



УДК: 691.54

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.5

EDN: EKANHZ

Наномодификация высокопрочных цементов низкой водопотребности добавками кремнезоля и нанопластинами графена

Е.Г. Гуляков¹, В.Г. Хозин¹, И.В. Боровских¹, Р.В. Кропачев²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²ООО "PrintPro Homes", Флорида, Соединенные Штаты Америки

Аннотация: *Постановка задачи.* Перспективным направлением улучшения свойств цементных материалов является их наномодификация, которая зачастую усложняется достижением максимальной гомогенизации наноразмерных частиц в объеме основного материала. Традиционные способы смешения компонентов не всегда позволяют достичь равномерного распределения наномодификаторов в смеси. Гораздо эффективней является технология совместного помола, которая лежит в основе получения цементов низкой водопотребности. Известный эффект дезагрегации частиц при механическом, «принудительном» нанесении пластификатора на поверхность зерен цемента способствует равномерному распределению наноразмерных модификаторов. Кремнезоль (гидрозоль диоксида кремния) и графеновый порошок, состоящий из нанопластин графена, известны своими положительными эффектами в цементных материалах, что предопределяет актуальность наномодификации высокодисперсных цементов низкой водопотребности для создания высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов. Целью работы является исследование модификации цементов низкой водопотребности добавками кремнезоля и нанопластинами графена и определение их влияния на свойства цементного теста и камня. Для этого решаются следующие задачи: анализ дисперсного состава исходных компонентов, получение высокодисперсных цементов низкой водопотребности с наноразмерными добавками, оценка размолоспособности исходного портландцемента, нормальной густоты цементного теста и прочности цементного камня. *Результаты.* Анализ распределения частиц по размерам исходных компонентов позволил установить его влияние на размолоспособность портландцемента и нормальную густоту получаемых цементов низкой водопотребности. Определены концентрационные зависимости прочности цементного камня от содержания наномодификаторов. *Выводы.* Применение кремнезоля практически не влияет на удельную поверхность и нормальную густоту получаемых цементов низкой водопотребности. Установлен эффект снижения размолоспособности по мере увеличения концентрации нанопластин графена, дисперсный состав которых представляет собой агломераты частиц, не дезагрегируемых при ультразвуковой обработке. Оба модификатора позволяют повысить прочность цементного камня – наибольший эффект достигнут при 0,03% нанопластин графена и 0,005% кремнезоля, применение которого в целом показало лучшие результаты.

Ключевые слова: наномодификация, цементы низкой водопотребности, кремнезоль, нанопластины графена

Для цитирования: Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Кропачев Р.В. Наномодификация высокопрочных цементов низкой водопотребности добавками кремнезоля и нанопластинами графена // Известия КГАСУ, 2026, № 1(75), с. 51-63, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.5, EDN: EKANHZ

Nanomodification of high-strength low water demand cements with silica sol and graphene nanoplatelets

E.G. Gulyakov¹, V.G. Khozin¹, I.V. Borovskikh¹, R.V. Kropachev²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

²PrintPro Homes LLC, Florida, The United States of America

Abstract: *Problem statement.* A promising approach to improving the properties of cementitious materials is their nanomodification, which is often complicated by achieving maximum homogenization of nanoscale particles within the bulk of the base material. Traditional methods of mixing components do not always ensure uniform distribution of nanomodifiers within the mixture. A much more effective approach is co-milling, which underlies the production of low water demand cements. The well-known effect of particle disaggregation during the mechanical, “forced” application of a plasticizer to the surface of cement grains promotes uniform distribution of nanoscale modifiers. Silica sol (silicon dioxide hydrosol) and graphene powder, consisting of graphene nanoplatelets, are known for their positive effects on cementitious materials, making nanomodification of highly dispersed low water demand cements relevant for the creation of high-strength and ultra-high performance concretes. The purpose of this study is to modify low water demand cements with silica sol and graphene nanoplatelets and determine their effect on the properties of cement paste and cement stone. To achieve this, the following tasks are solved: analyzing the particle size distribution of the starting components, producing highly dispersed low water demand cements with nanoscale additives, and assessing the grindability of the starting Portland cement, the normal consistency of the cement paste, and the strength of the cement stone.

Results. The analysis of the particle size distribution of the starting components allowed us to determine its effect on the grindability of Portland cement and the normal consistency of the resulting low water demand cements. The concentration dependences of the strength of the cement stone on the nanomodifier content were determined.

Conclusions. The use of silica sol has virtually no effect on the specific surface area or normal consistency of the resulting low water demand cements. A decrease in grindability was observed with increasing concentration of graphene nanoplatelets, the dispersed composition of which consists of agglomerates of particles that are not disaggregated during ultrasonic treatment. Both modifiers can increase the strength of cement stone – the greatest effect was achieved with 0.03% graphene nanoplatelets and 0.005% silica sol, the use of which generally showed the best results.

Keywords: nanomodification, low water demand cements, silica sol, graphene nanoplatelets

For citation: Gulyakov E.G., Khozin V.G., Borovskikh I.V., Kropachev R.V. Nanomodification of high-strength low water demand cements with silica sol and graphene nanoplatelets // News of KSUAE, 2026, № 1(75), pp. 51-63, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.5, EDN: EKANHZ

1. Введение

Использование наноразмерных добавок различных типов с целью модификации строительных материалов приобретает всё большую популярность как метод повышения физико-механических характеристик и подтверждает свою высокую эффективность [1-3]. Ключевая трудность при реализации полноценной наномодификации связана с необходимостью обеспечения статистически однородного распределения гомеопатических количеств исходных наночастиц в объеме основной матрицы, ввиду их предрасположенности к агрегированию [4-6]. В связи с этим наибольшую результативность показывают способы получения наномодифицированных материалов, которые обеспечивают высокий уровень гомогенизации наночастиц в составе базового компонента. К числу таких способов относится, в частности, совместное измельчение исходных компонентов с нанодобавками в среде поверхностно-активных веществ, препятствующих объединению наноразмерных частиц в агломераты [7].

Среди минеральных вяжущих самым распространенным и универсальным является портландцемент (ПЦ), модификация которого является актуальным направлением исследований [8-10]. Получение бетонов традиционным способом смешения всех компонентов и затворения их водой не позволяет раскрыть весь потенциал наномодификации. Наиболее эффективным методом повышения свойств строительных материалов различного вида является механоактивация с модификаторами [11,12]. Цементы низкой водопотребности (ЦНВ), получаемые в результате совместного помола в шаровых мельницах портландцемента (или клинкера с гипсом) с минеральными наполнителями в присутствии пластификатора, известны своими преимуществами в технологическом, техническом, экологическом и экономическом плане [13-15]. Благодаря высокой активности и низкой водопотребности ЦНВ превосходят все известные промышленно-выпускаемые виды цементов в мире. В процессе помола при получении ЦНВ реализуется эффект Ребиндера – адсорбционное понижение прочности твердых тел под влиянием поверхностно-активных веществ (ПАВ), что интенсифицирует измельчение минеральных компонентов. При этом сухой пластификатор, являясь ПАВ, механически «втирается» на поверхность минеральных частиц, закрепляясь на них под воздействием трения и разноименных зарядов, что наиболее эффективно проявляется в случае взаимодействия цемента с водным раствором суперпластификатора (СП) на основе поликарбоксилатных эфиров. В этом случае СП, будучи ПАВ, адсорбированный на поверхности частиц цемента полярными карбоксильными группами, «отталкивается» алифатическими боковыми цепями полиэфира от остальных частиц, что стимулирует процесс их дезагрегации. Именно эти явления привлекают способ наномодификации ЦНВ путем совместного помола, так как позволяют равномерно распределять наноразмерные добавки и одновременно функционализировать частицы цемента, вызывая сам «эффект ЦНВ» [16].

Среди множества типов ЦНВ (по классификации ПНСТ 974-2024), по нашему мнению, наибольший интерес представляют ЦНВ-100 со 100%-ым содержанием клинкерной части. Для получения высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов необходимы именно ЦНВ-100, которые обладали бы наибольшей активностью и наименьшей водопотребностью. Известны результаты научных работ по установлению различных эффектов повышения прочностных свойств цементных материалов в результате их наномодификации [17-19]. Учитывая вышеприведенное, модификация ЦНВ-100 наноразмерными добавками представляет особый интерес.

В связи с этим цель данной работы – исследовать модификацию ЦНВ-100 наноразмерными добавками и определить их влияние на физико-механические свойства цементного камня. Для этого решаются следующие задачи: анализ дисперсного состава исходных компонентов, получение ЦНВ-100 с наноразмерными добавками и оценка размолоспособности исходного портландцемента, нормальной густоты цементного теста и прочности цементного камня из модифицированного ЦНВ-100.

2. Материалы и методы

Для получения ЦНВ-100 применялись следующие материалы:

- Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н с нормальной густотой цементного теста НГ=29% и удельной поверхностью $S_{уд}=3943 \text{ см}^2/\text{г}$, производства АО «Волга Цемент» (г. Вольск), соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020. Минералогический и химический составы портландцемента представлены в таблицах 1 и 2, соответственно.

- Суперпластификатор «Полипласт ПК» (тип R) на основе поликарбоксилатных эфиров в форме 50%-го водного раствора с плотностью $1,1 \text{ г/см}^3$, соответствующий требованиям ТУ 20.59.59-098-58042865-2022, производства АО «Полипласт».

Таблица 1

Минералогический состав ЦЕМ I 42,5Н АО «Волга Цемент»

Минералогический состав клинкера (%)	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaOсв.
Факт. знач.	58,97	19,84	5,29	12,22	0,26

Таблица 2

Химический состав ЦЕМ I 42,5Н АО «Волга Цемент»

Химический состав цемента (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Щел. в пересч. Na ₂ O	П.П.П.	Cl
Факт. знач.	22,44	4,57	65,03	4,02	2,02	0,1	0,1	0,6	0,68	0,43	0,01

На основании анализа данных различных исследований [20-22], для модификации ЦНВ-100 была выбрана добавка коллоидного диоксида кремния:

- кремнезоль (гидрозоль диоксида кремния) марки «Лэйксил» 30 – опалесцирующий раствор желтого цвета. Производитель – ООО «НТЦ «КОМПАС» (г. Казань). Физико-химические показатели представлены в таблице 3:

Таблица 3

Физико-химические показатели кремнезоля «Лэйксил» 30

№	Показатель	Нормативные значения по ТУ	Фактические значения
1	pH, ед. pH	9,0-10,5	10,11
2	Массовая концентрация диоксида кремния, % масс.	29-31	30,60
3	Массовая концентрация окиси натрия, % масс.	-	0,453
4	Кинематическая вязкость, сСт	не более 10	5,93
5	Силикатный модуль	-	67,55
6	Площадь удельной поверхности, м ² /г	-	359,0
7	Диаметр мицеллы, нм	-	7,58
8	Удельная плотность, г/см ³	1,196-1,210	1,201

В качестве второго компонента для наномодификации применялся графеновый порошок RG-S1, состоящий из тонких и мелких нанопластин графена, известный своими эффектами улучшений цементных материалов [23-25]. Производитель – ООО «РУСГРАФЕН» (г. Пермь). Имеет следующие характеристики:

Таблица 4

Характеристики графенового порошка RG-S1

№	Показатель	Значения
1	Форма частиц	Тонкие мелкие нанопластины
2	Диаметр нанопластин, мкм	от 0,1 до 10
3	Толщина нанопластин, нм	от 10 до 30
4	Содержание углерода, %	>99
5	Насыпная плотность, г/см ³	<0,2
6	Удельная поверхность, м ² /г	От 9 до 10

Для сокращения в графиках приняты их следующие обозначения:

- СП «Полипласт ПК» (тип R) – сокр. ПК-R;
- Кремнезоль «Лэйксил» 30 – сокр. Л-30;
- Графеновый порошок RG-S1 – сокр. RG-S1.

Совместный помол компонентов осуществлялся в вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3 (опытный завод со спец. бюро, г. Москва), которая предназначена для периодического процесса измельчения порошкообразного или зернистого материала в лабораторных условиях, а также для моделирования процесса измельчения на промышленных мельницах. Основные технические данные и характеристики мельницы представлены в таблице 5.

Принцип действия вибрационных мельниц основан на приведении массы шаров и измельчаемого материала в круговое движение посредством вибратора, сопряженного с

электродвигателем. Частицы материала, попадая в пространство между шарами, испытывают ударные и сдвигающие нагрузки.

Таблица 5

Техническая характеристика мельницы вибрационной СВМ-3

№	Характеристики	Значения
1	Объем камеры, м ³	0,1
2	Частота колебаний, 1/сек	25
3	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч (не более)	0,2
4	Мощность двигателя, кВт	3,0
5	Напряжение сети, В	380/220
6	Частота тока, Гц	50
7	Габаритные размеры, м (не более) - длина - ширина - высота	0,95 0,65 1,05
8	Полная масса, кг (не более)	300

В качестве базового состава для модификации использовался ЦНВ-100 с 1% суперпластификатора «ПК-R», вводимого в форме 50%-ного водного раствора. Время помола для всех составов составляло 10 мин при загружаемой массе исходного портландцемента 1 кг. Были подготовлены следующие премиксы на основе кремнезоль Л-30 и водного раствора ПК-R:

1. Премикс №1: Л-30 (массовая концентрация SiO_2 – 0,001% от массы цемента) + 1% ПК-R (в пересчете на активное вещество СП);
2. Премикс №2: Л-30 (массовая концентрация SiO_2 – 0,0025% от массы цемента) + 1% ПК-R (в пересчете на активное вещество СП);
3. Премикс №3: Л-30 (массовая концентрация SiO_2 – 0,005% от массы цемента) + 1% ПК-R (в пересчете на активное вещество СП);
4. Премикс №4: Л-30 (массовая концентрация SiO_2 – 0,0075% от массы цемента) + 1% ПК-R (в пересчете на активное вещество СП).

Процесс получения премиксов включал тщательное смешивание кремнезоль с водным раствором СП. Перемешивание осуществлялось в диспергирующей установке при постоянной скорости вращения 900 об/мин.

Введение RG-S1 осуществлялось в сухом виде в количестве 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04% и 0,05% от массы цемента. Для получения ЦНВ-100 взвешенные добавки Премиксов Л-30 и сухого порошка RG-S1 предварительно дозировались в ПЦ в металлической чаше, после чего вся масса загружалась в камеру мельницы СВМ-3. Далее осуществлялся совместный помол в течение 10 минут.

Оценка удельной поверхности ($S_{уд}$) полученных ЦНВ-100 осуществлялась на приборе дисперсионного анализа ПСХ-10А. Распределение частиц по размерам (РЧР) определялось на лазерном анализаторе распределения частиц Partica LA-950V2 фирмы «Horiba».

Из цементного теста нормальной густоты (НГ), определенной в соответствии с ГОСТ 30744-2001, изготавливались образцы-кубы с размером ребра 2 см. Образцы твердели в камере в нормально-влажностных условиях при температуре 20°C и относительной влажности воздуха не менее 95%. Прочность цементного камня на сжатие определялась в возрасте 1, 7 и 28 суток твердения по 6 образцов на каждый срок. Испытания проводились с помощью пресса МС-500 с регулируемой скоростью и максимальной нагрузкой до 20 и 50 тн.

3. Результаты и обсуждение

В первую очередь была проведена оценка дисперсности исходных материалов с помощью лазерного анализатора частиц Partica LA-950V2. Для начала было оценено РЧР у исходного ЦЕМ I 42,5Н, из которого в последующем получали ЦНВ-100.

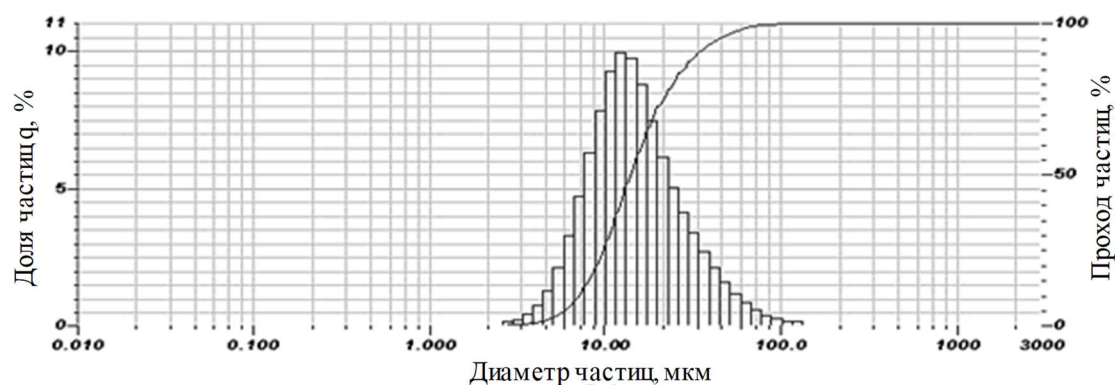


Рис. 1. РЧР ЦЕМ I 42,5Н (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Particle size distribution CEM I 42.5 N (illustration by the authors)

Как видно из рисунка 1, ЦЕМ I 42,5Н имеет типичное РЧР, характеризующееся одним пиком и размерами частиц от 2,98 мкм до 133,1 мкм. Преобладающее количество частиц D_{90} (90%) имеет размеры до 33,8 мкм, а количество D_{10} (10%) составляет до 7,13 мкм.

Гистограмма РЧР кремнезоля Л-30 представлена на рисунке 2.

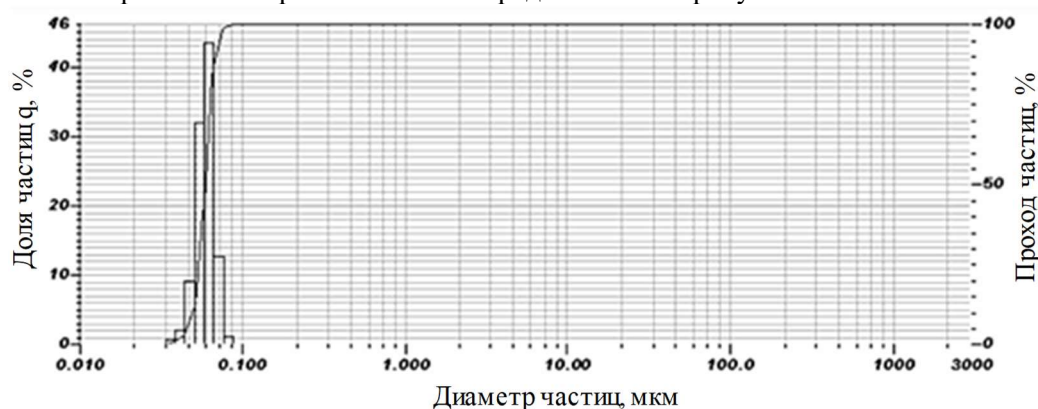


Рис. 2. РЧР кремнезоля Л-30 (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Particle size distribution of silica sol L-30 (illustration by the authors)

РЧР кремнезоля представлена одним пиком до 0,1 мкм и медианным размером D_{50} коллоидных частиц, равным 0,052 мкм, что входит в интервал наноразмерных частиц (до 0,1 мкм) и соответствует заявленным производителем характеристикам, учитывая, однако, возможное агрегирование со временем.

Для оценки дисперсности графенового порошка RG-S1 так же был проведен анализ распределения частиц по размерам, результаты которого приведены на рисунке 3.

Анализ РЧР графенового порошка (рисунок 3, а), определенного в водной среде без ультразвуковой (УЗ) обработки, показывает, что нанопластины графена представляют собой агломераты в виде хлопьев с размерами от 3,4 до 22,8 мкм, которые имеют D_{90} до 12,56 мкм, а D_{10} до 5,46 мкм. После применения УЗ обработки в течение 12 минут (рисунок 3, б) РЧР кардинально не изменилось, оно осталось практически таким же – от 2,6 до 22,8 мкм. При этом показатель D_{90} стал равен 11,44 мкм, а D_{10} – 4,62 мкм. Так как агрегирование RG-S1 обусловлено ван-дер-ваальсовыми и электростатическими связями, то даже применение длительной УЗ обработки не способно разбить все агломераты.

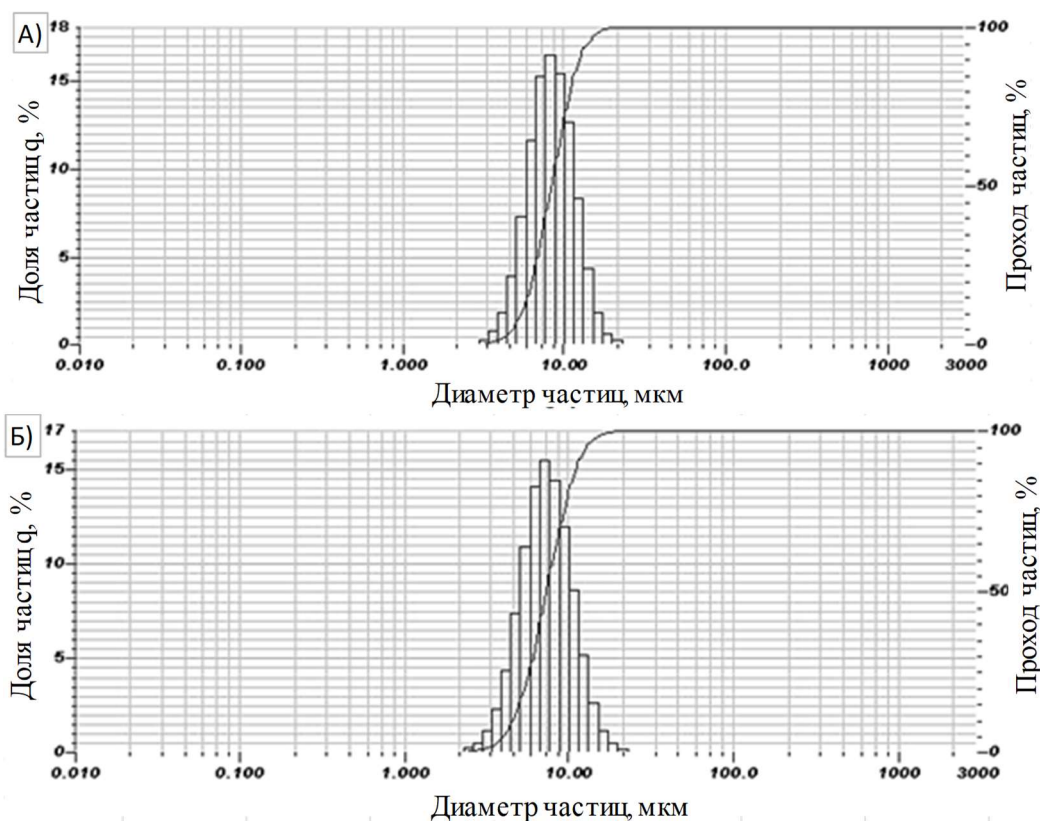


Рис. 3. РЧР графенового порошка RG-S1: а) без применения ультразвуковой обработки; б) с применением ультразвуковой обработки (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Particle size distribution of RG-S1 graphene powder: a) without ultrasonic treatment; b) with ultrasonic treatment (illustration by the authors)

Базовый ЦНВ-100 с 1% ПК-R имеет следующее РЧР (рисунок 4):

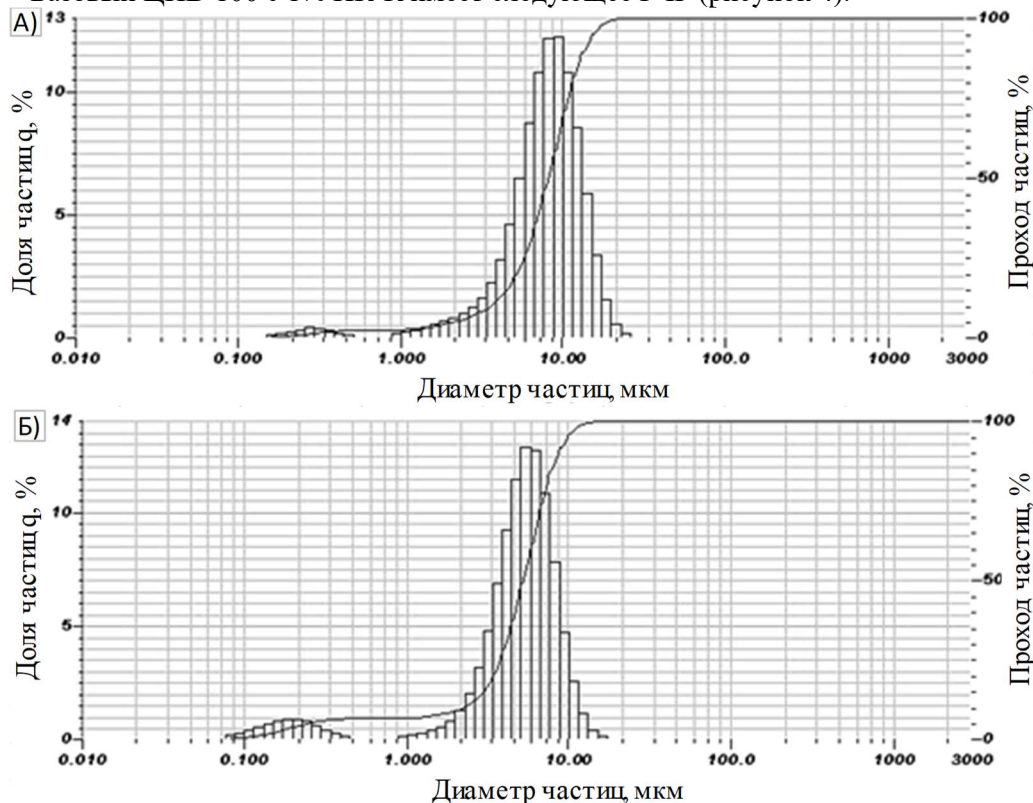


Рис. 4. РЧР базового состава ЦНВ-100 с 1% ПК-R: а) без применения ультразвуковой обработки; б) с применением ультразвуковой обработки (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Particle size distribution of the base composition LWDC-100 with 1% PC-R: a) without ultrasonic treatment; b) with ultrasonic treatment (illustration by the authors)

Как видно из полученных гистограмм РЧР, базовый состав ЦНВ-100 обладает двумодальным распределением. Без применения УЗ обработки (рисунок 4, а) распределение представлено двумя группами частиц: 1) от 0,172 до 0,51 мкм (доля 2,14% от всего объема частиц), 2) от 1,005 до 26,11 мкм; при этом показатели D_{10} и D_{90} равны 3,63 и 13,69 мкм, соответственно. После применения УЗ обработки в течение 3 минут (рисунок 4, б) РЧР заметно смещается в сторону тонких частиц и, соответственно, два пика представлены следующим распределением: 1) от 0,087 до 0,445 мкм (доля 6,37% от всего объема частиц) и 2) от 1,005 до 17,38 мкм; D_{10} и D_{90} стали равны 2,31 мкм и 8,63 мкм, соответственно. Сравнивая РЧР ЦНВ-100 и RG-S1, необходимо отметить, что частицы первого после УЗ обработки более тонкодисперсные, чем у нанопластин графенового порошка. Вероятно, это связано с тем, что требуется намного больше энергии, чтобы «разбить» агломераты RG-S1.

Далее представлены составы ЦНВ-100 и их свойства:

Таблица 6

Составы и свойства ЦНВ-100

№ п/п	Составы	Удельная поверхность ($S_{уд}$), $см^2/г$	Нормальная густота (НГ), %
1	ЦНВ-100 с 1% ПК-R	7310	16,0
2	ЦНВ-100 с премиксом №1 (0,001% SiO_2)	7340	16,0
3	ЦНВ-100 с премиксом №2 (0,0025% SiO_2)	7330	16,0
4	ЦНВ-100 с премиксом №3 (0,005% SiO_2)	7260	16,0
5	ЦНВ-100 с премиксом №4 (0,0075% SiO_2)	7290	16,0
6	ЦНВ-100 с 1% ПК-R + 0,01% RG-S1	7123	16,2
7	ЦНВ-100 с 1% ПК-R + 0,02% RG-S1	6647	16,1
8	ЦНВ-100 с 1% ПК-R + 0,03% RG-S1	6280	15,9
9	ЦНВ-100 с 1% ПК-R + 0,04% RG-S1	5752	15,7
10	ЦНВ-100 с 1% ПК-R + 0,05% RG-S1	5553	15,6

Из результатов таблицы 6 видно, что $S_{уд}$ и НГ составов ЦНВ-100 с премиксами Л-30 (№2-5) практически не отличается от базового состава №1. В то же время составы ЦНВ-100 с RG-S1 (№6-10) отличаются по обоим показателям: 1) по мере увеличения количества графенового порошка с 0,01% до 0,05% снижается $S_{уд}$ – с 7123 до 5553 $см^2/г$, соответственно, что меньше базового на 2,6-24%; 2) в результате снижения удельной поверхности НГ составов с RG-S1 так же уменьшается – с 16,2 до 15,6%. Данные явления говорят о снижении размолоспособности портландцемента при получении ЦНВ-100, которое происходит вследствие того, что графеновый порошок RG-S1 выступает в качестве «ингибитора» помола, так как проявляет антифрикционные свойства, известные в ряде публикаций [26-28]. Судя по всему, при помоле до удельной поверхности свыше 7000 $см^2/г$ графеновые нанопластины «экранируют» поверхность цемента, чему не может препятствовать даже применение 50%-го водного раствора СП на основе поликарбоксилатных эфиров.

Далее приведено сравнение прочности образцов цементного камня, изготовленных из цементного теста нормальной густоты вышеприведенных составов ЦНВ-100.

Данные, представленные на рисунке 5, свидетельствуют о том, что введение наноразмерных добавок кремнезоля Л-30 резко повышает прочность цементного камня уже в начальные сроки твердения, но наибольший эффект приходится на 1 сут – прирост на 9,3-12,9% относительно базового состава №1. На 7 и 28 суток наибольший прирост прочности показал состав №4 с 0,005% Л-30 – прочность выше базового на 8,1% и 8,5%, соответственно. Данному эффекту способствует физико-химическое закрепление на поверхности зерен цемента кремнезоля, равномерно распределенного в водной среде с СП. При затворении водой наночастицы Л-30, находясь на поверхности механоактивированного цемента, «моментально» вступают в реакцию с образующимся портландитом $Ca(OH)_2$, проявляя пуццолановый эффект, что заметно упрочняет структуру цементного камня [22, 29].

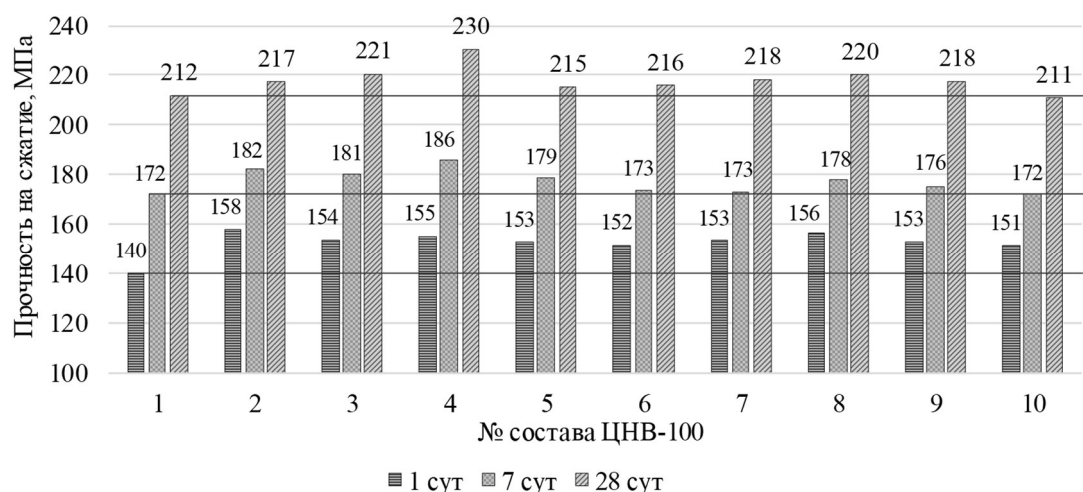


Рис. 5. Прочность на сжатие цементного камня составов ЦНВ-100 (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Compressive strength of cement stone of LWDC-100 compositions
 (illustration by the authors)

Введение графенового порошка RG-S1 в состав ЦНВ-100 так же повышает прочность цементного камня в начальные сроки твердения, но уступает по эффекту составам с Л-30. Так, прирост прочности на 1 сутки составов с RG-S1 (составы №6-10 на рисунке 5) составляет 7,86-11,43% относительно базового ЦНВ-100. На 7 и 28 сут наибольшая прочность ЦНВ-100 с RG-S1 проявляется при его концентрации 0,03% (состав №8) – прирост на 3,5% и 3,8%, соответственно. Хотя данные эффекты скорее объясняются меньшей нормальной плотностью цементного теста у составов с RG-S1, но проявление наномодификации так же нельзя исключить.

Для наноразмерных частиц, применяемых в качестве модифицирующей добавки в количестве сотых и тысячных долей процента от массы материала, характерно пиковое проявление эффекта улучшения свойств [4, 22, 30]. При наномодификации высокодисперсных ЦНВ-100, исследованных в данной работе, наиболее эффективными концентрациями стали 0,005% кремнезоля Л-30 и 0,03% графенового порошка RG-S1, что в целом соответствует общей закономерности наномодификации, установленной в работе [4].

4. Заключение

Таким образом, результаты проведенного исследования наномодификации высокодисперсных ЦНВ-100 позволяют сделать следующие выводы:

1) Оценка РЧР исходного портландцемента и кремнезоля показала, что размеры их частиц практически соответствуют заявленным характеристикам. Определено, что применение кремнезоля Л-30 в составе ЦНВ-100 не влияет на удельную поверхность получаемого порошка и нормальную плотность цементного теста.

2) Введение при совместном помоле графенового порошка RG-S1 в интервале примененных концентраций способствует снижению размолоспособности цемента с суперпластификатором, что сказывается на активности получаемых ЦНВ-100. Данное явление может объясняться природой данного материала – нанопластины графена способны проявлять антифрикционные свойства, которые снижают трение между частицами цемента и мелющими телами. Дисперсное состояние графенового порошка RG-S1 представляет собой агрегаты, для дезагрегации и последующего применения которых требуется предварительная подготовка.

3) В ходе оценки прочности образцов цементного камня, изготовленных из цементного теста нормальной плотности на основе наномодифицированных ЦНВ-100, установлено, что в целом применение кремнезоля Л-30 дает больший прирост в прочности, чем графеновый порошок RG-S1. Наибольшей прочностью цементного камня, равной 230 МПа на 28 суток, что на 8,5% больше базового, обладает состав ЦНВ-100 с 0,005% Л-30. Наиболее эффективная концентрация в случае применения RG-S1 равна 0,03%, при которой прирост прочности цементного камня ЦНВ-100 составил 3,8% относительно базового состава.

Проведенное исследование показывает, что наномодификация высокодисперсных ЦНВ-100 наноразмерными добавками кремнезоля и графенового порошка, состоящего из нанопластин графена, позволяет улучшить прочностные показатели цементного камня, что способствует достижению более высокой активности вяжущего без потери технологических свойств.

Список литературы/References

1. Писаренко Ж.В., Симченко Н.А., Иванов Л.А., Се. В., Насырова Г.А. Предпосылки, возможности и риски перспективного развития нанотехнологий на глобальном уровне // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. Т. 17. № 6. С. 775-786. DOI 10.15828/2075-8545-2025-17-6-775-786. EDN RBJCOI.
Pisarenko Zh.V., Simchenko N.A., Ivanov L.A., SE, Nasyrova G.A. Prerequisites, opportunities and risks for the future development of nanotechnology at the global level // Nanotechnologies in construction: a scientific internet-journal. 2025. Vol. 17. No. 6. P. 775–786. DOI 10.15828/2075-8545-2025-17-6-775-786. EDN: RBJCOI.
2. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Данзанов Д.В., Битуев А.В. Самоуплотняющиеся бетоны для монолитных конструкций с высокодисперсными добавками на основе кремнезема // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. Т. 17, № 6. С. 666-676. DOI 10.15828/2075-8545-2025-17-6-666-676. EDN SDLVWE.
Urkanova L.A., Lkhasaranov S.A., Danzanov D.V., Bituev A.V. Self-compacting concrete for monolithic constructions with highly dispersed silica-based additives // Nanotechnologies in construction: a scientific internet-journal. 2025. Vol. 17. No. 6. P. 666–676. DOI 10.15828/2075-8545-2025-17-6-666-676. EDN: SDLVWE.
3. Farmaki Spyridoula, Exarchos Dimitrios, Dracopoulos Vasileios, Gkatzamanis Anastasios, Dassios Konstantinos, Matikas Theodore. Investigation of Microstructure and Mechanical Behavior of Nanomodified Cement-Based Materials // Applied Mechanics. 2026. No. 7(1):13. DOI 10.3390/applmech7010013.
4. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 25-33. EDN TJDRBF.
Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. Common concentration pattern of effects of construction materials nanomodification // Construction Materials. 2015. No. 2. P. 25-33. EDN TJDRBF.
5. Брыков А.С. Модификация цементных систем добавками на основе наночастиц. История применения, текущее состояние, перспективы // Цемент и его применение. 2021. № 4. С. 56-62. EDN LOZFPM.
Brykov A.S. Modification of cement systems with nanoparticle-based additives. History of application, current state, prospects // Journal cement and its applications. 2021. No. 4. P. 56-62. EDN LOZFPM.
6. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 35-41. DOI 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41. EDN UZUOSG.
Ibragimov R.A., Korolev E.V. Strength of composites based on modified Portland cement activated in a vortex layer apparatus // Industrial and Civil Engineering. 2021. No. 1. P. 35-41. DOI 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41. EDN UZUOSG.
7. Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Ганеева Ю.М. Влияние суперпластификаторов на размоловоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 2(68). С. 77–91. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7. EDN: GINAGZ.
Gulyakov E.G., Khozin V.G., Borovskikh I.V., Ganeeva Y.M. The influence of superplasticizers on the grindability of Portland cement for the production of low water

- demand cements // News of KSUAE. 2024. No. 2(68). P. 77-91. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.7. EDN: GINAGZ.
8. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А. Влияние комплексных добавок на прочностные свойства композиционного портландцемента / Е. Ю. Ермилова, З. А. Камалова // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 4(9). С. 46-53. EDN LJTIWJ.
Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A. Influence of complex additives on the strength properties of blended Portland cement // Construction, buildings and structures. 2024. No. 4(9). P. 46-53. EDN LJTIWJ.
9. Гойсис М. Перспективы нанотехнологий для материалов на основе цемента // Цемент и его применение. 2017. № 5. С. 30-39. EDN YMTKWG.
Goisis M. Prospects for nanotechnologies for cement-based materials // Journal cement and its applications. 2017. No. 5. P. 30-39. EDN YMTKWG.
10. Прохоров А.И. Подходы к модификации свойств цементных систем и снижение углеродного следа строительной отрасли // Аспирантские чтения : Сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ) / Под общей редакцией Т.В. Шепитко. Том Выпуск 4. Москва : Издательство «Перо». 2021. С. 220-225. EDN WVNPRBC.
Prokhorov A.I. Approaches to modifying the properties of cement systems and reducing the carbon footprint of the construction industry // Post-graduate readings: Collection of scientific articles by postgraduate students of RUT (MIIT) / General editor T.V. Shepitko. Vol. Iss. 4. Moscow: "Pero" Publishing House. 2021. P. 220-225. EDN WVNPRBC.
11. Гиззатуллин А.Р., Морозова Н.Н., Нестерова К.О. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1(11). С. 47-57. EDN CBGPNV.
Gizzatullin A.R., Morozova N.N., Nesterova K.O. Functionalized fillers for use in cement concretes // Polymers in construction: a scientific internet-journal. 2023. No. 1(11). P. 47-57. EDN CBGPNV.
12. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В. Функциональные наполнители полимерных композиционных материалов // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. № 1(12). С. 41-44. EDN DGXBVU.
Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V. Functional fillers for polymer composite materials // Polymers in construction: a scientific internet-journal. 2024. No. 1(12). P. 41-44. EDN DGXBVU.
13. Макаренко С.В. Цементы низкой водопотребности как альтернативный вид применяемой в товарном бетоне вяжущей смеси // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1(44). С. 58-63. DOI 10.21285/2227-2917-2023-1-58-63. EDN TXAEFH.
Makarenko S.V. Cements with low water demand as an alternative type of binding mixture used in ready-mixed concrete // Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2023. Vol. 13. No. 1(44). P. 58-63. DOI 10.21285/2227-2917-2023-1-58-63. EDN TXAEFH.
14. Мажитов Е.Б., Тулеугалиева Ж.С., Рыскалиев М.Ж., Жарылгапов С.М., Шингужиева А.Б., Талаптанов Е.Г. Цемент с пониженным водопотреблением на основе карбонатного наполнителя // Механика и технологии. 2025. №. 4(90). с. 138-150. DOI 10.55956/GIXK2666.
Mazhitov E.B., Tuleugalieva Zh.S., Ryskaliev M.Zh., Zharylgapov S.M., Shinguzhieva A.B., Talaptanov E.G. Low-water-demand cement based on a carbonate filler // Mechanics and Technologies. 2025. No. 4(90). P. 138-150. DOI 10.55956/GIXK2666.
15. Токарский А.Я., Егоров В.Н., Ганзен Е.В., Кузьмина Т.К., Несветайло В.М. Высокопрочный цемент и его применение при возведении монолитных железобетонных конструкций // Строительное производство. 2023. № 1. С. 60-64. DOI 10.54950/26585340_2023_1_60. EDN PRYAFZ.
Tokarskiy A.Ya., Egorov V.N., Ganzen E.V., Kuzmina T.K., Nesvetailo V.M. High-strength cement and its use in the construction of monolithic reinforced concrete

- structures // Construction production. 2023. No. 1. P. 60-64. DOI 10.54950/26585340_2023_1_60. EDN PRYAFZ.
16. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К., Кашапов Р.Р., Баишев Д.И. Опыт наномодификации цементов низкой водопотребности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 53-57. EDN YLSUVN.
Khozin V.G., Khohryakov O.V., Nizamov R.K., Kashapov R.R., Baishev D.I. Experience in Nano-Modification of Low Water Demand Cements // Industrial and Civil Engineering. 2018. No. 1. P. 53–57. EDN YLSUVN.
17. Янь С., Янь Ш., Тан Ц., Ван С. Влияние графена на механические свойства цементного раствора // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 6(364). С. 75-81. DOI 10.15372/PMTF20200610. EDN LULLID.
Yan S., Yan Sh., Tang J., Wang X. Effect of graphene on mechanical properties of the cement paste // Applied mechanics and technical physics. 2020. Vol. 61. No. 6(364). P. 75-81. DOI 10.15372/PMTF20200610. EDN LULLID.
18. Логинова С.А., Таничев М.В., Гоглев И.Н. Исследование воздействия нанодобавок на физические и механические свойства цементных // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. Т. 17. № 6. С. 750-759. DOI 10.15828/2075-8545-2025-17-6-750-759. EDN QSIUZY.
Loginova S.A., Tanichev M.V., Goglev I.N. Influence of Nanoadditives on the Physical and Mechanical Performance of Cement Concrete. Nanotechnologies in Construction. 2025. Vol. 17. No. 6. P. 750–759. DOI 10.15828/2075-8545-2025-17-6-750-759. EDN QSIUZY.
19. Логанина В.И. Применение нанокремнезема в строительных материалах // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2019. № 2(9). С. 10-21. EDN MYCXGD.
Loganina V.I. The use of nanosilica in building materials // PSUAC bulletin: construction, science and education. 2019. No. 2(9). P. 10-21. EDN MYCXGD.
20. Ильина Л.В., Тацки Л.Н., Молодин В.В., Колесова Т.Д. Легкие бетоны с пеностеклокристаллическим заполнителем, модифицированные микро- и нанокремнеземом // Эксперт: теория и практика. 2023. № 3(22). С. 80-85. DOI 10.51608/26867818_2023_3_80. EDN GMWQXY.
Ilyina L.V., Tatski L.N., Molodin V.V., Kolesova T.D. Lightweight concrete with foam glass filler, modified micro and nano silica // Expert: theory and practice. 2023. No. 3 (22). P. 80-85. DOI 10.51608/26867818_2023_3_80. EDN GMWQXY.
21. Потапов В.В., Ефименко Ю.В., Горев Д.С. Определение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ связанного добавкой нано- SiO_2 в цементном камне // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2019. Т. 11. № 4. С. 415–432. EDN WIWPPD.
Potapov V.V., Efimenko Y.V., Gorev D.S. Determination of the amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bound by additive nano- SiO_2 in cement matrices // Nanotechnologies in construction: a scientific internet-journal. 2019. Vol. 11. No. 4. P. 415–432. DOI 10.15828/2075-8545-2019-11-4-415-432. EDN WIWPPD.
22. Ильина Л.В., Туляганов А.К., Литвинов М.Е. Влияние кремнезоля на прочность цементных растворов // Качество. Технологии. Инновации : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 27–29 апреля 2021 года. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). 2021. С. 81-85. EDN FQCKKE.
Ilyina L.V., Tulyaganov A.K., Litvinov M.E. Effect of silica sol on the strength of cement mortars // Quality. Technologies. Innovations: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, Novosibirsk, April 27–29, 2021. Novosibirsk: Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). 2021. P. 81–85. EDN FQCKKE.
23. Salah, Husam & A. Mutalib, Azrul & Kaish, A. B. M & Syamsir, Agusril & Algaifi, Hassan. (2023). Development of Ultra-High-Performance Silica Fume-Based Mortar Incorporating Graphene Nanoplatelets for 3-Dimensional Concrete Printing Application. Buildings. 13. 1949. 10.3390/buildings13081949.

24. Ahmed, Ahmed A. & Abraham, Ojo. (2025). Assessing the Impact of Graphene Nanoplatelets Aggregates on the Performance Characteristics of Cement-Based Materials. Sustainability. 17. 2349. 10.3390/su17062349.
25. Lavagna, Luca & Santagati, Andrea & Bartoli, Mattia & Suarez-Riera, Daniel & Pavese, Matteo. (2023). Cement-Based Composites Containing Oxidized Graphene Nanoplatelets: Effects on the Mechanical and Electrical Properties. Nanomaterials. 13. 901. 10.3390/nano13050901.
26. Marlinda, A. R. & Thien, Gregory & Mehmood, Shahid & Ling, Ivan & Hashem Phd, Abu & Chan, Kah & Johan, Mohd. (2023). Graphene as a Lubricant Additive for Reducing Friction and Wear in Its Liquid-Based Form. Lubricants. 11. 29. 10.3390/lubricants11010029.
27. Rustamov, Ibrohim. (2020). Graphene-Reinforced Lithium Grease for Antifriction and Antiwear. ACS Applied Nano Materials. 3. 10.1021/acsanm.0c02461.
28. Wang, Zhaohua & Su, Meini & Wang, Yong. (2024). Investigation on the re-agglomeration of graphene nanoplatelets in cement composites using X-ray computed tomography.
29. Kropyvnytska, Tetiana & Sanytsky, Myroslav & Rucińska, Teresa & Rykhlitska, Olena. (2019). Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 6. 38-48. 10.15587/1729-4061.2019.185111.
30. Chernishov E.M., Artamonova O.V., Slavcheva G.S., Nanomodification of cement-based composites in the technological life cycle. Nanotechnologies in Construction. 2020, Vol. 12, No. 3, P. 130–139. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-3-130-139.

Информация об авторах

Гуляков Евгений Геннадьевич, инженер, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: gulyakoveg@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-7065-8022

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Боровских Игорь Викторович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: borigor83@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1223-3138

Кропачев Роман Васильевич, главный директор по технологиям, ООО “PrintPro Homes”, Флорида, Соединенные Штаты Америки

Email: krv-kzn@mail.ru, ORCID: 0009-0006-0455-9938

Information about the authors

Evgeny G. Gulyakov, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: gulyakoveg@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-7065-8022

Vadim G. Khozin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Igor V. Borovskikh, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: borigor83@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1223-3138

Roman V. Kropachev, Chief Technology Officer, PrintPro Homes LLC, Florida, The United States of America

Email: krv-kzn@mail.ru, ORCID: 0009-0006-0455-9938

Дата поступления: 06.02.2026

Дата принятия: 29.04.2026