

Научная статья / Original Article

УДК 620.3

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-750-759>

CC BY 4.0

Исследование воздействия нанодобавок на физические и механические свойства цементных бетонов

Светлана Андреевна Логинова^{1*} , Максим Владимирович Таничев^{1,2} , Илья Николаевич Гоглев² 

¹ Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

² Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: loginovasa@ystu.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование влияния различных нанодобавок на физико-механические свойства цементных бетонов является актуальной задачей, поскольку ведется поиск наиболее перспективных и экономичных решений по улучшению его свойств при выполнении монолитных работ. Данный вопрос подробно рассматривался авторами статьи в более ранних работах.

Методы и материалы. Авторами были предложены две экспериментальные рецептуры комплексной нанодобавки в бетон на основе флюата аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$) и карбида кремния (SiC). **Результаты.** В первой части исследования проведены испытания прочностных свойств цементных бетонов после 28 суток твердения. Изучена кинетика твердения и влияние каждой из указанных добавок на бетон. **Обсуждение.** Проведенные исследования позволили установить оптимальное сочетание наночастиц, входящих в состав специальной добавки, а также детально исследовать механизм набора прочности цементного камня. Было установлено, что использование оптимальной рецептуры добавки (комбинация № 2) способствует значительному улучшению прочностных характеристик бетонной смеси, обеспечивая увеличение ее прочности в среднем на 38%, что подтверждено результатами испытаний методами как неразрушающего, так и разрушающего контроля. **Вывод.** Дозировка наноконпонентов для изготовления рекомендованной добавки на один кубический метр бетона составляет приблизительно 0,0141 от массы основного сырья, что подтверждает экономическую целесообразность ее применения. Кроме того, незначительное содержание наночастиц в составе добавки позволяет сохранить экологичность готового продукта, минимизируя воздействие на окружающую среду. Оптимальная дозировка наноконпонентов обеспечивает равномерное распределение частиц в структуре бетона, способствуя повышению его долговечности и устойчивости к внешним воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, ускорители твердения, комплексная нанодобавка, карбид кремния, флюат аммония, набор прочности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Логинова С.А., Таничев М.В., Гоглев И.Н. Исследование воздействия нанодобавок на физические и механические свойства цементных бетонов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):750–759. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-750-759>. – EDN: QSIZUY.

Influence of nanoadditives on the physical and mechanical performance of cement concrete

Svetlana A. Loginova^{1*} , Maxim V. Tanichev^{1,2} , Ilya N. Goglev² 

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

² Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo, Russia

* Corresponding author: e-mail: loginovasa@ystu.ru

ABSTRACT

Introduction. The influence of nanoadditives on the physical and me-chanical performance of cement concrete remains a relevant issue driven by the need for finding the most promising and cost-effective solutions to enhance performance during in situ concret-

© Логинова С.А., Таничев М.В., Гоглев И.Н., 2025

ing. This issue has been thoroughly examined by the authors in earlier publications. **Methods and Materials.** Two experimental formulations of a composite concrete nanoadditives were developed, based on ammonium hexafluorosilicate ($(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$) and silicon carbide (SiC). **Results.** In the first part of the study, concrete samples were tested after 28 days of hardening to assess mechanical strength properties. The kinetics of hardening and the influence of each of the specified additives on the concrete were studied. Discussion. The conducted studies allowed for the establishment of the optimal combination of nanoparticles included in the special additive, as well as a detailed investigation of the mechanism of strength gain in cement stone. It was found that the use of the best additive formulation (combination No. 2) significantly improved the strength characteristics of the concrete mix, providing an average strength increase of 38%, as confirmed through both destructive and non-destructive testing. **Conclusion.** The optimal dosage of nanocomponents for the production of the recommended additive per cubic meter of concrete is approximately 0.0141 of the mass of the main raw material, which confirms the economic feasibility of its application. In addition, low concentration of nanoparticles in the additive ensures environmental compatibility of the finished product, minimizing the impact on the environment. The optimal dosage of nanocomponents ensures the uniform distribution of particles in the concrete structure, contributing to an increase in its durability and resistance to environmental influences.

KEYWORDS: cement concrete, curing accelerators, complex nanoadditives, silicon carbide, ammonium hexafluorosilicate, compressive strength enhancement

FOR CITATION:

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;17(6):750–759. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-750-759>. – EDN: QSIZUY.

ВВЕДЕНИЕ

Цементные бетоны, изготавливающиеся на цементном вяжущем, широко применяются при выполнении монолитных бетонных конструкций благодаря своим эксплуатационным характеристикам [1, 2]. Монолитный железобетон востребован в строительстве объектов различного назначения и климатических зон, начиная от умеренной зоны Центральной Европы и заканчивая экстремальными условиями холодных районов Норвегии, Финляндии, Аляски и северных территорий России [3, 4].

Особенностью производства монолитных конструкций в регионах с низкими температурами воздуха является необходимость поддержания комфортных условий твердения бетона, поскольку от скорости достижения проектных прочностных характеристик зависят сроки дальнейших строительных мероприятий. Одним из важнейших требований является своевременный набор минимального показателя прочности – 70%, что обеспечивает возможность оперативного продолжения последующих этапов строительства.

На сегодняшний день имеется большое количество различных добавок в бетон, и их количество продолжает ежегодно возрастать [2–5]. Большинство из представленных на рынке добавок обладает как положительными, так и отрицательными эффектами по отношению к бетону. Для ускорения процессов гидратации цемента и повышения устойчивости конструкции в неблагоприятных условиях используются специальные химические добавки [5–7]. Среди них выделяют ускорители твердения, позволяющие сократить период схватывания и уве-

личить прочность на ранних этапах твердения бетона. Противоморозные добавки предотвращают разрушение кристаллических структур цементного камня при низких температурах окружающей среды, поддерживая процессы набора прочности при отрицательных температурах [8–10]. Антикоррозионные добавки способствуют защите стальной арматуры от воздействий агрессивных сред и влаги [11–13]. Антикоррозионные добавки играют ключевую роль в обеспечении долговечности железобетонных конструкций, защищая стальную арматуру от негативных воздействий окружающей среды, включая воздействие влаги и агрессивных веществ. Такие добавки создают защитный барьер на поверхности металла, предотвращая коррозионные процессы, возникающие вследствие проникновения воды, кислорода и химически активных соединений внутрь конструкции. Это особенно важно в условиях повышенной влажности, морской атмосферы, промышленной зоны или при эксплуатации сооружений в суровых климатических условиях. Эффективность антикоррозионных добавок проявляется в увеличении срока службы строительных конструкций, снижении затрат на ремонт и технического обслуживания зданий и сооружений, а также повышении надежности конструкций в целом [14, 15]. Применение современных технологий защиты армирования существенно повышает качество строительства и снижает риски разрушения несущих конструкций из-за коррозии арматуры внутри бетона.

Современная строительная практика постепенно смещается в сторону комплексного подхода к выбору добавок, предусматривающего сочетание сразу нескольких полезных свойств [16]. Такие комбинированные добавки позволяют одновременно улучшить



Рис. 1. Кристаллизация продуктов побочной реакции в порах бетона. Трещины внутри образца.

рованные добавки объединяют эффекты ускорения твердения, морозостойкости и антикоррозионной защиты, повышая эффективность строительного процесса и снижая материальные издержки. Но лишь только малая часть из этих добавок обладает незначительными негативными эффектами по отношению к твердеющему бетону или арматуре (например, вызывают образование и кристаллизацию продуктов побочных реакций в порах бетона) [17, 18]. Повышенная кристаллизация в порах бетона (рис. 1) может говорить о том, что помол исходных реагентов в добавке слишком большой, а следовательно, рекомендуется применять вещества и/или их смеси, для которых можно выполнить помол на микро- или наноуровне.

Нанодисперсные компоненты увеличивают площадь контакта фаз, улучшают однородность состава и усиливают межмолекулярные взаимодействия, что положительно сказывается на механических свойствах бетона и его сопротивляемости внешним воздействиям [19]. Вследствие вышеизложенного становится очевидным то, что создание перспективной комплексной добавки на основе микро- или наноизмельченных порошков является актуальной задачей исследования на данный момент, поскольку позволяет в целом понять влияние размера частиц добавок на характер твердения и степень набора прочности бетона.

Кроме того, включение нанодобавок влияет на формирование особой микрокристаллической структуры бетона, способствуя созданию композитов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Частицы малых размеров равномерно распределяются в объеме цементного теста, обеспечивая повышенную стабильность структуры и снижение внутренних напряжений, возникающих в процессе твердения. Все это ведет к повышению механической прочности, устойчивости к трещинообразованию и увеличению долговечности конечного продукта. Использование нанотехнологий открывает новые

перспективы для улучшения характеристик традиционных строительных материалов, позволяя создавать высокоэффективные композиции, обладающие уникальными физико-химическими свойствами.

Процесс набора прочности и повышения морозостойкости цементного камня обусловлен реакциями отдельных компонентов комплексных добавок с одним из ключевых элементов твердеющего бетона – свободным гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), который академик РААСН С.В. Федосов обозначил как основной фактор [20], влияющий на прочность материала.

Свободный гидроксид кальция образуется в результате гидратации цемента и присутствует в бетонной структуре в форме кристаллов кальцита. Комплексные добавки содержат компоненты, способные вступать в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образуя новые соединения, обладающие повышенной прочностью и стойкостью к внешним воздействиям [21, 22].

Кроме химического связывания, некоторые добавки способствуют ускоренной диффузии свободного гидроксида кальция из порового пространства, обеспечивая равномерное распределение продуктов гидратации и снижая концентрационные градиенты, что также положительно влияет на структуру и свойства затвердевшего бетона [23]. Помимо ускорения процесса гидратации и стабилизации структуры бетона, специальные химические соединения способны формировать дополнительные защитные слои вокруг металлической арматуры, увеличивая срок службы железобетона в агрессивных средах [24–26]. Примером таких добавок служат комплексы на основе органических кислот и фосфатных соединений, которые образуют защитную пленку на металле, ограничивая доступ влаги и кислородосодержащих газов. Еще одним важным аспектом является способность некоторых добавок регулировать скорость испарения свободной воды из бетона, поддерживая оптимальный уровень влажности на протяжении периода твердения [27]. Это предотвращает появление трещин и деформаций, вызванных быстрым высыханием, и создает условия для формирования высокопрочной и стабильной матрицы. Оптимальная влажность, в свою очередь, способствует эффективной гидратации цемента и достижению максимальной плотности структуры бетона.

Морозостойкость комплексных добавок может обеспечиваться способностью компонента образовывать кристаллогидраты с водой, снижая тем самым температуру ее кристаллизации в процессе затвердения и твердения бетона. Например, таким образом работает распространенная противоморозная добавка в бетон на основе формиата кальция ($\text{Ca}(\text{HCOO})_2$) [28].

Таким образом, комплексное воздействие реагентов позволяет значительно ускорить процесс твердения и повысить качество конечного продукта, делая возможным использование бетона в условиях повышенных нагрузок и экстремальных климатических условий.

Представленное в статье исследование было направлено на достижение конкретных целей и решение поставленных задач, исходя из имеющихся литературных данных [29–31].

Целью исследования стало проведение испытаний комплексного модификатора, включающего измельченные до наноразмеров реагентов карбида кремния и флюат аммония, предварительные испытания которого показали значительное увеличение прочности цементного камня (до 20%). Необходимо было оценить влияние добавки на показатели прочности и выявить потенциальные преимущества и недостатки ее использования.

Основная задача заключалась в научном обосновании эффективности разработанных составов путем анализа характеристик модифицированного бетона, расчета оптимального количества добавки на кубический метр смеси, а также сопоставления преимуществ и недостатков ее введения в бетонную смесь.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При выполнении экспериментов, включая изготовление контрольных образцов, взвешивание материалов и приготовление экспериментальных смесей, применялись следующие приборы:

- Ударно-импульсный прибор неразрушающего контроля марки «ОНИКС-2,5» производства

компании «Интерприбор» (сертификат госрегистрации СИ РФ №30252-10, заводской номер 887, акт поверки от 29 января 2025 г., рис. 2а);

- Испытательный пресс ПСУ-50 (рис. 2б);
- Диэлькометрический влагомер модели Testo 606-1, предназначенный для измерения влажности материалов (рис. 2в);
- Цифровая зеркальная камера Canon 1200D, обеспечивающая быструю фотосъемку;
- Ручной электрический вибратор марки Zitrek Z-35-1,5, используемый для уплотнения смеси;
- Электронные весы Mucheng 0,1-500, предназначенные для точного дозирования компонентов (точность измерений составляет от 0,1 до 500 граммов).

Порядок проведения исследования был разделен на теоретическую и практическую части.

По результатам теоретических исследований составлены были таблицы сочетаний различных компонентов добавки (табл. 1–2).

Для оценки прочности бетона применялся метод ударного импульса согласно стандарту ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля». Данный метод основан на взаимосвязи между прочностными характеристиками бетона и энергией удара (включая ее изменения), возникающими в процессе контакта специального инструмента с датчиком с бетонной поверхностью. Также прочность бетона определялась путем испытания образцов кубической формы на сжатие с использованием пресса ПСУ-50.

Бетонная смесь в ходе замешивания уплотнялась с помощью ручного электрического вибратора. Для проведения испытания неразрушающего контроля

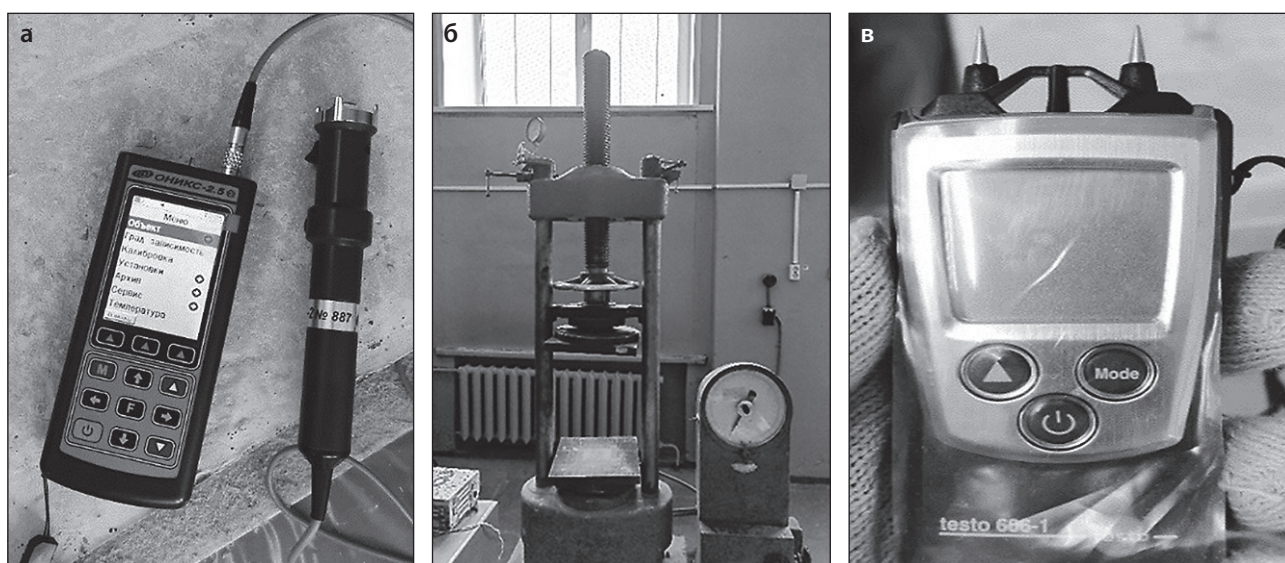


Рис. 2. а) Прибор неразрушающего контроля ударно-импульсный ОНИКС-2,5; б) Испытательный пресс ПСУ-50; в) Влагомер диэлькометрический Testo 606-1

Таблица 1. Комбинация сочетаний № 1 отдельных компонентов добавки

Реагент и/или компонент	Количество, %
Дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72), компонент X1	1) 24,4
	2) 24,1
	3) 23,2
	4) 21,7
Карбид кремния (SiC) нанопорошок, компонент X2	1) 2,2
	2) 3,6
	3) 7
	4) 13
Портландцемент марки М500Д0	1) 73,4
	2) 72,3
	3) 69,8
	4) 65,3

были изготовлены образцы размерами 30×30×30 мм (рис. 3) из цементного раствора оптимальной консистенции (ориентировочно В/Ц = 0,3). Цементный раствор готовился путем перемешивания портландцемента марки М500Д0 (рис. 4а) с раствором добавок (либо отдельных компонентов, рис. 4б), далее образцы отправлялись на хранение в камеру влажного твердения при нормальном атмосферном давлении и относительной влажности воздуха 99–100%.

Всего было изготовлено 150 контрольных образцов (без добавления примесей) и образцов с разными комбинациями составов (50 штук каждого типа: X1, X1+X2, X1+X4). По истечении установленных сроков твердения проводилось испытание на предел прочности на сжатие методом ударного импульса и путем испытания образцов на прессе.

Дополнительно измеряли влажность образцов с помощью портативного влагомера. Средняя влажность бетона образцов на период испытаний составила 1,6%. После проведения замешивания выявлено, что у сочетания № 2 происходил нагрев бетонной смеси от 23 до 42 °С, что позволяет теоретически

Таблица 2. Комбинация сочетаний № 2 отдельных компонентов добавки

Реагент и/или компонент	Количество, %
Дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72), компонент X1	1) 28,5
	2) 28,47
	3) 28,4
	4) 28,2
	5) 28,0
	6) 27,8
	7) 27,6
	8) 27,4
Гексафторсиликат (флюат) аммония ((NH ₄) ₂ [SiF ₆]) нанопорошок, компонент X4	1) 0,18
	2) 0,36
	3) 0,71
	4) 1,41
	5) 2,1
	6) 2,78
	7) 3,45
	8) 4,11
Портландцемент марки М500Д0	1) 71,32
	2) 71,17
	3) 70,89
	4) 70,39
	5) 69,9
	6) 69,42
	7) 68,95
	8) 68,49

использовать указанный компонент для зимнего бетонирования. Смесь постепенно остывала в течение 45 минут ÷ 1 часа.

Полученные данные усреднялись и заносились в таблицы результатов, на основании чего строились графики кинетики твердения цементного камня.

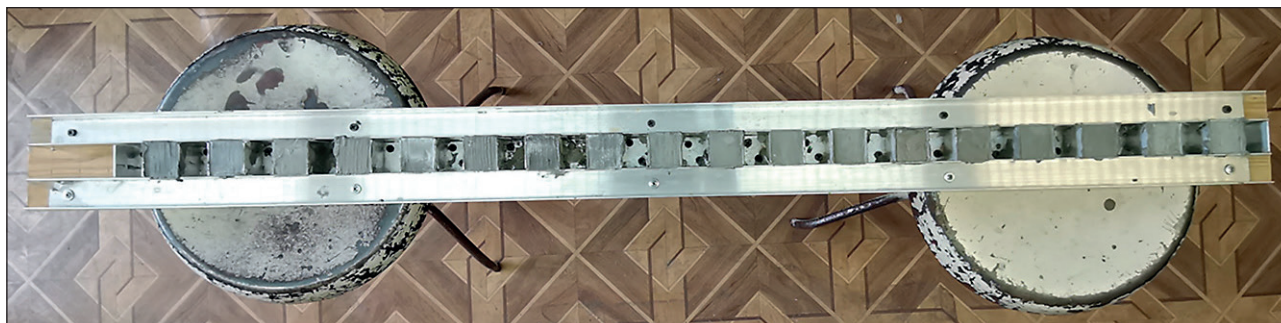


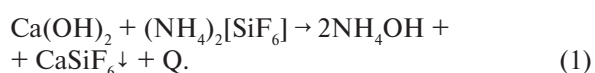
Рис. 3. Общий вид испытываемых образцов для неразрушающего контроля



Рис. 4. а) Взвешивание портландцемента на электронных весах; б) Пример одного из компонентов добавки (нанопорошок карбида кремния (SiC))

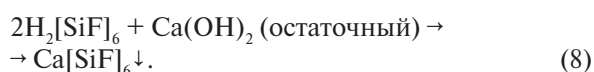
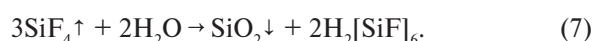
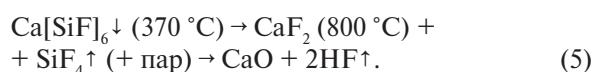
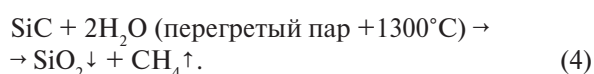
РЕЗУЛЬТАТЫ

Принцип действия отдельных компонентов предложенной добавки основан на способности связывать свободный гидроксид кальция, присутствующий в бетоне ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [32, 33] кремнефторид-ионами с образованием малорастворимого кремнефтористого кальция (CaSiF_6) по прямой реакции (1):



Следует отметить, что, поскольку флюаты являются, по сути, комплексными соединениями, в которых 2 молекулы плавиковой кислоты (HF) присоединяются посредством водородной связи к молекуле тетрафторида кремния (SiF_4), то в реакции наблюдается выделение тепла, поскольку оксид и гидроксид кальция всегда реагируют с раствором фтороводорода с выделением тепла.

Известно, что отдельные компоненты добавки повышают растворимость частиц цемента в водно-солевом растворе, увеличивая содержание продуктов гидратации в нем. Гексафторсиликат кальция, образующийся в результате этого процесса, находится в нанодисперсном состоянии [22, 32]. Благодаря этому обеспечивается быстрое сцепление цементных зерен друг с другом, что ускоряет твердение материала и повышает скорость набора прочности.



Образующийся аммиак (NH_3) в системе улетучивается при введении добавки и затворения водой портландцемента. Поэтому при введении указанной нанодобавки в бетон в первые минуты затворения водой ощущается стойкий запах аммиака.

Карбид кремния в отличие от флюата аммония не участвует в прямой реакции (2) с продуктами гидратации портландцемента (для этого требуется высокая температура, сильная щелочь, а также присутствие кислорода в системе), а выступает в роли микро- и нанодисперсных частиц, которые могут «заполнять» поры срастающегося цементного камня. Теоретически, благодаря введению карбида кремния, может возрасти твердость цементного камня, однако этот вопрос до конца еще не изучен в отрасли. Также одним из возможных эффектов введения микро- или

наночастиц карбида кремния в бетон может являться повышение его огнеупорности (карбид кремния подвергается разложению перегретым паром, начиная от температуры от +1300 °С), а также как «уловитель» неорганических фторидов (т.е. других возможных компонентов добавки в системе) при испытаниях бетона в зонах высоких температур, для связывания фтористых компонентов в системе (см. реакции 4–8). По тематике проводимого исследования было изучено большое количество отечественных и зарубежных источников [5–21].

Обработка информации после проведения неразрушающего контроля проводилась в программном комплексе Microsoft Excel. Точность измерения обеспечивалась постоянным усреднением значений

фактической прочности на сжатие для каждой серии образцов.

По средним полученным результатам значения прочности, полученным ударно-импульсным методом, построены графики сравнительной кинетики твердения бетонных образцов с предлагаемыми компонентами (сочетаниями №№ 1–2) добавки и обычных бетонных (контрольных) образцов в период с 3÷28 суток (рис. 5–6).

По итогам проведенных исследований, установлено, что средняя скорость набора прочности образцов с применением добавки комбинации № 1 сопоставима с показателями контрольных образцов. Полученные экспериментальные данные убедительно демонстрируют, что комбинация № 2 сре-

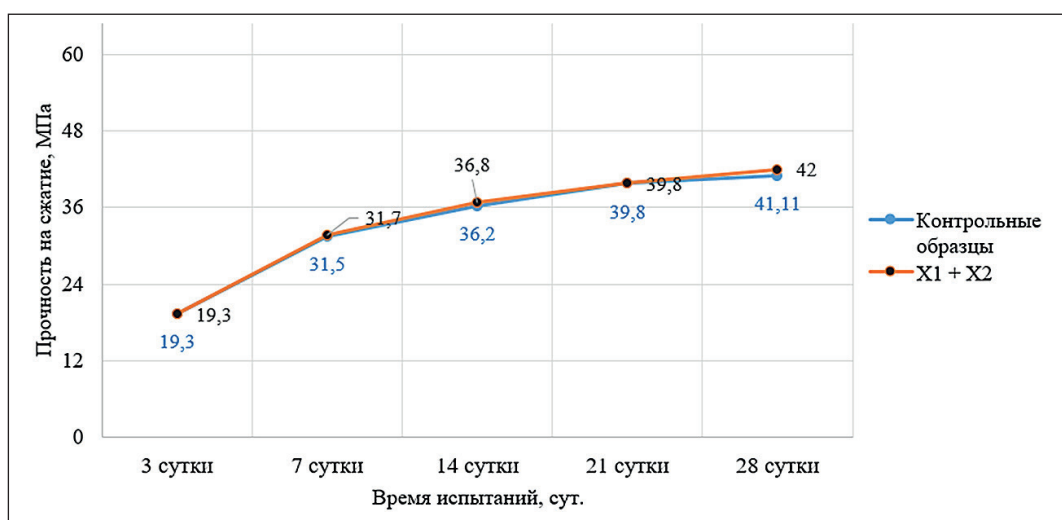


Рис. 5. График максимальных показателей кинетики твердения цементного камня по данным неразрушающего ударно-импульсного контроля для сочетания № 1 (X1+X2)

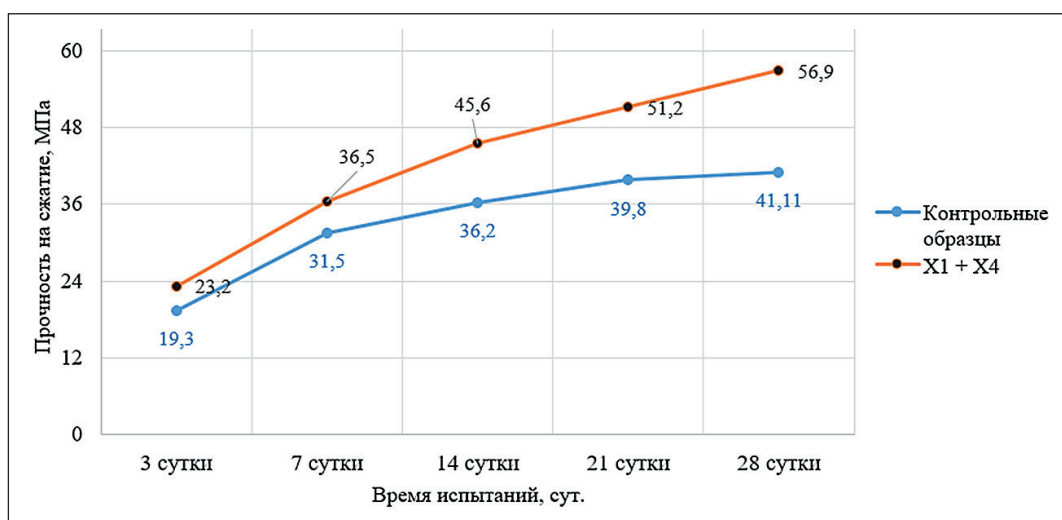


Рис. 6. График максимальных показателей кинетики твердения цементного камня по данным неразрушающего ударно-импульсного контроля для сочетания № 3 (X1+X4)

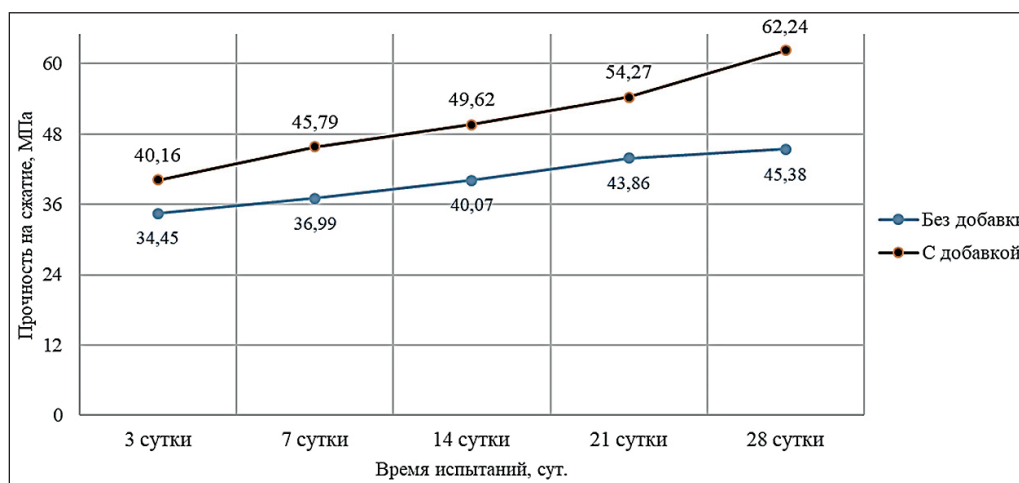


Рис. 7. Кинетика твердения цементного камня с добавкой комбинации № 2 по данным разрушающего контроля

ди предложенных комплексных добавок наиболее эффективно ускоряет процесс набора прочности цементного камня как на ранних этапах твердения (до 14 суток), так и на поздних стадиях (до 28 суток). В связи с этим образцы, изготовленные с применением добавки комбинации № 2, были испытаны на сжатие разрушающим контролем (рис. 7).

Анализ обработанных данных позволил определить закономерности изменения прочности цементного камня в течение различных этапов твердения. Графическое представление результатов дало наглядное понимание динамики роста прочности и выявило критические периоды, когда интенсивность набора прочности была наибольшей или наименьшей. Это позволило оптимизировать режимы хранения и ухода за образцами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Графики кинетики твердения послужили основой для дальнейшей оптимизации рецептуры бетонных смесей. Они подтвердили гипотезу о положительном воздействии исследуемых добавок на ускорение процесса гидратации и улучшение качества цементного камня. Подобные исследования важны для развития инновационных подходов в строительной индустрии и повышения конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке.

Экспериментальные данные подтверждают увеличение прочности цементного камня более чем на 30%, независимо от используемого метода контроля: как при неразрушающем контроле, так и при прямом (разрушающем) тестировании для добавки комбинации № 2. Анализируя динамику нарастания прочности цементного камня в интервале от 3-х до 28 суток, получены средние значения прироста прочности при применении предложен-

ной добавки: данные неразрушающего контроля показали повышение прочности на 38,57%; согласно разрушающему контролю, этот показатель составил 37,15%.

Путем испытаний также было установлено, что норма ввода добавки на 1 м³ бетона составляет примерно 0,01–0,011 от общей массы бетона. Расчет экономических показателей (технико-экономической эффективности) произведенной добавки не требуется ввиду незначительности указанных расходов.

Теоретический и экспериментальный анализ демонстрирует основные характеристики предлагаемой добавки, представляющей собой смесь нанопорошков фторборатов и флюатов. Ее высокая эффективность в совокупности с минимально необходимым количеством делают данную разработку перспективной для дальнейшего изучения и внедрения в промышленное производство. Дополнительным преимуществом предлагаемой добавки является ее универсальность. Она совместима с большинством типов цементов и способна адаптироваться к условиям различных климатических зон, что расширяет область ее применения. Возможность варьировать дозировку в зависимости от конкретных требований позволит добиться высоких результатов даже в сложных производственных ситуациях.

ВЫВОД

В результате проведенных исследований были достигнуты все поставленные цели и решены соответствующие задачи, позволившие выявить оптимальное соотношение наноразмерных компонентов добавки, а также изучить кинетику твердения цементного камня.

Согласно полученным данным, применение оптимального состава (комбинация № 2) обеспечивает

средний прирост прочности бетона порядка 38% при измерениях методом неразрушающего и разрушающего контроля. Используемое количество нанокomпонентов для приготовления рекомендуемой добавки на каждый кубометр бетона составляет около 0,0141 от общего веса исходного материала.

Собранные теоретические и экспериментальные доказательства эффективности разработанной комплексной добавки на основе смеси нанопорошков карбида кремния и флюата аммония позволяют

предварительно заключить о значительных преимуществах данной разработки.

Внедрение новых композитных материалов на основе нанопорошков позволит российским строительным компаниям выйти на новый технологический уровень, конкурируя с зарубежными аналогами. Данная разработка имеет значительные перспективы как в сфере гражданского строительства, так и в инфраструктурных проектах, таких как строительство мостов, дорог и промышленных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рогожина М.И., Мищерина Е.Ю., Лapidус А.А. Основные аспекты технологии тяжелого бетона для возведения монолитных конструкций. *Технология и организация строительного производства*. 2018;2:14-17.
2. Енджиевская И.Г., Демина А.В., Енджиевский А.С., Дубровская С.Д. Оценка взаимодействия добавок в бетоне. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022;24(3):128-137. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2022-24-3-128-137>
3. Ксенофонтова Т.К., Смолоногова В.С. К вопросу проектирования зданий из монолитного железобетона на шельфе крупных водоемов. *Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию*. 2020;18:42-47.
4. Забавина В.В. Проектирование конструкций из монолитного железобетона при изменении функционального назначения здания. *Академическая публицистика*. 2017;11:16-22.
5. Юхневский П.И. К вопросу о допустимом содержании ионов аммония в химических добавках для бетонов. *Наука и техника*. 2021;5(20):420-426. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-420-426>
6. Аларханова З.З. Химические добавки для бетонов и растворов: номенклатура, классификация, основной эффект действия. *Вестник КНИИ РАН. Серия: Естественные и технические науки*. 2022;1(9):31-39. <https://doi.org/10.34824/VKNIIRAN.2022.9.1.003>
7. Мамытов С.М., Сарбаева Н.М. Влияние химических добавок на свойства бетона. *Наука и инновационные технологии*. 2023;1(26):172-177. <https://doi.org/10.33942/sit042262>
8. Курников Т.Д., Глехусеж М.А. Химические добавки и их влияние на свойства бетона. *Тенденции развития науки и образования*. 2023;104-11:139-141. <https://doi.org/10.18411/trnio-12-2023-629>
9. Курылев В.С., Тимохин Д.К. Модифицированные противоморозные добавки и их влияние на характеристики бетона. *Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона*. 2017;8:128-134.
10. Тараканов О.В., Ильина Л.В., Гичко Н.О. Влияние отрицательных температур на микроструктуру, кинетику твердения и прочность цементных материалов. *Региональная архитектура и строительство*. 2024;4(61):63-72. https://doi.org/10.54734/20722958_2024_4_63
11. Талипов Л.Н., Величко Е.Г., Семенов В.С. Исследование синергетического эффекта комплексной антикоррозионной добавки на основе поликарбоксилатов в модели поровой жидкости бетона. *Вестник МГСУ*. 2020;6(15):824-833. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.6.824-833>
12. Козадеров О.А., Шевцов Д.С., Потапов М.А., Зарцын И.Д., Грушевская С.Н., Кружилин А.А., Ильина Е.А., Ткаченко К.А., Шихалиев Х.С. Оценка ингибирующего действия некоторых производных солей длинноцепочечных карбоновых кислот по отношению к питтинговой коррозии арматурной стали в бетоне. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;3(25):445-453. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11396>
13. Konovalova V. Influence of chloride-containing media on the protective properties of concrete. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 95:260-265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54652-6_39
14. Konovalova V.S., Romyantseva V.E., Strokin K.B., Galtsev A.A., Novikov D.G., Monastayev P.V. Degradation of concrete cement stone under the influence of aspergillus niger fungi. *Corrosion and Materials Degradation*. 2024; 4(5):476-489. <https://doi.org/10.3390/cmd5040022>
15. Полонина Е.Н. Технология бетона, модифицированного комплексной добавкой гидротермального нанокремнезема и многослойных углеродных нанотрубок. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021;2(125):27-34. <https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-125-2-27-34>
16. Зимакова Г.А., Солонина В.А., Зелиг М.П. Высокоэффективные бетоны с применением комплексных добавок и местных сырьевых ресурсов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2021;1:38-46.
17. Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Ползучесть мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой. *Химия, физика и механика материалов*. 2022;1(32):62-75.
18. Малюк В.В. Концепция модели морозного воздействия на бетон морских сооружений. *Строительство и реконструкция*. 2024;1(111):78-87. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-111-1-78-87>
19. Травуш В.И., Кузеванов Д.В., Каприелов С.С., Волков Ю.С. Бетон как экологический фактор снижения углеродного следа в среде обитания. *Бетон и железобетон*. 2022;3(611):10-14. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-611-3-10-14>

20. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Loginova S.A., Goglev I.N. Experimental research of the process bio-corrosion of cement concrete for inspection of building structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021;147:168-175. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_25
21. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A. Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of “free calcium hydroxide” during corrosion of cement concretes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018;3(14):161-168. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-3-161-168>
22. Федосов С.В., Александрова О.В., Нгуен Д.В.К., Федосеев В.Н., Логинова С.А. Физико-математическое обоснование теоретических и инженерных изысканий по разработке коррозионностойких материалов для заглубленных сооружений прибрежных зон. *Техника и технология силикатов*. 2022;1(29):45-54.
23. Ho V.H., Ngo V.M., Vu V.T. Bond strength of a steel bar in concrete reinforcing with shape memory alloy fibers. *Science Journal of Transportation*. 2024;3(19):44-57.
24. Krishan A.L., Narkevich M.Yu., Sagadatov A.I., Rimshin V.I. Investigation of the influence of post-alcohol distillers’ grains on the strength of concrete used in a two-component modified additive. *Механика и технологии*. 2024;3(85):188-200. <https://doi.org/10.55956/ZSWL8979>
25. Соколов П.Э. Результаты исследования влияния комплексной добавки на скорость набора прочности и прочность мелкозернистого бетона. *Вестник еurasийской науки*. 2024;2(16):15-21.
26. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Бондарев Б.А., Бондарев А.Б. Циклическая прочность бетонов нового поколения. *Строительные материалы*. 2020;1-2:88-94. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-88-94>
27. Пшеничный Г.Н. Сбросы прочности цементных бетонов и их практическая значимость. *Технологии бетонов*. 2020;5-6(166-167):51-59.
28. Булгаков А.Г., Ерофеева И.В., Иштуин А.А., Афонин В.В., Моисеев В.В. Прочность на растяжение при изгибе бетонов нового поколения. Эксперт: теория и практика. 2022;2(17):21-27. https://doi.org/10.51608/26867818_2022_2_21
29. Димитриев В.С. Контроль прочности бетона при отрицательных температурах с применением комплексных добавок к бетонной смеси. *Вестник науки*. 2025;5(86):1707-1713.
30. Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Гальцев А.А., Строкин К.Б., Нармания Б.Е. Прочность и трещиностойкость бетона с добавкой на основе стеарата кальция. Современные проблемы гражданской защиты. 2024;3(52):71-82.
31. Вишторский Е.М., Белов И.В., Ткачев А.А. Экспериментально-статистическая модель изменения прочности гидротехнических бетонов при использовании комплексных модифицирующих добавок. *Современное строительство и архитектура*. 2025;6(61). <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.2>
32. Чернышов Е.М., Федосов С.В., Румянцева В.Е. Развитие методов прогнозирования долговечности строительных конструкций на основе разработки теории и моделей коррозии бетонов с учетом явлений тепломассопереноса и формирования градиентных состояний. *Academia. Архитектура и строительство*. 2023;1:89-100. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2023-1-89-100>
33. Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И.С., Зайцева И.А. Инструменты реализации информационного моделирования жизненного цикла объектов строительства: отечественный и зарубежный опыт. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023;2(74):101-104. <https://doi.org/10.6060/snt.20237402.00011>

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Логинова Светлана Андреевна – кандидат технических наук, доцент Института инженеров строительства и транспорта, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, loginovasa@ystu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>

Таничев Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент Института инженеров строительства и транспорта, Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия; доцент кафедры транспорта и автомобильных дорог, Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия, maxt_ivanovo@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4421-3692>

Гogleв Илья Николаевич – соискатель, Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия, azidplumbum00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4956-323X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Логинова С.А. – разработка концепции и методологии исследования; анализ результатов исследования.

Таничев М.В. – обработка данных, подготовка статьи к публикации.

Гogleв И.Н. – литературный обзор; проведение эксперимента.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.10.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 04.12.2025