

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24

***Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: kuzmin9731@mail.ru

ПРОГНОЗИРУЕМАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ДОБАВКОЙ НАНОДИСПЕРСНОГО КРЕМНЕЗЕМА

Аннотация. Исследование направлено на оценку влияния наночастиц кремнезема в качестве добавок в цементные системы на их механические свойства и прогнозируемую прочность в отдаленный период. Использование наночастиц кремнезема (SiO_2) характеризуется их высокой удельной поверхностной площадью, значительной реакционной способностью и потенциалом улучшения структурных параметров цементного камня. Интеграция этих наночастиц в цементный камень вызывает изменение его физико-химических свойств, что в конечном итоге сказывается на прочностных и долговечных характеристиках материала. Наночастицы SiO_2 заполняют поровое пространство и микротрещины в цементном камне, что приводит к более плотной структуре. Они способствуют более глубокой гидратации цемента, ускоряя реакцию образования гидратных фаз, таких как C-S-H (кальций-силикат-гидрат), которые являются основными составляющими, придающими цементному камню прочность. Данные показывают, что добавки наночастиц кремнезема приводят к уменьшению коэффициента торможения и увеличению коэффициента гидратации цемента. Прогнозируемая прочность всех исследуемых составов достигает максимальных значений к 400 суткам, с наибольшей интенсивностью процессов в первые 50 суток. Добавка нанодисперсного кремнезема обеспечивает рост прочности цементного камня на 29 %. Повышенный коэффициент гидратации свидетельствует о более интенсивных взаимодействиях между компонентами цемента и водой, что способствует образованию более прочной и долговечной структуры материала. Результаты указывают на потенциальное применение наночастиц кремнезема для улучшения механических свойств цементных систем и повышения эффективности конструкций.

Ключевые слова: наночастицы кремнезема, цементная система, механические свойства, прочность, коэффициент гидратации, прогнозирование

Введение. Бетон играет ключевую роль в современном строительстве. Непрерывное стремление к улучшению его механических свойств стимулирует поиск новых добавок и улучшенных технологий производства [1, 2]. Одним из перспективных направлений в этой области является использование наноматериалов, включая наночастицы кремнезема, как добавок к цементным системам. Наночастицы кремнезема (НК) обладают уникальными характеристиками, такими как большая поверхностная площадь и высокая активность, что делает их привлекательными для применения в строительной промышленности [2–4]. Несмотря на достаточную изученность влияния наночастиц кремнезема на особенности твердения цемента и прочность цементного камня, вопросы оценки прочности (в том числе, прогнозируемой) в отдаленный период все еще остаются открытыми.

Наночастицы кремнезема (SiO_2) обладают высокой удельной поверхностной площадью, большой реакционной способностью и способностью улучшать структурные параметры цементного камня. Добавление этих наночастиц в цементный камень изменяет его физико-химические свойства, что, в конечном итоге, влияет на прочность и долговечность материала. Одним из главных эффектов добавления наночастиц

кремнезема является улучшение прочности на сжатие цементного камня [5–8]. Это связано с несколькими факторами. Во-первых, наночастицы SiO_2 заполняют поровое пространство и микротрещины в цементном камне, что приводит к более плотной структуре. Во-вторых, они способствуют более глубокой гидратации цемента, ускоряя реакцию образования гидратных фаз, таких как C-S-H (кальций-силикат-гидрат), которые являются основными составляющими, придающими цементному камню прочность [8, 9]. Более плотная и равномерная микроструктура приводит к увеличению прочности на сжатие, что позволяет использовать цементные материалы в более ответственных и нагружаемых конструкциях. Еще одним значимым аспектом является улучшение долговечности цементного камня с добавлением наночастиц кремнезема. Эти частицы могут действовать как ингибиторы для транспорта ионов в цементную матрицу, блокируя или замедляя механизмы коррозии, такие как проникновение хлоридов или углекислого газа [10–13]. Это особенно важно для бетонов, эксплуатируемых в агрессивных средах, где существующие методы защиты (например, использование суперпластификаторов и антикоррозионных добавок) могут быть не столь эффективны.

Влияние наночастиц кремнезема на реологические свойства цементного камня также заслуживает внимания. Введение этих наночастиц может несколько затруднить процесс помола и укладки цементной смеси из-за повышения вязкости. Однако, это может быть компенсировано использованием суперпластификаторов и других химических добавок, которые помогают поддерживать необходимую консистенцию и удобоукладываемость.

Важно отметить, что конечные свойства нанодисперсного кремнезема, а, следовательно, и его эффективность как добавки к бетонным смесям, напрямую зависят от способа и особенностей его синтеза. Авторами ранее предложен способ получения нанокремнезема, обеспечивающий высокую дисперсность сухого порошка (15–30 нм) и повышенную активность благодаря за счет брэнстедовских центров [14].

Целью данного исследования является оценка эффективности использования наночастиц кремнезема, синтезированного при помощи золь-гель технологии с использованием поверхностно-активного вещества (ПАВ) Span83 в цементных системах с точки зрения их механических свойств и прочности в перспективе. В рамках исследования будет проанализировано влияние наночастиц кремнезема на коэффициент торможения и коэффициент гидратации цемента, а также проведен прогноз прочности в отдаленный период.

Материалы и методы. Оценку влияния наночастиц кремнезема на свойства цементного камня с их применением осуществляли по данным кинетики набора и расчёта прогнозируемой прочности цементного камня [15].

Для оценки кинетики набора прочности формировались образцы-кубы с размером ребра 2 см. Исследовались две серии образцов: контрольного (бездобавочного) цементного камня и цементного камня с добавкой синтезированного нанокремнезема. Нанокремнезем вводили в количестве 1,5 % от массы цемента. Выбор дозировки обеспечен предварительными исследованиями, доказывающими эффективность добавки в части повышения прочности. Предварительно производилось перемешивание сухих компонентов с последующим добавлением воды. Формование образцов производилось при водотвердом отношении, равном 0,4. Полученные образцы твердели в нормальных условиях. Далее образцы испытывались на сжатие после 1, 3, 7, 14, 28 суток твердения.

Расчет прогнозируемой прочности материала в отдаленный период производился на основании данных по кинетике набора прочности по методике, разработанной Ш.М. Рахимбаевым

[15]. Методика основана на применении математических зависимостей при анализе данных о кинетике набора прочности и определении с их помощью начальной скорости (U_0), коэффициента торможения ($k_{\text{тор}}$) и коэффициента корреляции ($k_{\text{кор}}$) процессов гидратации.

В рамках данной работы были использованы известные уравнения переноса и выявлены рациональные области применения этих уравнений. Известно, что для целого ряда процессов, происходящих при производстве и эксплуатации строительных материалов, изделий и конструкций, кривые их кинетики можно аппроксимировать при помощи уравнений, являющихся частными случаями:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_1 \sigma \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_2 \tau \quad (2)$$

где τ – время твердения (гидратации), сут; σ – предел прочности при сжатии, МПа; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа; k_1 и k_2 – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации).

В данных уравнениях учтены следующие положения: потенциальная реакционная способность системы задает начальную, максимальную для исследуемой системы в заданных условиях, скорость процесса U_0 . С течением времени скорость процесса снижается, стремясь к нулю.

При расчете по уравнениям (1) и (2) выбор коэффициентов для дальнейшей работы осуществляется исходя из того, что начальная скорость процесса U_0 должна быть больше нуля, коэффициент торможения $k_{\text{тор}}$ – минимальным, а коэффициент корреляции $k_{\text{кор}}$ – максимальным.

Прогнозная прочность составов рассчитывалась по уравнению (3):

$$\sigma_{28} = \frac{\tau \cdot U_0}{1 + \tau \cdot U_0 \cdot k_{\text{тор}}} \quad (3)$$

где τ – срок жизни материала, сут; U_0 – начальная скорость процесса; $k_{\text{тор}}$ – коэффициент торможения.

Основная часть. Анализируя зависимости предела прочности при сжатии от состава цементного камня, можно сделать вывод о существенном влиянии присутствия наночастиц кремнезема на процессы структурообразования цементного камня при твердении (рис. 1).

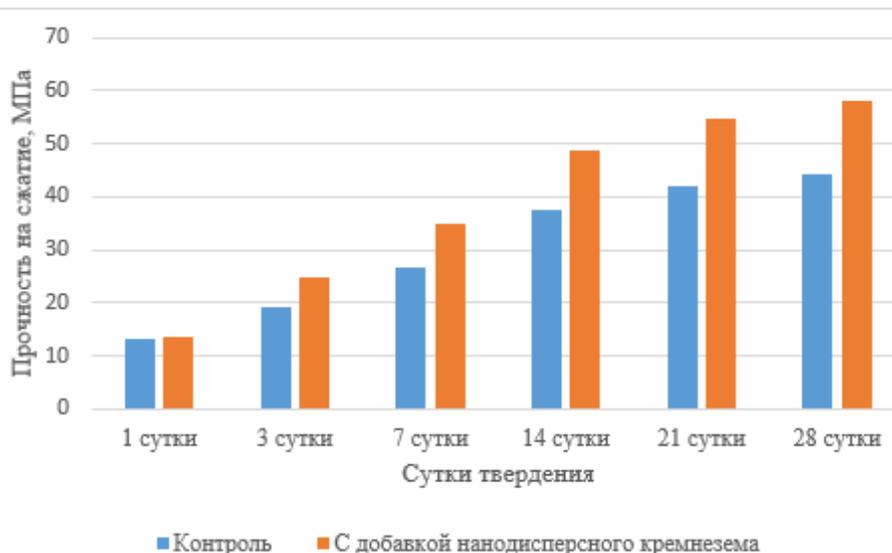


Рис. 1. Кинетика набора прочности на сжатие цементного камня в зависимости от состава

Сравнительный анализ изменений прочности контрольных (бездобавочных) образцов и с добавкой нанокремнезема (НК) на сжатие в течение 28 суток позволяет выявить влияние добавки НК на кинетику набора прочности бетона. На ранних стадиях твердения, в возрасте 1 суток прочность как образца контроля, так и образца с добавкой НК близка и составляет 13,09 МПа и 13,49 МПа соответственно. Это говорит о том, что добавка НК не оказывает существенного влияния на начальную прочность бетона. Однако, уже на 7 суток разница в прочности становится заметной. Образец с добавкой НК демонстрирует более высокую прочность – 34,89 МПа против 26,84 МПа у образца контроля. Это свидетельствует о положительном влиянии НК на набор прочности на более поздних стадиях твердения. В период с 7 до 14 суток темпы набора прочности у обоих образцов замедляются, но образец с добавкой НК по-прежнему имеет более высокую прочность: разница составляет 29,8 % (48,93 МПа против 37,69 МПа). Это указывает на то, что добавка НК способствует более интенсивному формированию прочной структуры бетона.

Между 14 и 21 сутками разрыв в прочности между образцами контроля и с добавкой НК сохраняется, и образец с добавкой НК достигает прочности 54,87 МПа, в то время как прочность образца контроля составляет 42,21 МПа. На заключительном этапе наблюдения, с 21 до 28 суток, прочность обоих образцов продолжает увеличиваться, но темпы роста замедляются. Образец с добавкой НК демонстрирует более высокий конечный результат – 57,95 МПа против 44,24 МПа у образца контроля.

В результате можно сделать вывод о том, что контрольный образец подвержен значительным флуктуациям в прочности, тогда как образец с добавлением наночастиц кремнезема, проявляет

более плавные изменения, с устойчивым ростом прочности по мере увеличения времени твердения.

В результате расчета установлено, что кинетика твердения лучше описывается уравнением теории переноса (2), так как имеет наибольший коэффициент корреляции и начальная скорость U_0 больше нуля (таблица 1). При расчете по уравнению (1) значения начальной скорости процесса меньше нуля, коэффициенты корреляции ниже. Для всех исследуемых составов отмечается высокий коэффициент корреляции, что говорит о воспроизводимости эксперимента и достоверности полученных данных и зависимостей.

Таблица 1

Результаты расчета по уравнению теории переноса

Состав	Значения энергетических констант при расчете		
	U_0	k_{tor}	k_{kor}
Контроль	14,89	0,0209	0,9831
С добавкой НК	18,72	0,0158	0,9864

Согласно полученным данным, применение в качестве добавок наночастиц кремнезема приводит к уменьшению коэффициента торможения и увеличению коэффициента гидратации цементной системы.

Для проверки прогнозируемой прочности составов полученные кинетические константы подставляются в уравнение (3). В таблице 2 представлены расчетные и экспериментальные значения прочности исследуемых составов на 28 суток твердения: отклонение до 3 % говорит о достоверности результатов.

Таблица 2
Расчетные прочности составов в возрасте 28 суток

Состав	$\sigma_{расч}$, МПа	$\sigma_{эксперим}$, МПа	Отклонение Δ , МПа	Отклонение Δ , %
Контроль	42,92	44,24	-1,32	2,55
С добавкой НК	56,47	57,95	-1,48	2,98

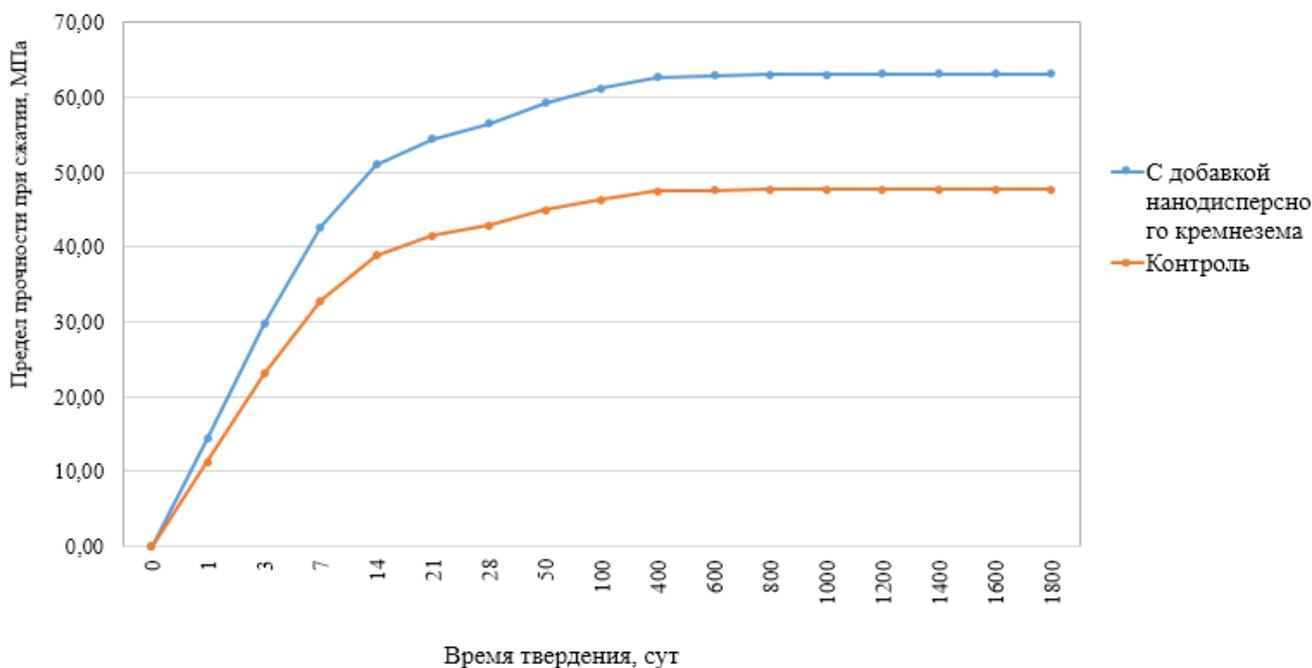


Рис 2. Расчетная кинетика набора прочности цементного камня в зависимости от состава

Сразу заметен значительный рост прочности вяжущего материала с добавлением наночастиц кремнезема по сравнению с контрольной смесью. На начальном этапе, в течение первых суток, оба материала набирают прочность сравнительно быстро. На контрольном графике наблюдается формирование прочности до 10 МПа, в то время как смесь с наночастицами кремнезема увеличивает прочность до более 15 МПа. В течение первых трех суток оба материала продолжают набор прочности, достигая значений около 25 МПа для Контроля и около 35 МПа для образца с добавкой НК. На этом этапе уже можно отметить, что добавление наночастиц кремнезема существенно увеличивает скорость набора прочности. По прошествии семи суток контрольный образец достигает прочности около 30 МПа, тогда как образец с наночастицами кремнезема превышает 40 МПа, показывая значительное превосходство в показателях. В течение следующих 14 и 21 суток тренд сохраняется: контрольный материал постепенно набирает прочность и достигает примерно 35 МПа на 21 сутки, а материал с наночастицами кремнезема набирает значительно больше—порядка 50 МПа.

Как следует из результатов расчета прогнозируемой прочности в отдаленный период (рис. 2), для всех исследуемых составов к 400 суткам набора прочности достигаются максимальные значения.

Наибольшая интенсивность процессов отмечается в первые 50 суток (рис. 2).

Таким образом, график четко демонстрирует, что на стадии раннего твердения наночастицы кремнезема значительно ускоряют процесс набора прочности. В промежуток между 28 и 100 сутками для обоих образцов происходит продолжение набора прочности, причем в значительно более медленном темпе по сравнению с начальным этапом. На 28 сутки прочность контрольного образца приближается к 40 МПа, в то время как у образца с наночастицами кремнезема прочность уже достигает 55 МПа. На 100 сутки прочность контрольного образца стабилизируется около отметки 45 МПа; материал с наночастицами кремнезема достигает прочности около 60 МПа. В дальнейшем, вплоть до 1800 суток, график демонстрирует замедление набора прочности для обоих образцов. Контрольный состав продолжает медленно набирать прочность, достигая максимума близко к 50 МПа к 1800 суткам. Материал с наночастицами кремнезема практически не изменяет свою прочность после 100 суток, оставаясь на уровне около 60 МПа. Таким образом, весь график показывает значительное преимущество в скорости и величине набора прочности для цементного камня с добавлением

наночастиц кремнезема на всех стадиях твердения, особенно в ранние сроки. Эти данные указывают на высокую эффективность применения наночастиц кремнезема для улучшения механических характеристик цементных композитов, что, в свою очередь, может существенно повысить их эксплуатационные характеристики и долговечность.

Начальные стадии набора прочности характеризуются внезапным и быстрым ростом прочностных характеристик. В первый день после закладки образец достигает прочности около 10 МПа. Этот резкий рост можно объяснить активными процессами гидратации цементных частиц, которые происходят в начальные часы и сутки после замешивания цемента с водой. В течение первых трех суток можно наблюдать продолжение интенсивного набора прочности. На третий день материал набирает прочность до примерно 25 МПа. В этот период гидратационные процессы еще быстры, происходящие реакции между цементом и водой способствуют образованию продуктов гидратации, таких как гель гидросиликата кальция, который заполняет поры и способствует увеличению прочности. В течение следующих четырех суток, до семи суток, график демонстрирует продолжение роста прочности, однако процесс несколько замедляется по сравнению с первым трёхдневным этапом. На седьмой день прочность контрольного цементного камня достигает уже около 30 МПа. Это показывает, что реакционные процессы стабилизируются, и, хотя они продолжаются, их интенсивность уже не так высока, как в первые дни. Дальнейший рост прочности продолжается, но еще медленнее в период от 7 до 14 суток. График демонстрирует достижение прочности около 35 МПа на четырнадцатый день. Этот промежуток характеризуется постепенным уменьшением скорости гидратационных реакций и уплотнением микроструктуры цементного камня. В период от 14 до 28 суток рост прочности продолжается. На 28 сутки прочность контрольного образца достигает порядка 40 МПа. На этой стадии можно видеть, что реакция гидратации цемента значительно замедляется со временем, и скорость набора прочности заметно снижается. Между 28 и 50 сутками график демонстрирует почти горизонтальную линию, что указывает на незначительное увеличение прочности, которая достигает примерно 45 МПа.

Таким образом, показаны особенности набора прочности цементного камня с учетом специфики его состава. Характер набора прочности цементного камня контрольного и модифицированного сопоставимы и отличаются быст-

рым набором прочности с последующим замедлением и стабилизацией прочности цементного материала в возрасте около 50 дней, после чего график происходят минимальные изменения в прочностных характеристиках вплоть до 1800 суток. Эти данные указывают на типичную кинетическую кривую для модифицированных цементных материалов, где ключевую роль играют начальные процессы гидратации и последующее уплотнение микроструктуры за счет образования продуктов гидратации.

Выводы. Таким образом, в работе показаны особенности кинетики набора прочности контрольного (бездобавочного) и модифицированного (с добавкой нанодисперсного кремнезема) как в ранний период (в первый месяц), так и в отдаленные сроки (до 400 суток). Наиболее интенсивно набор прочности идет в первые 28 суток, далее процессы значительно замедляются, и максимум прочности формируется к 400 суткам. При этом состав с добавкой нанокремнезема обеспечивает превышение прочности на 29 %. При этом с введением нанодисперсного кремнезема наблюдается уменьшение коэффициента торможения, что может быть связано с изменениями в структуре материала и его поверхностных свойствах под воздействием наночастиц. Это может приводить к улучшению текучести и обработки цементной системы.

Увеличение коэффициента гидратации указывает на более активные процессы взаимодействия компонентов цемента с водой, что способствует формированию более прочной и устойчивой структуры материала.

Таким образом, использование наночастиц кремнезема в качестве добавок в цементные системы обещает быть перспективным направлением для улучшения их характеристик и повышения эффективности конструкций, что может иметь существенное значение для строительной индустрии и инфраструктурного развития.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенова М.М., Ильина Л.В. Применение нанокремнезема для увеличения прочности мелкозернистого бетона // LVI Международные научные чтения (памяти Р.Е. Алексеева): Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2019. С. 4–6.
2. Потапов В.В., Гордеева Е.В., Шитиков Е.С., Сердан А.А. Модифицирование цементных материалов малыми дозами гидротермального

нанокремнезема и пластифицирующими добавками // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. №. 3 (48). С. 93–102. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-11

3. Шведова М.А., Артамонова О.В. Изучение реологических характеристик наномодифицированных цементных смесей // Молодые ученые-развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2020. №. 1. С. 743–746.

4. Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин В.В., Карабанов М.О. Кинетика ранних стадий твердения цементных систем с индивидуальными и комплексными добавками разной химической природы // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году. 2021. С. 186–192.

5. Kamasamudram K.S., Ashraf W., Landis E.N. Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 285. 121547. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121547

6. Tabish M., Zaheer M. M., Baqi A. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. 105676. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105676

7. Hamada H., Shi J., Yousif S.T., Al Jawahery M., Tayeh B., Jokhio G. Use of nano-silica in cement-based materials—a comprehensive review // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2023. Vol. 12. №. 10. Pp. 1286–1306. DOI: 10.1080/21650373.2023.2214146

8. Dong P., Allahverdi A., Andrei C.M., Basim N.D. The effects of nano-silica on early-age hydration reactions of nano Portland cement // Cement

and Concrete Composites. 2022. Vol. 133. Pp. 104698. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104698

9. Строкова В.В., Хмара Н.О., Нелюбова В.В., Шаповалов Н.А. Малые архитектурные формы: состав и свойства бетонов для их получения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. №. 11. С. 8–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31

10. Потапов В.В., Горев Д.С. Сравнительные результаты повышения прочности бетона вводом нанокремнезема и микрокремнезема // Современные наукоемкие технологии. 2018. №. 9. С. 98–102. DOI: 10.17513/snt.37176

11. Fu Q. Zhao, X., Zhang, Z., Xu, W., Niu, D. Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials // Powder Technology. 2022. Vol. 404. 117447. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117447

12. Sargam Y., Wang K. Influence of dispersants and dispersion on properties of nanosilica modified cement-based materials // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. 103969. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103969

13. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Нецвет Д.Д., Боцман Л.Н., Шаповалов Н.А. Прогнозирование прочности цемента с модификаторами для самоуплотняющихся бетонов // Вестник БГТУ им. ВГ Шухова. 2022. №. 12. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17

14. Патент РФ 2701911. Способ получения гидрозоля монодисперсного нанокремнезема для изготовления бетона / Баскаков П.С., Строкова В.В., Кузьмин Е.О. Заявл. 20.03.2019. Опубл. 02.10.2019. Бюл. № 28.

15. Рахимбаев Ш.М., Авершина Н.М. Прогнозирование долговечности строительных материалов по единичному сроку испытаний // Строительные материалы. 1994. №. 4. С. 17–18.

Информация об авторах

Кузьмин Евгений Олегович, аспирант. E-mail: kuzmin9731@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Нелюбова Виктория Викторовна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЛ "Самоочищающиеся покрытия". E-mail: nelubova@list.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Володченко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ "Самоочищающиеся покрытия". E-mail: s-nsm@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 05.07.2024 г.

© Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н., 2024

*Kuzmin E.O., Nelyubova V.V., Volodchenko A.N.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

*E-mail: kuzmin9731@mail.ru

THE PREDICTED STRENGTH OF CEMENT STONE WITH THE ADDITION OF NANODISPERSED SILICA

Abstract. The study is aimed at assessing the effect of silica nanoparticles as additives in cement systems on their mechanical properties and predicted strength in the long term. The use of silica nanoparticles (SiO_2) is characterized by their high specific surface area, significant reactivity and the potential to improve the structural parameters of cement stone. The integration of these nanoparticles into cement stone causes a change in its physico-chemical properties, which ultimately affects the strength and durability characteristics of the material. SiO_2 nanoparticles fill the pore space and microcracks in the cement stone, which leads to a denser structure. They promote deeper hydration of cement by accelerating the reaction of formation of hydrate phases such as C-S-H (calcium silicate hydrate), which are the main components that give cement stone strength. The data show that the addition of silica nanoparticles leads to a decrease in the braking coefficient and an increase in the hydration coefficient of cement. The predicted strength of all studied compounds reaches maximum values by 400 days, with the highest intensity of processes in the first 50 days. The addition of nanodispersed silica provides a 29% increase in the strength of cement stone. The increased hydration coefficient indicates more intense interactions between cement components and water, which contributes to the formation of a stronger and more durable material structure. The results indicate the potential use of silica nanoparticles to improve the mechanical properties of cement systems and increase the efficiency of structures.

Keywords: silica nanoparticles, cement system, mechanical properties, strength, hydration coefficient, forecasting.

REFERENCES

1. Semenova M.M., Ilyina L.V. The use of nanosilicon to increase the strength of fine-grained concrete [Primenenie nanokremnezema dlya uvelicheniya prochnosti melkozernistogo betona]. LVI Mezhdunarodnye nauchnye chteniya (pamyati R.E. Alekseeva): Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. Pp. 4–6. (rus)
2. Potapov V.V., Gordeeva E.V., Shitikov E.S., Serdan A.A. Modification of cement materials with small doses of hydrothermal nanosilicon and plasticizing additives [Modificirovanie cementnykh materialov malymi dozami gidrotermalnogo nanokremnezema i plastificiruyushchimi dobavkami]. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2021. No. 3 (48). Pp. 93–102. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-11 (rus)
3. Shvedova M.A., Artamonova O.V. The study of rheological characteristics of nanomodified cement mixtures [Izuchenie reologicheskikh kharakteristik nanomodificirovannykh cementnykh smesey]. Molodye uchenye-razvitiyu Nacional'noj tekhnologicheskoy iniciativy (POISK). 2020. No. 1. Pp. 743–746. (rus)
4. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V., Karabanov M.O. Kinetika rannikh stadij tverdeniya cementnykh sistem s individual'nymi i kompleksnymi dobavkami raznoj khimicheskoy prirody. Fundamental'nye, poiskovyie i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2020 godu. 2021. Pp. 186–192. (rus)
5. Kamasamudram K.S., Ashraf W., Landis E.N. Cellulose nanofibrils with and without nanosilica for the performance enhancement of Portland cement systems. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 285. 121547. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121547
6. Tabish M., Zaheer M. M., Baqi A. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. 105676. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.105676
7. Hamada H., Shi J., Yousif S.T., Al Jawahery M., Tayeh B., Jokhio G. Use of nano-silica in cement-based materials—a comprehensive review. Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2023. Vol. 12. №. 10. Pp. 1286–1306. DOI:10.1080/21650373.2023.2214146
8. Dong P., Allahverdi A., Andrei C.M., Basim N.D. The effects of nano-silica on early-age hydration reactions of nano Portland cement. Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 133. 104698. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104698
9. Strokova V.V., Khmara N.O., Nelyubova V.V., Shapovalov N.A. Small architectural forms: composition and properties of concretes for their production [Malye arhitekturnye formy: sostav i svoystva betonov dlya ikh polucheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 11. Pp. 8–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-11-8-31 (rus)
10. Potapov V.V., Gorev D.S. Comparative results of increasing the strength of concrete by introducing nanosilicon and microsilicon [Sravnitel'nye

rezultaty povysheniya prochnosti betona vvidom nanokremnezema i mikrokremnezema]. Scientific magazine «Modern high technologies». 2018. No. 9. Pp. 98–102. DOI: 10.17513/snt.37176 (rus)

11. Fu Q. Zhao, X., Zhang, Z., Xu, W., Niu, D. Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials. Powder Technology. 2022. Vol. 404. 117447. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117447

12. Sargam Y., Wang K. Influence of dispersants and dispersion on properties of nanosilica modified cement-based materials. Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 118. 103969. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103969

13. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Netsvet D.D., Boatsman L.N., Shapovalov N.A. Forecasting

the strength of cement with modifiers for self-sealing concretes [Prognozirovanie prochnosti cementa s modifikatorami dlya samouplotnyayushchikhsya betonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 12. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-12-8-17 (rus)

14. Baskakov P.S., Strokova V.V., Kuzmin E.O. A method for obtaining a monodisperse nanosilicon hydrosol for the manufacture of concrete. Patent RF, no. 2701911, 2019.

15. Rakhimbaev Sh.M., Avershina N.M. Forecasting the durability of building materials by a single test period [Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nykh materialov po edinichnomu sroku ispytaniy]. Building materials. 1994. No. 4. Pp. 17–18. (rus)

Information about the authors

Kuzmin, Evgeny O. Postgraduate student. E-mail: kuzmin9731@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Nelyubova, Victoria V. Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher at the Research Institute "Self-cleaning coatings". E-mail: nelubova@list.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Volodchenko, Anatoly N. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, leading researcher at the Research Institute "Self-cleaning coatings". E-mail: s-nsm@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova str., Belgorod, 308012, Russia.

Received 05.07.2024

Для цитирования:

Кузьмин Е.О., Нелюбова В.В., Володченко А.Н. Прогнозируемая прочность цементного камня с добавкой нанодисперсного кремнезема // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24

For citation:

Kuzmin E.O., Nelyubova V.V., Volodchenko A.N. The predicted strength of cement stone with the addition of nanodispersed silica. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24