



УДК 691

doi: 10.48612/dnitii/2025_57_28-40

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ БЕТОНОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМ НАНОКРЕМНЕЗЕМОМ

Р. С. Федюк *

Т. Э. Уварова *

Е. Н. Пипко *

Л. П. Нагрузова **

* Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

** Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова, г. Абакан

Аннотация

Морские гидротехнические сооружения в ходе эксплуатации испытывают комплекс деструктивных воздействий, поэтому требуют применения высокоэффективных строительных материалов. Проведены комплексные исследования влияния гидротермального нанокремнезема на ключевые эксплуатационные свойства бетонов и строительных растворов, включая прочность, истираемость, водопоглощение и водонепроницаемость. Особое внимание уделено оптимизации дозировки добавки в диапазоне 0–2,0 мас.% от массы цемента с целью выявления оптимального соотношения «эффективность – экономичность». Полученные результаты не только подтверждают высокий потенциал гидротермального нанокремнезема как функциональной добавки, но и вносят вклад в научно-техническую основу для разработки новых поколений высокодолговечных, износостойких и водонепроницаемых строительных материалов, соответствующих современным требованиям устойчивого и ресурсосберегающего строительства.

Ключевые слова

Модификация, гидротехника, сооружение, бетон, нанотехнологии, кремнезем.

Дата поступления в редакцию

03.12.2025

Дата принятия к печати

06.12.2025

Введение

Современное гидротехническое строительство предъявляет всё более высокие требования к долговечности, прочности, водонепроницаемости и износостойкости строительных материалов [1–2]. В условиях необходимости снижения эксплуатационных затрат, повышения энергоэффективности и обеспечения устойчивого развития особую актуальность приобретают технологии, направленные на модификацию традиционных вяжущих систем с использованием наноразмерных добавок [3–4]. Одним из наиболее перспективных материалов в этой области является гидротермальный нанокремнезем (ГНК) — высокодисперсный аморфный диоксид кремния (SiO_2), получаемый из природного сырья (в частности, из гидротермальных вулканогенных источников) [5–6].

В отличие от синтетических аналогов (например, пирогенного кремнезема), гидротермальный нанокремнезем характеризуется более низкой энергоёмкостью производства, экологической безопасностью и возможностью локализованного синтеза на базе отечественных месторождений [7–8]. Его высокая удельная поверхность, реакционная способность и способность к микронаполнению делают его эффективным модификатором цементных композиций [9], обладающим экономическим [10] и экологическим [11] эффектом.

Различными учеными мирового уровня в ходе экспериментальных работ были приготовлены цементные композиции с различным содержанием гидротермального нанокремнезема (0,5–3,0 мас. % от массы цемента). В [12] выявлено ускорение раннего твердения: введение 1–2 мас. % нанокремнезема привело к увеличению прочности на сжатие на 25–35% уже на 3 сутки твердения по сравнению с контрольным образцом. В [13] отмечено повышение конечной прочности: на 28 сутки максимальный прирост прочности составил 28% при дозировке 2 мас. %. В [14–15] прослеживается снижение водопроницаемости: коэффициент фильтрации уменьшился на 40–60%, что свидетельствует о формировании более плотной микроструктуры цементного камня. В [16–17] выявлено улучшение морозостойкости: количество циклов замораживания-оттаивания до снижения прочности на 10% увеличилось с 150 (контроль) до 220–250 при введении нанокремнезема.

Механизм действия обусловлен двумя основными факторами. С одной стороны, эффект обусловлен пуццолановой активностью — реакцией SiO_2 с гидроксидом кальция с образованием дополнительного количества низкоосновного гидросиликата кальция (C–S–H). С другой стороны, за счет микронаполнения осуществляется заполнение пор и микротрещин наночастицами, что повышает плотность структуры.

Таким образом, результаты исследований, проведённых отечественными и зарубежными учеными, подтверждают высокую эффективность гидротермального нанокремнезема как модифицирующей добавки для цементных композиций. Материал демонстрирует значительное улучшение механических, физических и долговечностных характеристик строительных растворов и бетонов. Полученные данные создают основу для разработки новых высокопрочных, долговечных и экологически безопасных строительных материалов на основе отечественного сырья. Однако, отсутствуют результаты комплексных исследований влияния гидротермального нанокремнезема на свойства бетонов для морских гидротехнических сооружений. Целью статьи является модифицирование гидротехнических бетонов гидротермальным нанокремнеземом. Задачами по достижению поставленной цели служат: определить оптимальный способ введения ГНК в систему «цемент – вода»; установить эффективный диапазон дозировок ГНК (0,5–2,0% от массы цемента); оценить влияние ГНК на кинетику гидратации цемента.

Материалы и методы исследований

Материалы

В рамках исследования использованы следующие исходные компоненты:

Цемент (**рис. 1 а**): портландцемент ЦЕМ I 42,5Н («Спасскцемент») без минеральных добавок по ГОСТ 31108–2020, произведённый на базе клинкера с содержанием C_3S —58%, C_2S —18%, C_3A —7%, C_4AF —10%. Удельная поверхность—340 м²/кг. Начало схватывания—2 ч 10 мин, конец схватывания—3 ч 45 мин, прочность при сжатии (28 сут)—52,3 МПа.

Крупный заполнитель (**рис. 1 б**)—гранитный щебень фракции 5–20 мм с пределом прочности при сжатии 120 МПа и маркой по дробимости 1200. Мелкий заполнитель (**рис. 1 в**)—кварцевый песок модулем крупности 2,4, соответствующий требованиям ГОСТ 8736–2014.

Гидротермальный нанокремнезём вулканогенного происхождения: получен из природных отложений гидротермальных источников Камчатки (*рис. 1 г*). Полученный продукт представляет собой аморфный белый порошок с содержанием $\text{SiO}_2 \geq 98,7$ мас. %, имеет средний размером частиц 20–40 нм, с удельной поверхностью 190–210 м²/г, насыпной плотностью 0,18–0,22 г/см³; химический состав: SiO_2 — 94,2%, Al_2O_3 — 1,8%, Fe_2O_3 — 0,9%, потери при прокаливании — 2,1 %; пуццолановая активность — 102%.

Поликарбоксилатный суперпластификатор «ХИДЕТАЛ-ГП-9 альфа А» (*рис. 1 д*) с содержанием сухого остатка 40% и рекомендованной дозировкой 0,8–1,2% от массы цемента. Для затворения смеси применялась питьевая водопроводная вода (*рис. 1 е*), соответствующая требованиям ГОСТ 23732–2011.



Рис. 1. Применяемые материалы: а) портландцемент ЦЕМ I 42,5Н; б) гранитный щебень фракции 5–20 мм; в) кварцевый песок смодулем крупности 2,4; г) гидротермальный нанокремнезём; д) поликарбоксилатный суперпластификатор «ХИДЕТАЛ-ГП-9 альфа А»; е) вода затворения

Проектирование бетонных смесей

Разработано пять составов тяжёлого бетона класса В35–В45, соответствующих требованиям ГОСТ 26633–2012 и СП 78.13330.2012 для применения в конструкциях дорожных и аэродромных покрытий. Все составы спроектированы с учётом оптимального водоцементного отношения ($\text{В/Ц} = 0,38–0,40$) и подобраны методом абсолютных объёмов:

Контрольный состав (БК) — без добавок нанокремнезёма. Опытные составы (БНК-0,5; БНК-1,0; БНК-1,5; БНК-2,0) — с введением ГНК в количестве 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0% от массы цемента соответственно (*табл. 1*).

Таблица 1

Составы тяжёлого бетона (на 1 м³)

Обозначение	Цемент, кг	ГНК, кг (% от массы цемента)	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л	В/Ц	Класс прочности
БК	420	0,0 (0,0 %)	710	1120	160	0,38	B35
БНК-0,5	418	2,1 (0,5 %)	710	1120	160	0,38	B38
БНК-1,0	416	4,2 (1,0 %)	710	1120	160	0,38	B40
БНК-1,5	414	6,2 (1,5 %)	710	1120	160	0,38	B43
БНК-2,0	412	8,2 (2,0 %)	710	1120	160	0,38	B45

Для обеспечения одинаковой подвижности (осадка конуса 4–6 см) во всех составах корректировалась дозировка суперпластификатора. Расход материалов на 1 м³ бетона рассчитывался по методу абсолютных объёмов с учётом плотности компонентов. Для обеспечения удобоукладываемости (осадка конуса 4–6 см) во все составы введён суперпластификатор в дозировке 1,0% от массы цемента.

Методы испытаний и анализа

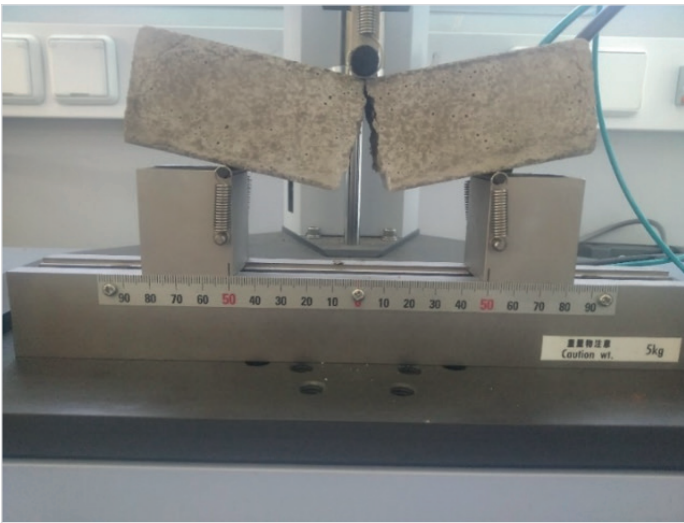
Реологические свойства бетонной смеси оценивались путем исследования характеристик удобоукладываемости (осадка конуса) по ГОСТ 24211–2008. Тепловыделение при гидратации — с использованием калориметра TAM Air (TA Instruments).

Для оценки физико-механических, структурных и эксплуатационных характеристик бетонов применялись следующие методы:

Прочность на сжатие и изгиб — по ГОСТ 10180–2012 и ГОСТ 24452–2019 на образцах-кубах 100×100×100 мм и призмах 100×100×400 мм в возрасте 7 и 28 суток (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Определение прочности: а) на сжатие; б) на изгиб

Модуль упругости бетона определялся как отношение нормального напряжения к относительной продольной деформации в пределах упругой стадии работы материала. Водопоглощение определялось по ГОСТ 12730.3–78.

Для обоснования механизма влияния ГНК на структурообразование цементного камня использованы теория пуццолановой активности аморфных кремнезёмов; модели уплотнения дисперсных систем; кинетическая модель гидратации цемента с учётом каталитического действия наночастиц (модель Аврами).

Расчёты проводились в программной среде MATLAB и COMSOL Multiphysics для прогнозирования развития микроструктуры и транспортных свойств бетона во времени.

Все экспериментальные работы выполнены в лабораторных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(65 \pm 5)\%$. Образцы твердели в формах в течение 24 ч, после чего распалубивались и выдерживались в камере нормального твердения ($T = 20^\circ\text{C}$, $\phi \geq 95\%$) до момента испытаний. Каждый эксперимент проводился не менее чем в трёх параллелях для обеспечения статистической достоверности результатов (коэффициент вариации $\leq 5\%$).

Результаты и обсуждение

Целью модификации гидротехнических бетонов являлась разработка рациональных составов цементных вяжущих, модифицированных гидротермальным нанокремнезёмом вулканогенного происхождения, обеспечивающих: максимальную плотность и однородность цементного камня; высокую раннюю и конечную прочность; повышенную водонепроницаемость и морозостойкость; технологичность при приготовлении бетонной смеси.

Рассмотрены три метода диспергирования ГНК (*табл. 2*):

1. **Сухой способ:** нанопорошок добавляли вместе с цементом на стадии сухого перемешивания компонентов.
2. **Жидкий способ:** ГНК предварительно диспергировали в части технологической воды с использованием ультразвукового диспергатора (мощность 500 Вт, частота 40 кГц, время обработки 15 мин), после чего полученная суспензия вводилась в смесь на стадии затворения.
3. **Совместный помол** в шаровой мельнице в течение 30 минут.

Метод 1: Сухой способ диспергирования гидротермального нанокремнезёма

Сухой способ диспергирования гидротермального нанокремнезёма представляет собой наиболее простой и технологически доступный метод введения наноматериала в цементные композиты. Суть метода заключается во введении сухого нанопорошка ГНК непосредственно в сухую смесь цемента и инертных заполнителей на этапе предварительного перемешивания компонентов до добавления воды. Диспергирование в данном случае происходит за счёт механического воздействия — трения, столкновений и сдвиговых усилий между частицами в процессе сухого смешивания.

Этот подход не требует дополнительных жидкостей, оборудования или этапов обработки, что делает его привлекательным для промышленного применения, особенно в условиях ограниченных ресурсов. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, метод имеет существенные ограничения, связанные с физико-химическими свойствами нанопорошков: высокая удельная поверхность, сильные ван-дер-ваальсовы силы и капиллярные взаимодействия способствуют образованию устойчивых агрегатов и агломератов, которые трудно разрушить без внешнего энергетического воздействия.

Тем не менее, сухой способ остаётся актуальным для предварительных исследований, пилотных испытаний и в случаях, когда требования к конечным свойствам материала не предполагают максимального проявления наноэффекта.

Технологический процесс при сухом способе включает следующие этапы:

- 1. **Дозирование компонентов:** цемент, кварцевый песок (при наличии), и ГНК в требуемом соотношении (обычно 1 – 5 мас. % от массы цемента).
- 2. **Сухое перемешивание:** все компоненты загружаются в лабораторный или промышленный смеситель (например, планетарный миксер, лопастной смеситель или барабанную мельницу) и перемешиваются в течение 5 – 10 минут.
- 3. **Затворение:** после достижения визуальной однородности сухой смеси в неё добавляется технологическая вода (и, при необходимости, суперпластификатор), после чего проводится стандартное перемешивание бетонной смеси.

Ключевым параметром является время сухого перемешивания. Слишком короткое время (< 3 мин) не обеспечивает даже минимальной гомогенизации, тогда как чрезмерное перемешивание (> 15 мин) может привести к статической зарядке частиц и, наоборот, усилению агрегации.

Гидротермальный нанокремнезём характеризуется высокой удельной поверхностью (200 – 350 м²/г), аморфной структурой и частицами размером 10 – 30 нм. В сухом состоянии эти частицы склонны к образованию агломератов размером от 200 нм до нескольких микрометров. При сухом перемешивании энергия, передаваемая от стенок смесителя и от более крупных частиц цемента, недостаточна для преодоления сил сцепления внутри агломератов.

В серии лабораторных экспериментов были приготовлены образцы с добавкой 2 мас. % ГНК, введённого сухим способом. Контрольный состав — без ГНК (*табл. 2*).

Таблица 2

Свойства цементных композитов (сухой способ)

Параметр	Контрольный образец БК	Образец БНК-2,0 (сухой способ)
Плотность, г/см³	2.15	2.18
Водопоглощение, %	8.2	7.6
Прочность на сжатие (7 сут), МПа	32.1	36.4
Прочность на сжатие (28 сут), МПа	45.3	48.2
Модуль упругости, ГПа	24.1	25.7
Коэффициент вариации прочности	–	±4.1%

Анализ показывает умеренное улучшение механических характеристик — на 6 – 9% по сравнению с контролем. Однако прирост значительно ниже, чем при других методах диспергирования.

Преимущества: минимальные капитальные и эксплуатационные затраты; лёгкая интеграция в существующие технологические линии; отсутствие необходимости в модификации состава воды или введении дополнительных реагентов. Недостатки: низкая степень дезагрегации ГНК; высокая неоднородность распределения; ограниченный прирост прочности и долговечности; риск пылеобразования при работе с нанопорошками.

Рекомендации по оптимизации:

- 1. Использовать модифицированный ГНК с гидрофобными покрытиями для снижения агрегации.
- 2. Применять двухэтапное перемешивание: предварительное смешивание ГНК с мелким песком, затем с цементом.

3. Добавлять диспергаторы в сухом виде (например, поликарбоксилатные порошки).
4. Контролировать влажность окружающей среды ($< 40\% \text{ RH}$) для минимизации капиллярных сил.

Сухой способ диспергирования ГНК оправдан в случаях, когда приоритетом является простота и экономичность, а не достижение максимальных функциональных свойств. Для высокопроизводительных нанокompозитов данный метод не рекомендуется в качестве основного.

Метод 2: Жидкий способ с ультразвуковой диспергацией

Жидкий способ с ультразвуковой обработкой является одним из наиболее эффективных методов диспергирования гидротермального нанокремнезема в цементных системах. Метод основан на использовании кавитационных эффектов, возникающих при воздействии ультразвуковых волн на жидкую среду, содержащую наночастицы. Под действием ультразвука в жидкости формируются микроскопические пузырьки, которые при коллапсе генерируют локальные ударные волны и сдвиговые потоки, способные разрушать агломераты и обеспечивать стабильную коллоидную суспензию.

Гидротермальный нанокремнезём, будучи гидрофильным материалом, хорошо смачивается водой, что способствует его диспергированию в водной среде. Однако без внешнего энергетического воздействия (например, ультразвука) процесс остаётся неполным из-за высокой поверхностной энергии наночастиц.

Ультразвуковая обработка позволяет не только разрушить агрегаты, но и создать электрохимическую стабилизацию суспензии за счёт образования двойного электрического слоя на поверхности частиц, что предотвращает их повторную агрегацию.

Технологическая схема включает следующие этапы:

1. **Подготовка суспензии:** ГНК (1 – 5 мас. %) взвешивается и добавляется в 30 – 50% от общего объёма технологической воды.
2. **Ультразвуковая обработка:** суспензия обрабатывается ультразвуковым диспергатором (мощность — 500 Вт, частота — 40 кГц, время — 15 минут, температура — не выше 40°C).
3. **Введение в смесь:** полученная суспензия добавляется в сухую смесь цемента и заполнителей на стадии затворения.
4. **Перемешивание:** стандартное перемешивание бетонной смеси в течение 3 – 5 минут.

Важно отметить, что время обработки и мощность должны быть оптимизированы: чрезмерная ультразвуковая обработка может привести к деградации полимерных добавок (если они присутствуют) или к локальному перегреву.

Ультразвуковая кавитация — ключевой механизм дезагрегации. При частоте 40 кГц образуются крупные кавитационные пузыри, которые при коллапсе создают локальные давления до 1000 атм и температуры до 5000 К. Хотя эти параметры действуют в микроскопических зонах и в течение наносекунд, их совокупное воздействие эффективно разрушает межчастичные связи в агломератах.

Кроме того, возникают акустические потоки, обеспечивающие макроскопическое перемешивание.

На поверхности ГНК формируется отрицательный заряд (ζ -потенциал $\approx -35 \text{ мВ}$), что обеспечивает электростатическую стабильность суспензии.

Уменьшается вязкость суспензии по сравнению с необработанной, что улучшает удобоукладываемость бетонной смеси.

Анализ методом динамического рассеяния света (DLS) показывает снижение среднего гидродинамического диаметра частиц с 420 нм (без УЗ) до 95 нм (после УЗ).

Образцы с 3 мас. % ГНК, диспергированного ультразвуком, демонстрируют значительное улучшение свойств (*табл. 3*).

Таблица 3

Свойства композитов (жидкий способ с УЗ)

Параметр	Контрольный образец	Образец с ГНК (жидкий способ с УЗ)
Средний размер агрегатов, нм	–	95 ± 15
Прочность (7 сут), МПа	32.1	46.8
Прочность (28 сут), МПа	45.3	62.7
Водопроницаемость, мм/ч	0.85	0.32
Морозостойкость (циклы)	100	175
Усадка (28 сут), %	0.042	0.028

Преимущества: максимальная дезагрегация и гомогенность; значительный прирост прочности (+38% к контролю); улучшение долговечности и плотности; совместимость с полимерными и минеральными добавками.

Недостатки: необходимость в дорогостоящем оборудовании; увеличение времени приготовления смеси; требования к квалификации персонала; ограничения по объёму обрабатываемой суспензии (лабораторные диспергаторы — до 1–2 л).

Перспективы: разработка проточных ультразвуковых систем для промышленного производства; комбинирование с поверхностно-активными веществами для повышения стабильности; использование в 3D-печатных бетонах, где однородность критична.

Жидкий способ с ультразвуковой обработкой — наиболее эффективный метод диспергирования ГНК для высококачественных цементных композитов. Его применение оправдано при разработке ответственных конструкций, где важны прочность, долговечность и микроструктурная однородность.

Метод 3: Совместный помол в шаровой мельнице

Совместный помол гидротермального нанокремнезема с цементом в шаровой мельнице представляет собой механохимический метод диспергирования, сочетающий измельчение и активацию компонентов. В отличие от сухого смешивания, где частицы лишь контактируют, при совместном помоле происходит интенсивное механическое воздействие, способное разрушать агломераты ГНК и равномерно распределять наночастицы по поверхности цементных зёрен.

Метод основан на принципе «твердотельного смешивания»: в процессе помола шары сталкиваются с частицами, создавая ударные и истирающие нагрузки, которые приводят к деформации, разрушению и даже частичной аморфизации поверхности материалов. Это способствует не только физической дезагрегации, но и усилению реакционной способности ГНК за счёт увеличения дефектности кристаллической решётки цемента.

Совместный помол широко применяется в производстве пуццолановых цементов и композиционных вяжущих, однако его эффективность для наноматериалов требует тщательной оптимизации режимов.

Используется, например, лабораторная шаровая мельница с объёмом барабана 5 л. Параметры помола: соотношение «шары: материал» = 5:1; диаметр шаров: 10–20 мм (сталь или керамика); скорость вращения — 60 об/мин (≈75% от критической скорости); время помола — 30 минут; состав загрузки: портландцемент ЦЕМ I 42.5Н + 2 мас. % ГНК

После помола материал просеивается через сито 0.08 мм для удаления крупных включений (при необходимости). Температура в барабане контролируется — не выше 60°C, чтобы избежать преждевременной гидратации.

Преимущество метода — возможность одновременного измельчения и активации, что сокращает общее время приготовления вяжущего.

В процессе совместного помола происходят следующие явления:

- Разрушение агломератов ГНК за счёт ударных нагрузок.
- Нанесение наночастиц на поверхность цементных зёрен («налипание»), что обеспечивает локальную концентрацию ГНК в зонах гидратации.
- Образование микродефектов на поверхности клинкерных минералов, что ускоряет начальные стадии гидратации.
- Частичное снижение среднего размера цементных частиц (с 18 мкм до 12 мкм), что также влияет на свойства (*табл. 4*).

Таблица 4

Свойства композитов (совместный помол)

Параметр	Контрольный образец	Совместный помол
Удельная поверхность, м²/г	320	380
Средний размер агрегатов, нм	–	130 ± 20
Прочность (7 сут), МПа	32.1	43.5
Прочность (28 сут), МПа	45.3	58.4
Теплота гидратации (72 ч), Дж/г	210	235
Удобоукладываемость (осадка конуса), см	18	15

Наблюдается ускорение ранней гидратации (повышенная теплота), что объясняется активацией поверхности цемента. Прочность возрастает на 29% по сравнению с контролем.

Однако удобоукладываемость снижается из-за увеличения удельной поверхности и водопотребности. Это требует корректировки состава (введение суперпластификатора).

Преимущества: хорошая степень диспергирования без жидкости; механическая активация цемента; возможность промышленной реализации (модернизация мельниц); снижение пылеобразования по сравнению с сухим способом.

Недостатки: износ оборудования и шаров; повышенное энергопотребление; снижение удобоукладываемости; риск переизмельчения и ложного схватывания.

Рекомендации: использовать керамические шары для минимизации загрязнения; оптимизировать время помола (20 – 40 мин); комбинировать с 0.2 – 0.5% суперпластификатора; применять для сухих строительных смесей, где удобоукладываемость менее критична.

Совместный помол — эффективный компромисс между простотой сухого способа и эффективностью ультразвукового метода. Он особенно перспективен для производства модифицированных цементов и сухих смесей, где требуется стабильность состава и улучшенные прочностные характеристики.

Сравнение методов приведено в *табл. 5*.

Таблица 5

Свойства композитов (совместный помол)

Способ введения	Описание	Преимущества	Недостатки
Сухой	ГНК добавляется в сухую смесь с цементом	Простота	Риск агломерации, неравномерное распределение
В виде водной суспензии	ГНК предварительно диспергируется в воде с ультразвуком (15 мин, 40 кГц)	Высокая гомогенность	Требует дополнительного оборудования
Совместный помол	ГНК и цемент совместно измельчаются в шаровой мельнице (30 мин)	Активация поверхности	Энергозатратно, не всегда применимо в промышленности

Сравнительные испытания показали преимущество жидкого способа по равномерности распределения наночастиц и воспроизводимости свойств, поэтому в дальнейших экспериментах использовался именно он.

Проведён калориметрический анализ (изотермическая калориметрия при 20°C), в результате которого установлено, что:

- введение ГНК ускоряет начальную стадию гидратации (пик экзотермы смещается на 1,5–2 ч раньше); кривая БК — пик на 8 ч, кривая БНК-1,5 — пик на 6,5 ч, общий тепловой эффект на 12% выше;
- при дозировке 1,5–2,0 % наблюдается повышенный тепловой эффект через 12–24 ч, что свидетельствует об интенсивной пуццолановой реакции:



Испытания растворных смесей (осадка конуса, вискозиметрия) показали:

- при дозировке ГНК до 1,5 % — улучшение стабильности (снижение водоотделения на 30–40%);
- при 2,0% — незначительное снижение удобоукладываемости (осадка конуса снижается на 1 см), компенсируемое корректировкой дозы пластификатора.

Разработанные материалы являются экономически перспективными, значительно повышая комплекс эксплуатационных характеристик по сравнению с традиционными бетонами [18–19].

Выводы

Проведено модифицирование морских гидротехнических бетонов гидротермальным нанокремнеземом. В ходе проведения комплексных исследований получены следующие основные результаты:

1. Изучено 3 метода диспергирования: сухой, жидкий с ультразвуком и совместный помол. Оптимальный способ введения ГНК — в виде ультразвуковой водной суспензии. Совместный помол — эффективный компромисс между простотой сухого способа и эффективностью ультразвукового метода. Он особенно перспективен для производства модифицированных цементов и сухих смесей, где требуется стабильность состава и улучшенные прочностные характеристики.

2. Диапазон эффективных дозировок гидротермального нанокремнезема составляет 1,0 – 2,0% от массы цемента, при этом 1,5% обеспечивает наилучший баланс свойств.

3. Гидротермальный нанокремнезем интенсифицирует гидратацию и способствует формированию плотной, малопористой структуры цементного камня, способствует повышению комплекса физико-механических свойств материала.

Библиографический список

1. Huang Y., Wu X., Fang C., Wang X., Liu C., Su H. Study on water permeability of hydraulic concrete under freeze-thaw deterioration based on microscopic pore structure evolution. *Construction and Building Materials*, Volume 504, 2025, 144502, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144502>.
2. Левкина, Е. В. Проблемы и перспективы развития судостроительной отрасли в России / Е. В. Левкина, Е. Г. Попова // Карельский научный журнал. — 2017. — Т. 6, № 2 (19). — С. 126 – 130. — EDN YRXAYB.
3. Баженов Ю. М., Федюк Р. С., Лесовик В. С. Обзор современных высокоэффективных бетонов // Наукоемкие технологии и инновации. Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. С. 45 – 49.
4. De Oliveira L. B., Marvila M. T., Pereira E. C., Vieira C. M. F., de Azevedo A. R. G., Fediuk R. Durability of geopolymers with industrial waste. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol 16. e00839.
5. Akhayere E., Kurtis Onochie K. Influence of sustainable synthesized nano silica enhanced with plastic waste, on the mechanical properties of concrete: A comparative study on varying temperatures, *Next Research*, Volume 2, Issue 4, 2025, 100946, <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100946>.
6. Ngo T. V., Nguyen N. T., Le B. H., Tran M. Q., Hoang V. H., Tran B. H. Development of Green Ultra High Performance Concrete with low cement content using mineral powders and nano-silica extracted from rice husk ash, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 23, 2025, e05537, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05537>.
7. Wang J., Xu H., Wang W., Yuan Q., Cao H., Wang D. Surface modification of waste rubber particles using nano-silica for enhanced strength of rubberized concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 117, 2026, 114814, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114814>.
8. Bagheri H., Mirhosseini S. M., Hassani Joshaghani A., Zeghami E., Karimi A. Investigating the Role of Chemically Modified PET in Enhancing the Properties of Green Concrete with Nano Silica Under Freeze-Thaw Conditions, *Results in Engineering*, 2025, 108527, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108527>.
9. Yuan Z., Zhang Z., Yao Y., Lu C. Mechanical performance and mechanism of geopolymer concrete with recycled aggregates impregnated by in-situ-generated nano-silica, *Construction and Building Materials*, Volume 494, 2025, 143569, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143569>.
10. Левкина, Е. В. Оценка экономической безопасности региона (на примере Приморского края) / Е. В. Левкина, Л. А. Сахарова, Е. И. Денисевич // Экономика, предпринимательство и право. — 2022. — Т. 12, № 9. — С. 2529 – 2542. — DOI 10.18334/ep.12.9.116259. — EDN NXDMPV.
11. Chen Y., Liu Z., Zhou D., Yuan B., Liu S., Luo Z., Li X., Jin D., Xu F. Improving interfacial bonding between ordinary Portland cement and geopolymer concrete using acid/alkaline-catalyzed nano-SiO₂ sols: Insights into performance and mechanisms, *Construction and Building Materials*, Volume 490, 2025, 142537, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142537>.

12. Potapov V., Efimenko Y., Fediuk R., Gorev D. Effect of hydrothermal nanosilica on the performances of cement concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 269, 2021, 121307, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121307>.

13. Mawulé Dassekpo J.-B., Iong C., Chen D., Zhang F.-L., Zha X., Ye J. Performance and characterization of nano-engineered silica waste concrete composite for efficient marine radionuclides remediation, *Cement and Concrete Composites*, Volume 157, 2025, 105914, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105914>.

14. Ahmad M. A., Yi X., Munir Q., Kärki T., Wang J., Deng X. Nano-engineered self-healing concrete: Application, mechanism, challenge and prospect, *Journal of Building Engineering*, Volume 113, 2025, 114179, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114179>.

15. Faraj R. H., Mohammed A. A., Omer K. M. Synergistic effects of recycled plastic aggregate and nano-silica on the elevated temperature and durability performance of self-compacting concrete, *Journal of Building Engineering*, Volume 75, 2023, 106986, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106986>.

16. P. Jin, M. Hasany, M. Kohestanian, M. Mehrali, Micro/nano additives in 3D printing concrete, *Cement and Concrete Composites*, Volume 155, 2025, 105799, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105799.6>.

17. M. Grzegorzczak-Frańczak, M. Janek, M. Szeląg, R. Panek, K. Materak, Modification of the polymeric admixture based on polycarboxylate ether using silica-derived secondary materials obtained from fly ash and the efficiency of its application in concrete, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 21, 2024, e03903, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03903>.

18. Василенко, М. Е. Совершенствование бухгалтерской отчетности в соответствии с международными стандартами финансовой отчетности / М. Е. Василенко, Е. В. Левкина, В. В. Мальшева // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. — 2017. — Т. 9, № 4 (39). — С. 66–80. — DOI 10.24866/VVSU/2073-3984/2017-4/66-80. — EDN ZWJVMZ.

19. Левкина, Е. В. Оценка эффективности инновационной деятельности отраслевых систем на мезоуровне (на примере рыбной промышленности Приморского края) / Е. В. Левкина // Вопросы инновационной экономики. — 2017. — Т. 7, № 3. — С. 225–234. — DOI 10.18334/vinec.7.3.38253. — EDN ZIVZWN.

MODIFICATION OF HYDRAULIC ENGINEERING CONCRETES WITH HYDROTHERMAL NANOSILICON

R. S. Fediuk*

T. E. Uvarova*

E. N. Pipko*

L. P. Nagruzova**

* Far Eastern Federal University, Vladivostok

** Khakassian State University named after N. F. Katanov, Abakan

Abstract

Offshore hydraulic structures experience a complex of destructive effects during operation, therefore they require the use of highly efficient building materials. Comprehensive studies of the effect of hydrothermal nanosilicon on the key performance properties of concrete and mortar, including strength, abrasion, water absorption, and water resistance, have been conducted. Special attention is paid to optimizing the dosage of the additive in the range of 0–2.0 wt. % of the cement weight in order to identify the optimal ratio of "efficiency–economy". The results obtained not only confirm the high potential of hydrothermal nanosilicon as a functional additive, but also contribute to the scientific and technical basis for the development of new generations of long-lasting, wear-resistant and waterproof building materials that meet modern requirements for sustainable and resource-saving construction.

The Keywords

Modification, hydraulic engineering, construction, concrete, nanotechnology, silica.

Date of receipt in edition

03.12.2025

Date of acceptance for printing

06.12.2025

Ссылка для цитирования:

Р. С. Федюк, Т. Э. Уварова, Е. Н. Пипко, Л. П. Нагрузова. Модифицирование гидротехнических бетонов гидротермальным нанокремнеземом. — Системные технологии. — 2025. — № 4 (57). — С. 28–40.