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки*. 2025;1(20):16–24. <https://doi.org/10.69537/VKNIIRAN.2025.20.1.002> EDN: HSHWRW
4. Vignesh J., Ramesh B., Xavier J.R. Recent advances in multifunctional nanocomposites for high-performance and durable concrete resistant to aggressive environments. *Results in Engineering*. 2026;29:108840. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108840>
5. Беломесова К.Ю., Павлова И.П. Собственные деформации и жесткостные характеристики напрягающих бетонов с базальтовой фиброй. Параметрические исследования. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2025;1(136):3–7. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2025-136-1-3-7> EDN: JZAUHR
6. Балицкий Д.А., Духанина У.Н., Строкова В.В., Сивальнева М.Н. Влияние микробной карбонатной биоминерализации на прочность цементного камня. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024;29(5):24–33. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33> EDN: YAAMWI
7. Леденев А. А., Перцев В. Т., Рудаков О. Б., Усачев С. М. Структурно-феноменологический анализ взаимосвязи показателей микроструктуры и свойств затвердевших цементных систем. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3):326–334. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9855>. EDN: QZARKR
8. Логанина В.И. Надежность контроля качества строительных материалов и изделий. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020;25(12):17–21. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-17-21>. EDN: CYCXPP
9. Потапов В.В., Ефименко Ю.В., Карабцов А.А., Горев Д.С. Механизм повышения прочности бетона вводом гидротермального нанокремнезема. *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2017;3(32). <https://doi.org/10.5281/zenodo.896996>. EDN: ZHGKLZ
10. Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н. Прогнозируемая прочность цементного камня с добавкой нанодисперсного кремнезема. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2024;29(10):17–24. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24>. EDN: KQCMKR
11. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Кузьмин Е.О. и др. Технологии золь-гель синтеза нанокремнезема как модификатора материалов на основе цемента. Форсайт-анализ. *Строительные материалы*. 2023;3:43–72. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-811-3-43-72>. EDN: RKEAGJ
12. Sargam Y., Wang K. Influence of dispersants and dispersion on properties of nanosilica modified cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*. 2021;118:103969. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103969>
13. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Кузьмин Е.О. Влияние состава добавок на прочность модифицированного цементного камня. *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. Могилев, 2020*. 139. – EDN: BQQETP
14. Urkhanova L., Lkhasaranov S., Buiantuev S. Fiber-reinforced concrete with mineral fibers and nanosilica. *Procedia Engineering*. 2017;195:147–154. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.535>

15. Лесовик В.С., Потапов В.В., Алфимова Н.И. Повышение эффективности вяжущих за счет использования наномодификаторов. *Строительные материалы*. 2011;6:12–18.
16. Alhawat M, Ashour A, El-Khoja A. Effect of using nanosilica with different surface area on concrete properties. *AIP Conference Proceedings*. 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5123694>
17. Potapov V., Efimenko Y., Fediuk R., Gorev D. Effect of hydrothermal nanosilica on the performances of cement concrete. *Construction and Building Materials*. 2021;269:121307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121307>
18. Raabe J., Silva D.W., Menezzi C.H.S.D., Tonoli G.H.D. Impact of nanosilica deposited on cellulose pulp fibers surface on hydration and fiber-cement compressive strength. *Construction and Building Materials*. 2022;326:126847. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126847>
19. Yakovlev GI, Skripkiunas G, Polianskich IS, Lahayne O, Eberhardsteiner J, Urkhanova LA, et al. Modification of cement matrix using carbon nanotube dispersions and nanosilica. *Procedia Engineering*. 2017;172:1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.124>
20. Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Пачин А.Р. Высокопрочные фибробетоны в конструкциях общестроительного и специального назначения. *Строительные материалы*. 2023;1–2:39–43. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-39-43>. EDN: IUZADF
21. Kooshafar M., Madani H. An investigation on the influence of nano silica morphology on the characteristics of cement composites. *Journal of Building Engineering*. 2020;30:101293. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101293>
22. Buettner N., Iyacu G., Akono A.T. Colloidal nanosilica promotes high-density calcium-silicate-hydrates in fine recycled concrete aggregate mortar. *Cement and Concrete Research*. 2024;180:107498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107498>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии на основе искусственного интеллекта.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буковцова Александра Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, bondarenko-sana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6419-6223>

Кузьмин Евгений Олегович – ассистент кафедры промышленной экологии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, kuzmin9731@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2709-3286>

Антоненко Марина Вячеславовна – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, labuzova326@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1689-4745>

Строкова Валерия Валерьевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46, Российская Федерация, vvstrokova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6895-4511>

ВКЛАД АВТОРОВ

Буковцова А.И. – разработка концепции исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Кузьмин Е.О. – синтез нанодисперсного кремнезема, проведение экспериментов, сбор и обработка данных.

Антоненко М.В. – участие в анализе данных, интерпретация результатов РЭМ и РФА, доработка текста.

Строкова В.В. – научное руководство, общее управление проектом, итоговое редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; принята к публикации 12.06.2026.