

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 693.54; 666.972

**ПОЛОНИНА**  
**Елена Николаевна**

**КОНСТРУКЦИОННЫЙ БЕТОН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ  
НАНОКРЕМНЕЗЕМ И УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Минск, 2022

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

**ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технология строительства» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Официальные оппоненты:

**ЯГЛОВ Валерий Николаевич**,  
доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная экология» Белорусского национального технического университета, г. Минск;

**ТЕРЕХОВА Ирина Анатольевна**,  
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Республиканского унитарного предприятия «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.», г. Минск

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»

Защита состоится 14 декабря 2022 г. в 10<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, главный корпус, ауд. 202; Телефон ученого секретаря 8(017) 267-92-01, e-mail: kovshar-36@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «14» ноября 2022 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук



С. Н. Ковшар

© Полонина Е. Н., 2022  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2022

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы характерной чертой развития исследований в области портландцементных материалов стало направление, основанное на новых данных о структуре геля гидросиликатов кальция (С-S-H-геля), заполняющего до 70 % и более объема цементного камня. Новые данные получены благодаря применению комбинации методов, в первую очередь, термогравиметрии (ТГ), рентгенофазового анализа (РФА), сканирующей и туннельной электронной микроскопии, атомной силовой микроскопии, инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии), ядерного магнитного резонанса (ЯМР), наноидентирования (НИ) и численного моделирования энергетического состояния структуры, составленной из кремнекислородных тетраэдров  $\text{SiO}_4$ , атомов Са и  $\text{H}_2\text{O}$ . Появились возможности управляемого и контролируемого воздействия на структуру С-S-H-геля и эксплуатационные характеристики бетонов. Ввод наночастиц (НЧ) разного химического состава с высокой удельной площадью поверхности (до  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) и высокой физико-химической активностью поверхности в водоцементную систему стал перспективным способом повышения характеристик цементных материалов.

Среди наночастиц разного химического состава  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  и др. с учетом эффективности, себестоимости синтеза, возможности стабилизированного однородного ввода в бетонную смесь и наличия действующих крупных производств наночастицы  $\text{SiO}_2$  и нанопуглерода стали наиболее применяемыми. Результатам повышения механических, физических и структурных характеристик портландцементного бетона и цементного камня посвящено большинство публикаций по строительным материалам.

Актуальность данной работы связана с необходимостью решения реальных проблем технологий наномодифицирования бетонов:

- совершенствования методов направленного и контролируемого регулирования структуры С-S-H-геля варьированием доз, размеров, физико-химических характеристик поверхности наночастиц и других методов;
- снижения себестоимости технологии наномодифицирования бетонов относительно эффекта повышения эксплуатационных характеристик;
- стабилизированного и однородного ввода нанодобавок в бетонную смесь с одновременным контролем за коэффициентом вариации бетона в крупногабаритных изделиях.

В работе предложено применение:

- взаимоусиливающей комбинации наночастиц с переходом в область малых и сверхмалых доз (в десятки раз меньших по сравнению с исследуемыми), позволяющей применить относительно низкий расход поликарбоксилатного суперпластификатора (СП) одновременно для снижения водопотребности бетонной смеси и стабилизации наночастиц;
- наночастиц многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) отечественного производства (ТУ ВУ 691460594.002-2016) с удельной поверхностью  $60 \text{ м}^2/\text{г}$ , варьлируемым отношением «длина / диаметр» ( $l / d$ ) в пределах  $0,01\text{--}20 \text{ мкм} / 10\text{--}300 \text{ нм}$ , высокой плотностью карбоксильных групп активированной поверхности;
- гидротермальных наночастиц  $\text{SiO}_2$  со средним диаметром  $5,5 \text{ нм}$ , удельной поверхностью  $500 \text{ м}^2/\text{г}$ , плотностью поверхностных силанольных групп до  $4,9 \text{ нм}^{-2}$  в

форме стабильного золь с высоким по модулю электрокинетическим потенциалом, исключающим необходимость диспергирования и стабилизации при приготовлении комплексной водной суспензии; их низкая себестоимость обусловлена использованием гидротермального раствора – жидкой фазы теплоносителя действующих геотермальных электрических станций (ГеоЭС) согласно ТУ 2111-001-97849280-2014.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.**

Работа содержит результаты исследований автора, полученные при выполнении в БНТУ в 2016–2020 гг. заданий Минобразования РБ и НАН Беларуси по ГБ 16-134 «Разработка основ теории и методологии неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния и прочностных показателей бетона и железобетона на основе сочетания комплекса механико-акустических методов испытаний и методов компьютерного моделирования физико-механических процессов структурообразования» и ГБ 16-138 «Разработка импортозамещающей технологии устройства высококачественных полов и фундаментных плит из фибробетона на основе инновационной системы контроля качества», что соответствует Перечню приоритетных направлений научных исследований РБ на 2016–2020 гг. «Многофункциональные материалы и технологии», утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190.

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – разработка способа модифицирования портландцементного бетона комбинированной добавкой, влияющей на наноструктуру C-S-H-геля, для повышения упруго-механических характеристик, показателей вязкопластичного разрушения и долговечности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- провести анализ различных методов и способов наномодифицирования вяжущих на основе портландцемента и на основе анализа сформулировать направления для дальнейших исследований;
- разработать технологию, а также технологический регламент на приготовление и применение стабилизированной комплексной добавки (КД), включающей гидротермальный золь  $\text{SiO}_2$  и водную дисперсию углеродного наноматериала;
- предложить и экспериментально обосновать состав комплексной добавки, обеспечивающий ее эффективность, отраженную в росте прочности цементного камня и цементного бетона;
- исследовать механизм действия КД, используя методы ТГ – РФА – ИК-спектроскопии – упругих ультразвуковых волн – НИ, на структуру C-S-H-геля;
- экспериментально оценить влияние комплексной добавки на прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства конструкционного бетона;
- оценить экономический эффект применения комплексной добавки на основе гидротермального нанокремнезема и многослойных углеродных нанотрубок, достигаемый за счет использования малых доз наночастиц.

Объектом исследования являлся конструкционный бетон, а предметом исследования – характеристики цементного камня, бетонной смеси и бетона при моди-

фицировании их комплексной добавкой, содержащей гидротермальный нанокремнезем и углеродные нанотрубки.

Рабочая гипотеза, которая получила экспериментальное подтверждение: наночастицы МУНТ и  $\text{SiO}_2$  повышают упорядоченность структуры С-S-H-геля, вследствие этого возрастает объемная плотность укладки гранул С-S-H, увеличивается модуль упругости цементного камня, а, следовательно, повышаются механические характеристики и трещиностойкость бетона.

**Научная новизна** заключается в разработке способа модифицирования портландцементного бетона малыми дозами наночастиц МУНТ и  $\text{SiO}_2$  на основе эффекта их влияния на структуру С-S-H-геля за счет:

- повышения скорости и степени полимеризации–поликонденсации кремнекислородных тетраэдров, приводящей к повышению упорядоченности и однородности структуры, формы частиц С-S-H-геля, на следующем уровне – самого С-S-H-геля, составленного из частиц, и, как следствие, увеличению объемной плотности упаковки частиц С-S-H-геля ( $\eta$ ), а, соответственно, снижению объемной доли микропор С-S-H-геля ( $1 - \eta$ );

- повышения объемной доли  $\varphi_2$  фазы С-S-H-геля плотной гексагональной упаковкой частиц ( $\eta_2 = 0,76$ ) по сравнению с объемной долей  $\varphi_1$  фазы с кубической упаковкой частиц ( $\eta_1 = 0,64$ ); соответственно, повышения модуля упругости и твердости С-S-H-геля, которые прямо пропорциональны объемной плотности упаковки частиц ( $M, H \sim \eta$ ); относительное приращение параметров С-S-H-геля ( $\varphi, M, H$ ) по данным наноиндентирования коррелировало с изменением модулей упругости, сдвига ( $E, G$ ) и плотности  $\rho$  наномодифицированного цементного камня, следствием чего являлось повышение механических и эксплуатационных характеристик бетона; при испытаниях на трещиностойкость – изменение значений коэффициентов интенсивности напряжений.

Направленное воздействие на структуру С-S-H-геля можно регулировать в том числе: изменением количества наночастиц; изменением пропорций наночастиц МУНТ /  $\text{SiO}_2$ ; при сохранении дозы – изменением удельной поверхности наночастиц (за счет уменьшения или увеличения размеров наночастиц), что принципиально не позволяли варьировать известные способы наномодифицирования бетонов, основанные на результатах испытаний только готовых коммерчески доступных форм наночастиц.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментально обоснованные рациональные сочетания компонентов КД в бетон, включающей комбинацию наночастиц МУНТ и  $\text{SiO}_2$  в диапазоне 0,00003–0,0009 % и 0,000001–0,000008 % от массы цемента, соответственно, и поликарбоксилатный суперпластификатор в количестве 0,32–0,5 % от массы цемента, подтвержденные повышением механических и физических характеристик: повышение прочности бетона при сжатии – для раннего возраста (1-е, 7-е сутки) – более 90 %, в возрасте 28 суток – до 77 % (по сравнению с бетоном без добавок) и до 57 % по сравнению с бетоном, содержащим равное количество применяемого в добавке пластификатора; повышение коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге; увеличение марки бетона по водонепроницаемости до W20 и по морозостойкости – до F500.

2. Экспериментальное подтверждение механизма действия комбинированной нанодобавки на структуру C-S-H-геля по результатам применения комплекса методов ТГ, РФА, ИК-спектроскопии, упругих ультразвуковых волн, НИ, заключающегося в:

- изменении скорости и степени поликонденсации кремнекислородных тетраэдров – продуктов гидратации алита – и коррелирующем повышении доли низкоосновных гидросиликатов кальция C-S-H (I) и тоберморитподобных структур с пониженными значениями отношения Ca / Si в составе фаз C-S-H-геля, что приводит к повышению упорядоченности структуры наночастиц C-S-H-геля, и как следствие, к повышению упорядоченности и объемной плотности укладки этих наночастиц в фазах C-S-H-геля, пропорциональному увеличению приведенного модуля упругости, твердости, механических характеристик портландцементного камня и бетона.

3. Экспериментально обоснованная возможность сокращения себестоимости наномодифицирования бетона за счет применения взаимоусиливающего синергетического эффекта действия комбинации наночастиц (МУНТ + SiO<sub>2</sub>) на структуру C-S-H-геля и снижения расхода наночастиц, в десятки раз меньших по сравнению с исследуемыми (порядка 10<sup>-6</sup>–10<sup>-4</sup> % от массы цемента).

4. Результаты производственной апробации комплексной добавки, внедренной в опытно-производственных бетонных смесях при строительстве объекта Белорусской АЭС, подтвердившие ее экономический эффект.

**Личный вклад соискателя.** Автором самостоятельно получены основные результаты, изложенные в диссертационной работе. Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора Леоновича С. Н., совместно с которым осуществлялось определение цели и задач исследования, планирование эксперимента, обсуждение и обобщение полученных результатов. Автор принимала непосредственное участие в подготовке и проведении исследований, анализе и интерпретации полученных данных, написании статей.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные положения и результаты научной работы представлялись и докладывались на научных конференциях: «Ефективні технології в будівництві» (Киев, 2018–2019, 2021 гг.); «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» (Новополоцк, 2018–2019 гг.); «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (Брест, 2018 г.); «Перспективные материалы и технологии» (Брест, 2019 г.); «Современные тенденции развития строительной отрасли» (Минск – Нур-Султан, 2019 г.); «Проблемы современного строительства» (Минск, 2019 г.); «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» (Новополоцк, 2019 г., 2021 г.); «Перспективные технологии, материалы, оборудование и системы» (Минск, 2020 г.); «Энергоэффективное строительство, безопасность инженерных объектов и мониторинг загрязнения окружающей среды 2020» (Брест, 2020 г.); «Исследования, проектирование и САПР в строительстве: теория и практика» (Брест, 2021 г.).

**Опубликование результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 56 публикациях, в том числе в 23 статьях в рецензируемых журналах, 8 из которых включены ВАК РБ в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, в 26 статьях и материалах докладов научно-технических конференций, в 1 моно-

графии; получено 3 патента; разработан 1 межгосударственный стандарт, 2 производственно-практических издания.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертационной работы 191 стр., который включает 79 рисунка и 44 таблицы; приложения на 229 стр. Библиографический список включает 304 наименований зарубежных и отечественных авторов, из которых 56 – авторские работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** диссертации представлен анализ результатов наномодифицирования цементных материалов. По результатам анализа работ (S. P. Shah, L. P. Singh, U. Sharma, M. H. & P. Zhang, F.-J. Ulm, К. Соболева, И. Н. Пудова, С. Ю. Петрунина и др.) была определена необходимость выполнения исследований по развитию способа модифицирования портландцементного бетона с применением комбинированной добавки в диапазоне малых доз, содержащей наночастицы разного химического состава и имеющей разные физико-химические свойства поверхности, с выявлением их эффекта комбинацией методов.

По результатам анализа были сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** приведены характеристики материалов и методики испытаний, использованных в исследованиях.

В испытаниях использованы: портландцемент ПЦ500 Д0 (ЦЕМ 42,5Н) белорусских цементных заводов ОАО «Белорусский цементный завод» и ОАО «Красносельскостройматериалы»; песок природный с  $M_k = 1,79-2,0$ ,  $\rho_n = 1,54-1,63$  г/см<sup>3</sup>; щебень фр. 5–10 и 5–20 мм с  $\rho_{щ} = 1,38$  г/см<sup>3</sup> и  $\rho_{щ} = 1,4-1,46$  г/см<sup>3</sup>, соответственно; нанодобавки; МУНТ с диаметром 10–300 нм, длиной 0,01–20 мкм,  $\rho^H = 0,15-0,22$  г/см<sup>3</sup>, удельной поверхностью от 60 м<sup>2</sup>/г и гидротермальный нанокремнезем с содержанием SiO<sub>2</sub> в золе 120 г/дм<sup>3</sup>,  $\rho = 1,075$  г/см<sup>3</sup>, удельной поверхностью 500 м<sup>2</sup>/г и с диаметром наночастиц SiO<sub>2</sub> 5,5 нм. В качестве СП применялся поликарбоксилатный сополимер  $\rho = 1,1-1,14$  г/см<sup>3</sup>. Дополнительно были использованы (таблица 1, состав № 31): расширяющая сульфаталюминатная добавка (РСАМ) и микрокремнезем конденсированный МКУ-85.

**В третьей главе** на основе технологий получения гидротермального золя SiO<sub>2</sub> и водной дисперсии частиц углеродного наноматериала реализована технология приготовления стабилизированной суспензии комплексной добавки; разработаны составы цементных материалов в диапазоне малых доз наночастиц (таблица 1).

Таблица 1. – Составы цементных материалов для исследований в главах 4 и 5

Номер состава	Наименование состава	Состав сырьевой смеси, кг/м <sup>3</sup>				7 ОК / РК, см	8 В/Ц	9 Средняя плот- ность ρ, кг/м <sup>3</sup>	10 Количество вводимой добавки (в водном растворе), % от массы цемента	11 Массовая доля СП (в сухом состоя- нии), % от массы цемента	12 Массовая доля тв. МУНТ, % от массы цемента	13 Массовая доля тв. SiO <sub>2</sub> , % от массы цемента
		3 Цемент	4 Песок	Щебень								
				5 Ф. 5-10 мм	6 Ф. 5-20 мм							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	CI-RS					4	0,43	2405	–	–	–	–
2	CI-SP <sub>50</sub>					2	0,39	2415	0,8	0,4	–	–
3	CI-NS <sub>1,700</sub>					3	0,49	2385	0,8	–	–	0,003 525
4	CI-NS <sub>1,70</sub>					2	0,35	2430	0,8	–	–	0,000 353
5	CI-NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					3	0,25	2465	0,8	0,4	–	0,000 001
6	CI-NS <sub>4</sub> SP <sub>50</sub>					2	0,24	2470	0,8	0,4	–	0,000 003
7	CI-NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>					4	0,26	2465	0,8	0,4	–	0,000 006
8	CI-NS <sub>100</sub> SP <sub>50</sub>					2	0,27	2460	0,8	0,4	–	0,000 075
9	CI-NC <sub>15</sub> SP <sub>50</sub>					4	0,35	2430	0,8	0,4	0,000 03	–
10	CI-NC <sub>50</sub> SP <sub>50</sub>	350			1040	3	0,34	2430	0,8	0,4	0,000 04	–
11	CI-NC <sub>100</sub> SP <sub>50</sub>		975	–		3	0,38	2420	0,8	0,4	0,000 11	–
12	CI-NC <sub>50</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					3	0,3	2450	0,8	0,4	0,000 04	0,000 001
13	CI-NC <sub>50</sub> NS <sub>4</sub> SP <sub>50</sub>					3	0,27	2465	0,8	0,4	0,000 04	0,000 003
14	CI-NC <sub>50</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>					2	0,24	2480	0,8	0,4	0,000 04	0,000 006
15	CI-NC <sub>25</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>					3	0,26	2460	0,8	0,4	0,000 02	0,000 006
16	CI-NC <sub>100</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					3	0,32	2440	0,8	0,4	0,000 08	0,000 001
17	CI-NC <sub>100</sub> NS <sub>4</sub> SP <sub>50</sub>					2	0,29	2450	0,8	0,4	0,000 08	0,000 003
18	CI-NC <sub>100</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>					2	0,24	2470	0,8	0,4	0,000 08	0,000 006

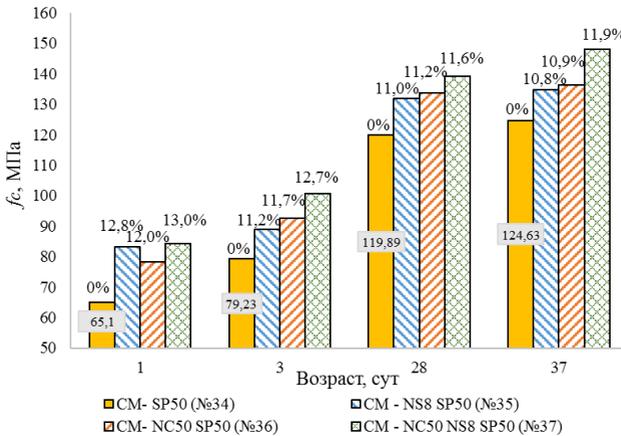
Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
19	C2-RS					21	0,45	2395	—	—	—	—
20	C2-SP <sub>50</sub>					22	0,42	2420	1,0	0,5	—	—
21	C2-NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					21	0,37	2425	1,0	0,5	—	0,000 001
22	C2-NC <sub>600</sub> SP <sub>50</sub>					21	0,35	2430	1,0	0,5	0,000 6	—
23	C2-NC <sub>50</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>	445	820	—	1035	21	0,3	2450	1,0	0,5	0,000 05	0,000 008
24	C2-NC <sub>50</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					21	0,3	2450	1,0	0,5	0,000 05	0,000 001
25	C2-NC <sub>300</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					22	0,29	2450	1,0	0,5	0,000 31	0,000 001
26	C2-NC <sub>600</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					21	0,26	2460	1,0	0,5	0,000 6	0,000 001
27	C2-NC <sub>900</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>					21	0,26	2465	1,0	0,5	0,000 9	0,000 001
28	C3-NC <sub>750</sub> SP <sub>40</sub>	400	820	—	1020	22	0,25	2465	0,8	0,32	0,000 6	—
29	C4-NC <sub>750</sub> SP <sub>40</sub>	445	820	—	1035	24	0,26	2465	0,5	0,2	0,000 38	—
30	C5-NC <sub>750</sub> SP <sub>40</sub>	460	950	880	—	53	0,28	2455	0,5	0,2	0,000 38	—
31	*C6-NC <sub>750</sub> SP <sub>40</sub>	485	800	825	—	64	0,25	2465	0,8	0,32	0,000 6	—
32	C7-NC <sub>600</sub> NS <sub>5</sub> SP <sub>40</sub>	445	820	—	1035	22	0,25	2465	0,8	0,4	0,000 48	0,000 004
33	CM	1720	—	—	—	—	0,26	—	—	—	—	—
34	CM-SP <sub>50</sub>					—	0,21	—	0,8	0,4	—	—
35	CM-NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>	1880	—	—	—	—	0,21	—	0,8	0,4	—	0,000 006
36	CM-NC <sub>50</sub> SP <sub>50</sub>					—	0,21	—	0,8	0,4	0,000 04	—
37	CM-NC <sub>50</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>					—	0,21	—	0,8	0,4	0,000 04	0,000 006

\*В состав сырьевой смеси входит 40 кг РС/АМ и 45 кг МКУ на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси (состав № 31).

**В четвертой главе** изложены результаты экспериментальной оценки влияния компонентов комплексной добавки на свойства цементного камня. При оценке прочностных характеристик выявлено, что введение добавки при прочих равных условиях эффективно для всех типов используемых вяжущих.

Изучен механизм влияния наночастиц на структуру С-С-Н-геля методами ТГ – РФА – ИК-спектроскопии – упругих уз-волн – НИ на образцах цементного камня при содержании МУНТ 0,00004 % и наночастиц SiO<sub>2</sub> 0,000006 % от массы цемента, при котором достигался максимальный эффект повышения прочности при сжатии тяжелого бетона удобоукладываемостью П1. Исследования прочности при сжатии цементного камня (рисунок 1) показали, что в раннем возрасте (1-е сут и 3-и сут) разница между образцом состава № 34, содержащим только СП, и образцами, модифицированными НЧ SiO<sub>2</sub> и МУНТ (составы № 35–37) достигала 13 %, в возрасте 28 сут – 11,6 %, и была максимальной в случае применения комбинации НЧ SiO<sub>2</sub> + МУНТ. Разница по прочности при изгибе между образцом состава № 34 и образцами, модифицированными указанными добавками, была максимальной для состава с комплексной добавкой НЧ SiO<sub>2</sub> + МУНТ и в возрасте 1 сут и 3 сут достигала 39,6 % и 21,6 %, а в возрасте 37 сут – 23,4 %. Отношение  $f_t / f_c$  возросло на  $118,23 / 38,72 = 0,131$ , что указывает на повышение упругопластических свойств и трещиностойкости цементного камня.



**Рисунок 1. – Прочность при сжатии в зависимости от возраста цементных образцов**

По данным термогравиметрии, в возрасте 28 сут количество гидратной воды по интервальным потерям массы 20–400 °С было относительно больше на 4,5 % в образце состава № 37 (СП + НЧ SiO<sub>2</sub> + МУНТ), количество связанной воды, относящейся к портландиту, больше на 4,77 %, полное количество химически связанной воды на 4,5 % больше по сравнению с образцом состава № 34 (СП без НЧ).

С помощью РФА получили количественные данные по концентрации основных клинкерных минералов портландцемента и продуктов их гидратации. Исследова-

ния были проведены в возрасте 4 часов, 1 и 28 суток. Совмещенные дифрактограммы образцов составов № 33–37 в возрасте 28 сут представлены на рисунке 2.

Минеральные фазы на рисунке 2 обозначены цифрами 1–5 и соответствуют: 1 – алит ( $C_3S$ ); 2 – сумма алита и белита ( $C_3S + C_2S$ ); 3 – кальций-алюминат ( $C_3A$ ); 4 – портландит ( $Ca(OH)_2$ ); 5 – ГАК – гидрат алюмината кальция.

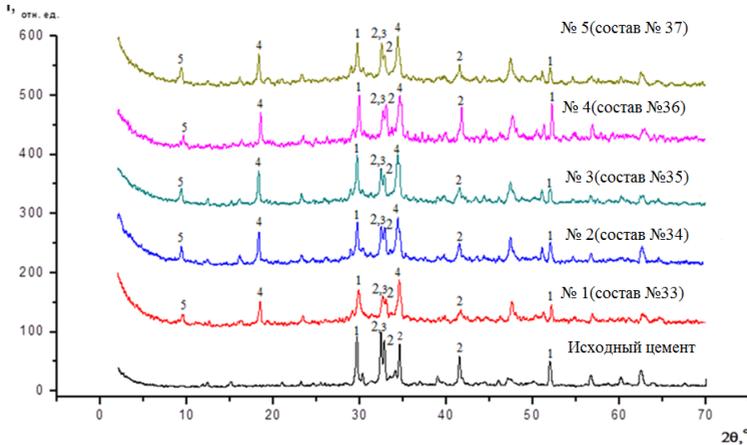
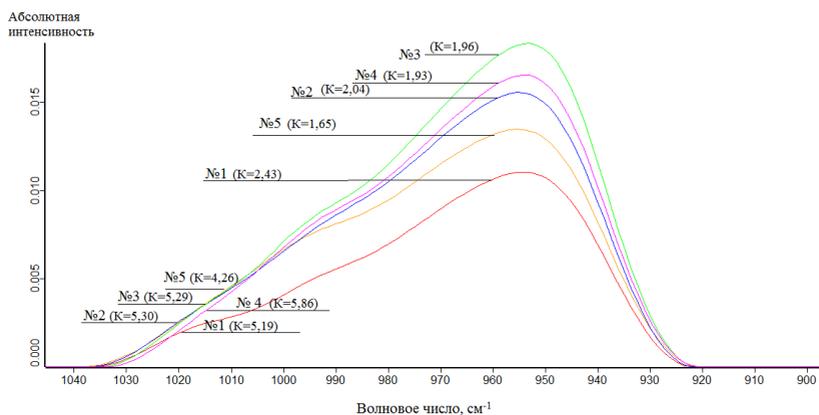


Рисунок 2. – Совмещенные дифрактограммы образцов в возрасте 28 суток

При использовании метода ИК-спектроскопии в возрасте 4 ч, 1 и 28 сут малые дозы наночастиц позволили выделить эффект влияния наночастиц на степень полимеризации С-S-H-геля отдельно от влияния на скорость его образования. При переходе от возраста 4 ч к 1 сут произошло смещение основного максимума алита (полос 926, 524, 463  $cm^{-1}$ ) в коротковолновую область 957  $cm^{-1}$ , что соответствовало формированию гидросиликатов с повышенной степенью поликонденсации кремнекислородного тетраэдра (ККТ)  $n_1$ . В возрасте 1 сут в диапазоне обратных длин волн ( $1/\lambda$ ) = 900–1100  $cm^{-1}$  с помощью программы «Ориджин» (Origin) выявлена точка перегиба в районе 987–989  $cm^{-1}$ , соответствующая гидросиликатам кальция с повышенной степенью поликонденсации кремнекислородного тетраэдра  $n_2$ . По значениям нормализованных интенсивностей в точке перегиба определено, что содержание гидросиликатов кальция с повышенной степенью поликонденсации  $n_2$  в образцах составов № 35–37, модифицированных наночастицами, на 18–22,1 % выше по сравнению с образцом состава № 34 (СП, без НЧ). По значениям коэффициента К, представляющего отношение нормализованных интенсивностей в основном максимуме и в точке перегиба, определили, что доля гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации  $n_2$  по отношению к гидросиликатам с  $n_1$  в образце состава № 35 (НЧ  $SiO_2$ ) и в образце состава № 36 (НЧ  $SiO_2 + МУНТ$ ) была существенно выше (на 12,6 %) по сравнению с образцом состава № 34, модифицированным только СП.

Для образцов составов № 33–37 (рисунок 3) в возрасте 28 сут в ИК-спектрах выделены две точки перегиба – в районе 993–996  $cm^{-1}$  и 1016–1018  $cm^{-1}$ , располо-

женные в более коротковолновой области по сравнению с точкой перегиба в возрасте 1 сут. Это указывало на переход гидросиликатов со степенями поликонденсации кремнекислородных тетраэдров, близкими к 1, наблюдавшимися в ИК-спектрах в возрасте 1 сут, за счет их объединения в структуры с более высокой степенью поликонденсации (28 сут). По отношению абсолютных интенсивностей в основном максимуме содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации  $n_1$  в образце состава № 35 (СП + НЧ SiO<sub>2</sub>) было выше по сравнению с образцом состава № 34 (СП, без НЧ) на 14,6 %. Содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации  $n_4$ , соответствующей первой точке перегиба, в образцах составов № 35 (СП + НЧ SiO<sub>2</sub>), № 36 (СП + НЧ МУНТ) по сравнению с образцом состава № 34 было выше на 18,1 %; 10,4 %. Соответственно, по величине коэффициента  $K_1$  отношение содержания гидросиликатов со степенью поликонденсации  $n_4$  и  $n_1$  для образца состава № 37 было выше для образца состава № 34 на 20 % (12,6 % в возрасте 1 сут) вследствие более высокой скорости поликонденсации ККТ в образцах, модифицированных комбинацией наночастиц (SiO<sub>2</sub> + МУНТ). Содержание гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации кремнекислородных тетраэдров  $n_5$ , соответствующей второй точке перегиба, было выше на 13,3 % в образце состава № 35 по сравнению с образцом № 34. По величине коэффициента  $K_2$  доля гидросиликатов кальция со степенью поликонденсации ККТ  $n_5$  по отношению к гидросиликатам со степенью поликонденсации  $n_1$  выше на 24,4 % в образце № 37 по сравнению с образцом № 34 вследствие ускорения кинетики поликонденсации ККТ и образования структур с повышенной степенью поликонденсации  $n_5$  в присутствии комбинации наночастиц SiO<sub>2</sub> + МУНТ.



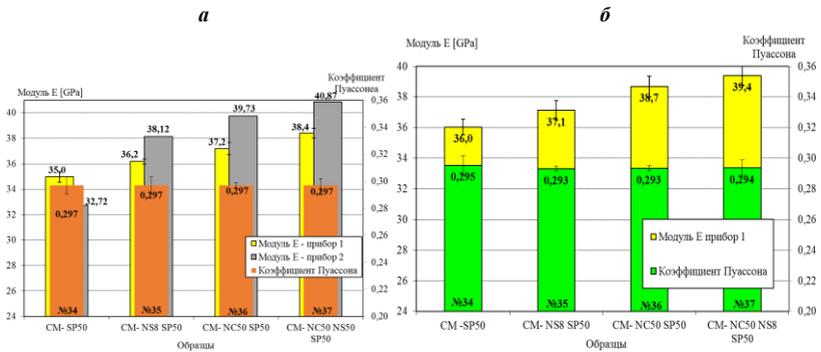
№ 1 – состав № 33 (красный); № 2 – состав № 34 (синий), № 3 – состав № 35 (зеленый), № 4 – состав № 36 (розовый), № 5 – состав № 37 (оранжевый)

**Рисунок 3.** – Сравнение контура полосы поглощения валентных колебаний кремнекислородного тетраэдра образцов в возрасте 28 суток по абсолютным интенсивностям

Для ультразвуковых измерений были использованы: генератор-приемник прямоугольных импульсов модели 5077PR, который в сочетании с осциллографом и соответствующими датчиками обеспечивал ультразвуковые измерения (далее – прибор 1). При использовании частоты 5 МГц и соответствующих преобразователей формировались ультразвуковые поперечные волны длиной порядка 0,5 мм либо продольные волны длиной 1 мм. Также использовался прибор ПУЛЬСАР-2.2 (далее – прибор 2) с частотой 0,05 МГц.

При ультразвуковых измерениях на приборе 1 и на приборе 2 получились сопоставимые результаты. По результатам получено повышение модулей упругости и сдвига, а также плотности модифицированных образцов составов № 34–37 в возрасте 1 мес. и 5 мес. (рисунки 4а, 4б и таблица 2). Максимальное увеличение указанных параметров (до 10 %) наблюдалось у образцов, модифицированных комбинацией НЧ SiO<sub>2</sub> + МУНТ.

Приращение  $E$ ,  $G$  и  $\rho$  соотносится с повышением  $f_c$  и  $f_t$ . Повышение плотности  $\rho$  дополнительно указывает на изменение поровой структуры цементного камня и структуры С-С-Н-геля.



**а** – по приборам 1 и 2 в возрасте 40 сут; **б** – по прибору 1 в возрасте 5 месяцев  
**Рисунок 4. – Модуль упругости E и коэффициент Пуассона**

**Таблица 2. – Результаты расчетов E, G, v**

Номер состава	Модуль упругости E, 10 <sup>9</sup> Па, в возрасте		Коэффициент Пуассона nu, в возрасте		Плотность, кг/м <sup>3</sup> , в возрасте		Модуль сдвига G, 10 <sup>9</sup> Па, в возрасте	
	1 мес.	5 мес.	1 мес.	5 мес.	1 мес.	5 мес.	1 мес.	5 мес.
34	34,98	36,04	0,288	0,296	2077,8	2070,5	13,57	13,91
35	36,19	37,12	0,293	0,293	2142,6	2136,3	14,00	14,35
36	37,20	38,68	0,293	0,293	2202,0	2225,9	14,39	14,96
37	38,42	39,4	0,313	0,294	2239,8	2266,4	14,63	15,22

Методом наноиндентирования была подтверждена ранее установленная разность прочности при сжатии  $f_c$  между контрольным образцом состава № 34 и модифицированными образцами составов № 35, 36 и 37. По результатам деконволюции гистограмм распределения точек наноиндентирования получены средние значения модуля упругости  $M_{cp}$  и твердости  $H_{cp}$ , вычисленные как сумма произведе-

ний среднего значения  $M$ ,  $H$  в каждой фазе на ее объемную долю. Для образцов составов № 34–37 значения составляли: 1 – 18,00 ГПа, 1,32 ГПа; 2 – 39,79 ГПа, 1,40 ГПа; 3 – 29,13 ГПа, 1,14 ГПа; 4 – 32,14 ГПа, 1,49 ГПа. Средние по объему значения  $M_{\text{ср}}$ ,  $H_{\text{ср}}$  для образцов составов № 35–37, модифицированных наночастицами, были выше, чем в образцах состава № 34.

Полученные результаты показывают, что гистограммы распределения объема по приведенному модулю упругости и твердости в образцах составов № 35–37 сдвинулись в область больших средних значений по сравнению с образцом состава № 34. При этом уменьшилась объемная доля фазы 1 с меньшими средними значениями  $M$  и  $H$  и возросла объемная доля фаз 2 и 3 с большими средними значениями  $M$ ,  $H$  и с более плотной объемной упаковкой частиц С-С-Н-геля. Для фаз 1, 2, 3 распределение по  $M_{\text{ср}}$  и для фазы 3, имеющей максимальное среднее значение  $H_{\text{ср}}$ , уменьшилась ширина распределения в образцах составов № 35–37 по соответствующей функции Гаусса, что характеризуется уменьшением отношения  $StdDev / M_{\text{ср}}$ ,  $H_{\text{ср}}$  ( $StdDev$  – показатель в экспоненте функции Гаусса), и показывает более высокую структурную упорядоченность С-С-Н-геля в образцах, модифицированных наночастицами.

Методом наноидентирования установлено существенное смещение объемной доли фаз С-С-Н-геля в область больших средних значений  $M_{\text{ср}}$  и  $H_{\text{ср}}$  и уменьшение отношения  $StdDev / M_{\text{ср}}$ ,  $H_{\text{ср}}$  для выделенных фаз, что свидетельствует о большей плотности упаковки частиц геля, более высокой структурированности вещества геля, и может быть соотнесено с различиями характеристик ( $E$ ,  $G$ ,  $\rho$ ,  $f_c$ ,  $f_i$ ).

**В пятой главе** изложены результаты экспериментальной оценки влияния малых доз наночастиц гидротермального золя  $\text{SiO}_2$  и углеродных нанотрубок как совместно, так и по отдельности на реологические характеристики бетонных смесей, а также механические и физические характеристики образцов тяжелого бетона. Установлена оптимальная дозировка всех компонентов комплексной добавки, которая приводит к синергетическому эффекту, т. е. к улучшению макрохарактеристик бетона за счет направленного влияния наночастиц на структуру бетона.

Эксперименты с тяжелым бетоном показали улучшение механических и физических характеристик в диапазоне малых доз наночастиц МУНТ и  $\text{SiO}_2$ , вводимых в общем количестве добавки 0,5–1,0 % от массы цемента и значений  $V / Ц = 0,21–0,49$ .

Влияние комплексной добавки на бетонные смеси с удобоукладываемостью П1 (ОК = 1–4 см) оценивалось прочностью бетона на сжатие в возрасте на 1-е, 7-е, 14-е и 28-е сутки (номинальный состав: Ц = 350 кг, П = 975 кг, Щ = 1040 кг). Обобщенные результаты испытаний по определению раздельного и совместного действия наночастиц представлены на рисунке 5.

Из рисунка 5 следует, что использование поликарбоксилатного суперпластификатора (состав № 2) приводит к повышению прочности на сжатие на 10 %, а при совместном использовании с гидротермальным нанокремнеземом (состав № 7) или с наночастицами МУНТ (состав № 10) – к увеличению прочностных показателей, превышающих показатели бездобавочного бетона на 28-е сутки до 25 %. При использовании совместно всех компонентов добавки в проектном возрасте прочность состава № 14 возросла до 77 % по сравнению с бездобавочным составом.

Приращение прочности бетона при сжатии в случае применения комбинации наночастиц SiO<sub>2</sub> и МУНТ превышало сумму приращений прочности при сжатии в случае ввода наночастиц SiO<sub>2</sub> и МУНТ отдельно в возрасте 1 сут – на 35 %, 7 сут – на 15 %, 28 сут – на 7 %.

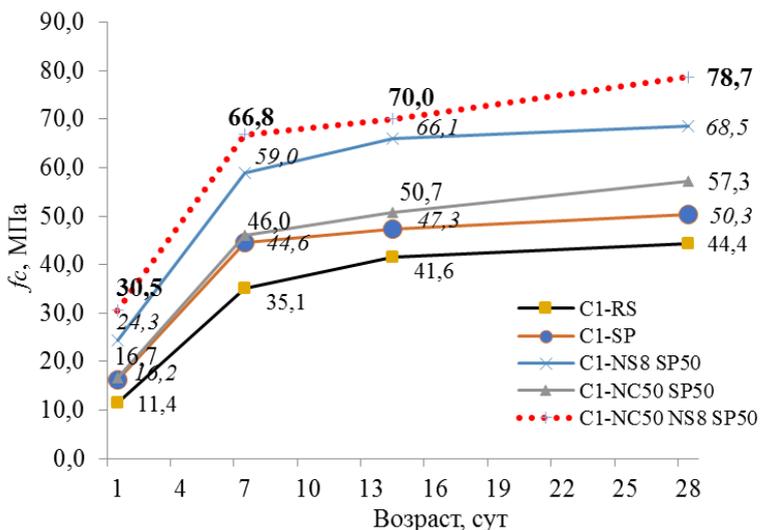


Рисунок 5. – Влияние комплексной добавки на прочностные характеристики тяжелого бетона (ОК = 1–4 см)

Обобщенные результаты механических испытаний раздельного и совместного действия наночастиц (удобоукладываемость П5, номинальный состав: Ц = 445 кг, П = 820 кг, Щ = 1035 кг) представлены на рисунке 6.

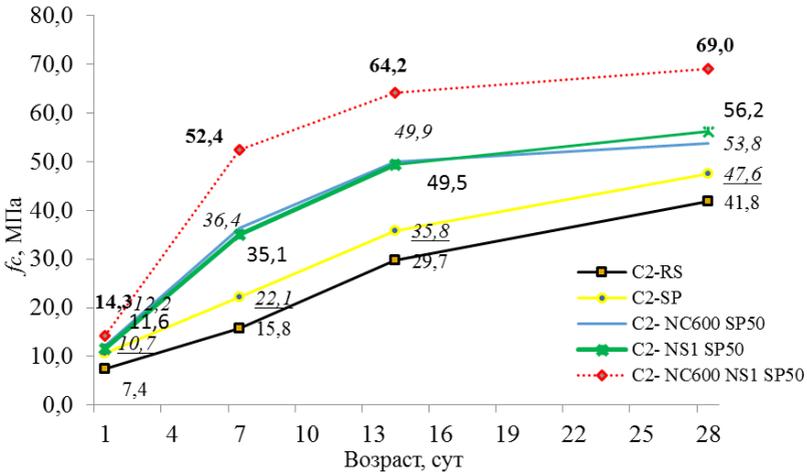


Рисунок 6. – Влияние комплексной добавки на прочностные характеристики тяжелого бетона (ОК = 21–25 см)

Приращение прочности бетона при сжатии в случае применения комбинации наночастиц SiO<sub>2</sub> и МУНТ превышало сумму приращений прочности на сжатие при вводе наночастиц SiO<sub>2</sub> и МУНТ отдельно в возрасте 1 сут на 11,2 %, 28 сут – на 14,6 % при максимальном значении прочности для состава № 26, содержащего комплексную добавку.

Результаты испытаний бетона с комплексной добавкой составов № 23–27 представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты механических испытаний бетона (ОК = 21–25 см)

Номер состава	Наименование состава	Количество вводимой добавки, % от массы цемента	В / Ц	Прочность на сжатие, МПа			
				1 сут	7 сут	14 сут	28 сут
23	C2-NC <sub>50</sub> NS <sub>8</sub> SP <sub>50</sub>	1,0	0,3	15,8	51,8	59,2	63,5
24	C2-NC <sub>50</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>		0,3	14,0	53,5	62,2	64,0
25	C2-NC <sub>300</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>		0,28	14,2	55,1	64,4	65,4
26	C2-NC <sub>600</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>		0,29	14,3	52,4	64,2	69,0
27	C2-NC <sub>900</sub> NS <sub>1</sub> SP <sub>50</sub>		0,31	14,2	52,2	59,1	68,1

Бетон состава № 26, включавший комплексную добавку в количестве 1 % от массы цемента, обеспечил требуемый класс по подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси П5 и сохранение удобоукладываемости в течение 2 ч, необходимой в том числе для перекачки по вертикали под давлением по бетонопроводам и заливки в узкие формы и в формы с арматурой, при относительно низком В / Ц = 0,29 и, соответственно, самой высокой прочности при сжатии в составах № 23–27.

Для оценки прочности бетона получены уравнения регрессии (при отклонении расчетных и экспериментальных данных не более 5 %), адекватно отражающие ее зависимость от входящих в состав комплексной добавки компонентов:

$$y = 69,12 + 9,65x_1 + 1,7x_2 - 2,45x_1x_1 - 6,4x_2x_2 + 0,92x_1x_2, \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$y = 64,24 + 4,95x_1 + 5,75x_2 - 4,97x_1x_1 - 2,47x_2x_2 + 0,53x_1x_2, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  – соответственно количество наночастиц  $\text{SiO}_2$  и МУНТ в добавке, г. Уравнение (1) – с удобоукладываемостью бетонной смеси П1, уравнение (2) – с удобоукладываемостью П5 (обоснование приведено в диссертации).

В результате это позволило определить оптимальную дозировку компонентов комплексной добавки в бетон, включающей комбинацию наночастиц МУНТ и  $\text{SiO}_2$  в диапазоне 0,00003–0,0009 % и 0,00001–0,00008 % от массы цемента, соответственно.

Исследование прочности, трещиностойкости и долговечности конструкционного бетона осуществлялось в аккредитованной строительной лаборатории генподрядчика по строительству Белорусской атомной электростанции (БелАЭС).

Цель исследования заключалась в замене добавок, применяемых на БелАЭС, на добавки, содержащие в своем составе наночастицы углерода и кремнезема  $\text{SiO}_2$  как раздельно, так и в паре. Экспериментально исследованы и коллегиально запротоколированы 5 Серий (составы № 28–32) с различным содержанием компонентов бетонной смеси. После проведения лабораторных (в которых дополнительно варьировались показатель удобоукладываемости и количество вводимой добавки; причем для каждой серии был исследован состав с уменьшением количества цемента на 10 %) и предпроизводственных испытаний осуществлялись производственные замесы на промышленном бетонно-растворном узле БРХ РУП «Белэнергострой». Главенствующим показателем для БелАЭС была удобоукладываемость бетонной смеси по показателю подвижности.

При вводе в бетонную смесь комплексной добавки, содержащей 750 г/т НЧ МУНТ, достигали подвижности по удобоукладываемости класса П5 при сохранности 180 мин, для самоуплотняющихся смесей – P4–P6 при сохранности 120 мин, класса по вязкости – VS1 (1,5–4,0); класса по способности бетонной смеси преодолевать сопротивление арматурных стержней в L-образном ящике – PA1 (0,2–0,6), класса по устойчивости к расслаиванию с использованием сита SR1 (2,0 %).

В производственных замесах произведены и испытаны образцы (с В / Ц = 0,33–0,39) с комплексной добавкой на прочность при сжатии, прочность на осевое растяжение, морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение, пористость, в том числе неразрушающими методами, и получено увеличение прочности бетона при сжатии в возрасте 28 суток до 40 %; прочности бетона при осевом растяжении – до 2,9 МПа; прочности бетона на четырехточечный изгиб – от 4,2 до 6,5 МПа. Показатель пористости  $\lambda$  составил 0,88; показатель однородности дифференциального распределения пор по диаметрам  $\alpha$  – 0,4; капиллярная пористость была в диапазоне 2,9–4,9 %. Марку бетона по водонепроницаемости доводили с W8 до W20 и марку по морозостойкости бетона до F500 по сравнению с добавками, используемыми на БелАЭС. Трещиностойкость бетона по значениям коэффициентов  $K_{\text{с}}$  при нормальном отрыве и  $K_{\text{сц}}$  при поперечном сдвиге была выше для варианта ввода комбинации наночастиц  $\text{SiO}_2$  и МУНТ по сравнению с вариантом ввода наночастиц МУНТ отдельно.

Производственная проверка основных положений технологии приготовления и применения стабилизированной комплексной добавки подтвердила результаты диссертационного исследования. Согласно актам внедрения, использование в комплексной добавке малых доз гидротермальных наночастиц  $\text{SiO}_2$  и наночастиц МУНТ привело к снижению стоимости каждого  $1 \text{ м}^3$  бетонной смеси (до 34 бел. руб.) и получению дополнительного эффекта повышения физико-механических характеристик бетона за счет направленного действия на структуру С-S-H-геля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Впервые разработаны научно-практические основы получения новой комплексной добавки в бетон с комбинацией наночастиц ( $\text{МУНТ} + \text{SiO}_2$ ) в диапазоне малых доз – в десятки раз меньших по сравнению с исследуемыми, а также экспериментально выявлено их рациональное соотношение с учетом повышения механических и физических характеристик, увеличения долговечности бетона [1–24, 36–40, 43, 45, 48, 51–56].

2. Экспериментально обоснован механизм повышения прочности модифицированных цементных композитов комплексом методов:

- по РФА – комплексная добавка способствует повышению доли низкоосновных гидросиликатов кальция С-S-H (I) и тоберморитподобных структур с пониженными значениями отношения  $\text{Ca} / \text{Si}$  в составе фаз С-S-H-геля, увеличению упорядоченности структуры наночастиц и фаз С-S-H-геля;

- ИК-спектральным анализом – за счет повышения скорости и степени полимеризации–поликонденсации кремнекислородных тетраэдров – продуктов гидратации алита, приводящего к повышению упорядоченности и однородности структуры, формы частиц С-S-H-геля и самого С-S-H-геля;

- методом упругих ультразвуковых волн – повышение модулей  $E$  и  $G$ ;

- методом наноиндентирования – повышение модуля упругости и твердости С-S-H-геля, которые прямо пропорциональны объемной плотности упаковки наночастиц [2, 3, 5–9, 19, 21, 23–29, 38, 42, 46–48, 53].

3. Экспериментально обоснована зависимость роста прочности цементного камня и конструкционного бетона от входящих в состав компонентов комплексной добавки. Выявлено, что приращение прочности бетона в случае применения комбинации наночастиц  $\text{SiO}_2$  и МУНТ превышало сумму приращений при вводе наночастиц  $\text{SiO}_2$  и МУНТ отдельно в возрасте 1 сут до 35 %, 7 сут – до 15,0 %, 28 сут – до 14,6 %. При этом установлено, что введение комплексной добавки обеспечивает рост прочности к проектному возрасту для цементного бетона до 57 %, по сравнению с бетоном, содержащим равное количество применяемого в добавке пластификатора, и до 77 % в сравнении с бетоном без добавок.

Экспериментально выявлено влияние комплексной добавки на свойства бетонной смеси и бетона для рецептур, используемых при строительстве БелАЭС (класс  $\text{C}^{20/25}\text{-C}^{50/60}$ ):

- достигали подвижности по удобоукладываемости класса П4–П5 при сохранности 180 мин, для самоуплотняющихся смесей – Р4–Р6 при сохранности 120 мин;

– ранняя прочность бетона при сжатии увеличивалась до 60 %; прочность при сжатии в возрасте 28 суток – до 40 %; доводили прочность бетона при осевом растяжении до 2,9 МПа и прочность бетона на растяжение при четырехточечном изгибе до 6,5 МПа; повышение марки бетона по водонепроницаемости и морозостойкости до W20 и до F500 соответственно по сравнению с добавками, используемыми на БелАЭС [1, 2, 4–19, 22, 30–39, 43, 45, 51–54].

4. Результаты экспериментальной оценки комплексной добавки с комбинацией наночастиц в диапазоне малых доз, позволили реализовать результаты диссертационного исследования в производстве железобетонных изделий – ограждающих конструкций градирен и фундаментных блоков на БелАЭС. Производственная апробация разработанной комплексной добавки подтвердила ее экономический эффект, заключающийся в снижении стоимости бетонной смеси до 34 бел. руб. за 1 м<sup>3</sup> [1, 5–7, 9, 11–16, 18, 19, 23, 31–36, 50, 53, 54].

5. Результаты экспериментальных исследований трещиностойкости конструкционного бетона были использованы при разработке ГОСТ 29167-21 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» [5–7, 9, 20, 23, 41, 44, 49, 53, 55, 56].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Экспериментально-практические результаты диссертационных исследований рекомендуется использовать на строительных объектах, в частности, на энергетических (при строительстве АЭС): при приготовлении тяжелого бетона марки по удобоукладываемости П1 – для повышения скорости набора прочности в ранний период, возможности экономии цемента, снижения водопоглощения; при приготовлении тяжелого бетона марки по удобоукладываемости П4–П5 – для увеличения прочности на 30 % и более, а также для раннего периода срока схватывания – для ускорения оборачиваемости опалубки; при приготовлении самоуплотняющегося тяжелого бетона марки по удобоукладываемости Р4–Р5; при приготовлении самоуплотняющегося тяжелого бетона марки по удобоукладываемости Р6, при условии использования цемента высокой активности М500 (49,9 МПа) и выше.

Основываясь на результатах механизма действия комбинации наночастиц на структуру С-S-N-геля, с учетом связи структурных изменений с макрохарактеристиками полученные результаты можно использовать при приготовлении тяжелого бетона при В / Ц = 0,3–0,5; цементных композитов, замещающих цементных материалов, в частности микрокремнезема и др.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление: монография / С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Е. А. Садовская, Е. Е. Шальей ; под общ. ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2021. – 353 с.

### Статьи в рецензируемых научных журналах

2. Khroustalev, V. M. Composite Materials Based on Cement Binders Modified with SiO<sub>2</sub> Nanoadditives SiO<sub>2</sub> / V. M. Khroustalev, S. N. Leonovich, V. V. Potapov, E. N. Grushevskaya (E. N. Polonina) // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 6. – С. 459–465.

3. Жданок, С. А. Исследование методом ИК-спектроскопии степени активации углеродных наноматериалов для модифицирования конструкционного бетона / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Строительные материалы. – 2020. – № 7. – С. 49–53.

4. Polonina, E. N. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E. N. Polonina, S. N. Leonovich, V. M. Khroustalev, E. A. Sadovskaya, N. A. Budrevich // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, № 3. – P. 189–194.

5. Полонина, Е. Н. Технология бетона, модифицированного комплексной добавкой гидротермального нанокремнезема и многослойных углеродных нанотрубок / Е. Н. Полонина // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2021. – № 2 (125). – С. 27–34.

6. Zhdanok, S. A. Fracture toughness of carbon nanotubes Modified cement based materials / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich // Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3 (126). – С. 48–53.

7. Садовская, Е. А. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, С. А. Жданок, В. В. Потапов // Строительные материалы. – 2021. – № 9. – С. 41–46.

8. Жданок, С. А. Синергетическое влияние наночастиц SiO<sub>2</sub> и углеродных нанотрубок на свойства бетона / С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 109–112.

9. Полонина, Е. Н. Синергетический эффект влияния наночастиц МУНТ и SiO<sub>2</sub> на характеристики портландцементного бетона: эксперимент и теоретическое объяснение / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, В. В. Потапов, С. А. Жданок // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. – 2022. – № 2 (128). – С. 47–51.

### Статьи в других изданиях

10. Потапов, В. В. Модифицирование гидротермальным нанокремнеземом материалов на основе цемента / В. В. Потапов, Е. Н. Грушевская (Е. Н. Полонина), С. Н. Леонович // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 4–9.

11. Жданок, С. А. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталева, Е. А. Коледа // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 67–72.

12. Полонина, Е. Н. / Физико-механические характеристики нанобетона / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа // Научно-электронный журнал «Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета». – 2018. – № 4 (37). – С. 100–111.

13. Жданок, С. А. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал, на свойства самоуплотняющегося бетона / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталева, Е. А. Коледа // Вестник гражданских инженеров / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – 2018. – № 6 (71). – С. 76–85.

14. Коледа, Е. А. Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович, С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, Н. А. Будревич // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2 (6). – С. 24–34.

15. Жданок, С. А. Физико-механические характеристики бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталева, Е. А. Коледа // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 1 (январь-февраль). – С. 14–20.

16. Жданок, С. А. Влияние пластифицирующей добавки на основе наноструктурированного углерода в самоуплотняющейся бетонной смеси на ее технологические свойства / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталева, Е. А. Коледа // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 2 (март-апрель). – С. 391–396.

17. Жданок, С. А. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные материалы / С. А. Жданок, В. В. Потапов, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 3 (май-июнь). – С. 669–673.

18. Садовская, Е. А. Прочность нанопластикобетона на растяжение / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, С. А. Жданок, Е. Н. Полонина // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 4 (июль-август). – С. 1051–1055.

19. Полонина, Е. Н. Механизм повышения прочности цементно-водных образцов, модифицированных наночастицами  $\text{SiO}_2$  и МУНТ / Е. Н. Полонина, В. В. Потапов, С. А. Жданок, С. Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 1 (январь-февраль). – С. 72–83.

20. Садовская, Е. А. Способ контроля качества стелефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Н. А. Будревич // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 85–92.

21. Полонина, Е. Н. Применение метода нанонидентирования для изучения структуры модифицированного цементного камня / Е. Н. Полонина, O. Lahaune, J. Eberhardsteiner, В. В. Потапов, С. А. Жданок, С. Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 5. – С. 1221–1234.

22. Жданок, С. А. Влияние полимерных гиперпластификаторов на различные виды углеродных наноматериалов / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 1. – С. 165–168.

23. Садовская, Е. А. Вязкость разрушения нанопластикобетона при нормальном отрыве и поперечном сдвиге / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович,

С. А. Жданок, В. В. Потапов // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 4. – С. 961–968.

24. Ковшар, С. Н. Оценка седиментационной устойчивости комплексной нанодобавки / С. Н. Ковшар, Е. Н. Полонина, С. А. Жданок, С. Н. Леонович // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 4. – С. 969–976.

#### **Статьи в сборниках научных трудов**

25. Polonina, E. N. Estimation of mechanical properties of modified cement stone by nanoindenting method / E. N. Polonina, S. N. Leonovich // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин : зб. наук. прац. – Київ : КНУБА. – 2019. – Вип. 41. – С. 71–80.

26. Polonina, E. N. Studies of structural-phase changes in a modified cement stone method by derivatographic analysis / E. N. Polonina, S. N. Leonovich // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин : зб. наук. прац. – Київ : КНУБА. – 2020. – Вип.43. – С. 32–41.

#### **Статьи в материалах конференций, семинаров, симпозиумов**

27. Леонович, С. Н. Мониторинг защитного слоя бетона прибором ИПА-МГ4 / С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, А. В. Латыш, Е. Н. Грушевская (Е.Н. Полонина) // Сб. науч. ст. XXI науч.-метод. конф. ВИТУ «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций», Санкт-Петербург, 16 марта 2017 года. – СПб. : ВИТУ. – 2017. – С. 209–213.

28. Коледа, Е. А. Мониторинг набора прочности бетона в монолитных конструкциях неразрушающими методами / Е. А. Коледа, А. В. Латыш, Е. Н. Грушевская (Е. Н. Полонина), П. А. Коворотный, Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович // Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (еврокодов)», Минск, 30 мая 2017 г. – Минск : БНТУ. – 2017. – С. 103–108.

29. Коледа, Е. А. Особенности набора прочности монолитного бетона при изменении рецептуры и отказе от прогрева / Е. А. Коледа, А. В. Латыш, Е. Н. Грушевская (Е. Н. Полонина), П. А. Коворотный, С. Н. Леонович // Сборник докладов по материалам Междунар. науч.-техн. конф. «Технология строительства и реконструкции-2015» (ТСР-2015). – Минск: БНТУ. – 2017. – С. 302–304.

30. Потапов, В. В. Влияние гидротермального нанокремнезема на свойства цементных композиций / В. В. Потапов, Е. Н. Грушевская (Е. Н. Полонина), С. Н. Леонович, Е. А. Коледа // Сб. докл. по материалам междунар. науч.-техн. конф. «Технология строительства и реконструкции-2015» (ТСР-2015). – Минск : БНТУ. – 2017. – С. 305–312.

31. Полонина, Е. Н. Технологические свойства самоуплотняющегося бетона: влияние добавки наноструктурированного углерода / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, Н. А. Будевич // Электронный сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого государственного университета «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 5–6 апреля 2018 г. – Новополоцк : ПГУ. – 2018. – С. 168–172.

32. Полонина, Е. Н. Бетон с добавкой наноструктурированного углерода: физико-механические характеристики / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, Н. А. Будевич // Электронный сб. ст. междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Полоцкого государственного университета «Архитектурно-строительный ком-

плекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 5–6 апреля 2018 г. – Новополоцк : ПГУ. – 2018. – С. 173–178.

33. Полонина, Е. Н. Модифицирование самоуплотняющегося бетона наноструктурированным углеродом / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, Н. А. Будревич // Сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров», Брест, 25–26 октября 2018 г. – Брест : БрГТУ. – 2018. – Ч. 2. – С. 92–95.

34. Полонина, Е. Н. Бетон, модифицированный наноструктурированным углеродом: физико-механические свойства / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа, Н. А. Будревич // Сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров», Брест, 25–26 октября 2018 г. – Брест : БрГТУ. – 2018. – Ч. 2. – С. 96–99.

35. Полонина, Е. Н. Модифицирование бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода: обеспечение прочности и долговечности / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // III Междунар. науч.-техн. конф. «Ефективні технології в будівництві». – Киев : КНУБА. – 2018. – С. 108–109.

36. Полонина, Е. Н. Нанобетон: физико-механические характеристики / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы международных академических чтений, Курск, 23 ноября 2018 года. – Курск, 2018. – С. 8–13.

37. Полонина, Е. Н. Перспективные материалы в строительстве на основе нанотехнологий / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Материалы междунар. симпозиума «Перспективные материалы и технологии», Брест, 27–31 мая 2019 г. / под ред. В. В. Рубаника. – Витебск : ВГТУ, 2019. – С. 75–77.

38. Полонина, Е. Н. Исследование бетонной смеси и тяжелого бетона, модифицированного нанодобавками (гидротермальным нанокремнеземом и многослойными углеродными нанотрубками) / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 267–272.

39. Полонина, Е. Н. Эффективная технология бетона на основе комплексных нанодисперсных систем / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // IV Междунар. науч.-техн. конф. «Ефективні технології в будівництві». – Киев : КНУБА. – 2019. – С. 106–107.

40. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 285–297.

41. Sadouskaya A. Determination of critical stress fiber intensity factor of concrete by tearing off with a splitting / A. Sadouskaya, S. Leonovich, A. Polonina, N. Budrevich // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ. – 2019. – С. 336–341.

42. Полонина, Е. Н. Определение влияния высокотемпературной парогазовой обработки на изменение фазового состава углеродного наноматериала, используемого для повышения набора прочности конструкционного бетона / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, С. А. Жданок // Междунар. науч. конф. «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации». – Новополоцк : ПГУ. – 2019. – С. 284–291.

43. Полонина, Е. Н. Комплексная нанодисперсная система для модифицирования тяжелого бетона / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // Междунар. науч. конф. «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации». – Новополоцк : ПГУ. – 2019. – С. 292–296.

44. Садовская, Е. А. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Н. А. Будревич // Междунар. науч.-техн. конф. «Поведение бетонов и железобетонных конструкций при наличии нагрузок и тепловлажностных воздействий различной длительности», Макеевка, 21 октября 2020 года. – Макеевка : ДОННАСА. – 2020. – С. 47–52.

45. Полонина, Е. Н. Технология бетона, модифицированного комплексной добавкой гидротермального нанокремнезема и многослойными углеродными нанотрубками / Е. Н. Полонина // IX Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства : сб. материалов, Минск, 26–30 октября 2020 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 32–33.

46. Polonina, E. Nanoindentation of cement stone samples / E. Polonina, O. Lahayne, J. Eberhardsteiner, S. Leonovich // International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2020) E3S Web Conf. – 2020. – Vol. 212, № 8. – P. 1–8.

47. Полонина, Е. Н. Определение твердости и модуля упругости цементных материалов методом наноиндентирования / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // IV Междунар. науч.-техн. конф. «Ефективні технології в будівництві». – Киев : КНУБА. – 2020. – С. 153–154.

48. Полонина, Е. Н. Влияние наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / Е. Н. Полонина // Междунар. науч. конф. «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации», Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г. – Новополоцк : ПГУ, 2021. – С. 181–185.

49. Садовская, Е. А. Практическая апробация многопараметричной методики оценки качества фибробетона: лабораторные испытания вязкости разрушения и другие физико-механические характеристики / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы международно академичю чтений, Курск, 18 ноября 2021 года. – Курск, 2021. – С. 51–63.

50. Sadouskaya, A. The compressive strength of steel fibre reinforced concrete obtained by testing cubes and cylinders / A. Sadouskaya, S. Leonovich, N. Budrevich, E. Polonina // MATEC Web of Conferences, Brest, 29 October 2021. – Brest, 2021. – Vol. 350 (2021), 00008.

### **Патенты**

51. Бетонная смесь для изготовления материалов и конструкций : пат. ВУ 23332 / С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Е. А. Садовская. – Опубл. 28.02.2021.

52. Сырьевая смесь для получения тяжелого бетона : пат. ВУ 23328 / С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина. – Оpubл. 30.12.2020.

53. Способ модифицирования бетона комплексной добавкой, включающей гидротермальные наночастицы  $\text{SiO}_2$  и многослойные углеродные нанотрубки : патент РФ №2750497 / В. В. Потапов, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, С. А. Жданок. – Оpubл. 28.06.2021.

#### **Производственно-практические издания**

54. Технологический регламент на приготовление и применение комплексной добавки, включающей гидротермальные наночастицы  $\text{SiO}_2$  и многослойные углеродные нанотрубки, в бетон для производства бетонных и железобетонных изделий и монолитного строительства : ТР-1-2021 / НИЛ ПГС филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт». – Минск : БНТУ, 2021. – 26 с.

55. Многопараметрическая оценка трещиностойкости (вязкости разрушения) и прочностных параметров фибробетона в лабораторных условиях : стандарт предприятия СП-3-2021. – Минск : ООО «Гапас плюс», 2021. – 61 с.

#### **Технические нормативные правовые акты**

56. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 29167-21. – Введ. 01.09.2022. – М. : НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2022. – 20 с.

## РЭЗІЮМЭ

Палоніна Алена Мікалаеўна

**Канструкцыйны бетон, мадыфікаваны комплекснай дабаўкай, якая змяшчае гідратэर्मальны нанакрэмнізем і вугляродныя нанатрубкі**

**Ключавыя словы:** наначасціцы  $\text{SiO}_2$ , нанавуглярод, цэментны камень, бетонная сумесь, бетон, механізм уплыву, метады.

**Мэта працы** – распрацоўка спосабу мадыфікавання партландцэментнага бетону камбінаваным дадаткам, які ўплывае на нанаструктуру C-S-H-геля, для павышэння пругка-механічных характарыстык, паказчыкаў глейка-пластычнага разбурэння і даўгавечнасці.

У выніку тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў распрацаваны рэцэптуры цэментных матэрыялаў, а таксама тэхналогія атрымання стабілізаванай завісі комплекснага дадатку ў дыяпазоне малых доз наначасціц. Распрацаваная тэхналогія дазволіла павысіць рэалагічны характарыстыкі бетонных сумесяў, механічныя і фізічныя характарыстыкі бетону і палепшыць структуру геля гідрасілікатаў кальцыя C-S-H за кошт высокай удзельнай плошчы паверхні і ўдзельнай павярхоўнай энергіі наначасціц  $\text{SiO}_2$  і наначасціц вугляроду. Паверхня наначасціц выконвае ролю дадатковых цэнтраў крышталізацыі часціц гідрасілакатаў кальцыя і полікандэнсатыі крэмнекіслародных тэтраэдраў, спрыяючых: павелічэнню хуткасці гідратацыі аліта і атрымання C-S-H-геля, памяншэння сярэдніх памераў і павышэнню аб'ёмнай шчыльнасці ўпакоўкі часціц і механічных характарыстык у фазах C-S-H-геля, павышэнню структурнай спарадкаванасці ў фазах C-S-H-геля і ў часціцах гідрасілікатаў кальцыя. Вынікам нанамодыфікавання з'яўляюцца змены структуры C-S-H-геля:

– павышэнне аб'ёмнай долі фаз C-S-H-геля, якія маюць больш высокую аб'ёмную шчыльнасць пакавання часціц гідрасілікатаў кальцыя да 29,4 %, і, адпаведна, больш высокія механічныя характарыстыкі – сярэдні модуль пругкасці  $M$  у фазе павышаецца ад 23,2 да 41,7 ГПа; павышэнне сярэдніх па аб'ёме фаз значэнняў  $M$  ад 18,0 да 29–39 ГПа, значэнняў  $H$  – ад 1,32 да 1,40–1,49 ГПа; змяншэнне адносін шырыні размеркавання аб'ёмнай долі C-S-H-геля па модулю пругкасці  $M$  да сярэдняга значэння  $M_{\text{ср}}$  у фазе ад 0,457 да 0,283–0,364 і павышанай структурнай спарадкаванасці ў фазах C-S-H-геля;

– павышэнне ступені полікандэнсатыі крэмнекіслародных тэтраэдраў, якія ўваходзяць у структуру часціц гідрасілікатаў кальцыя, павелічэнне ўтрымання гідрасілікатаў з павышанай ступенню полікандэнсатыі да 18–24 % ва ўзросце 1–28 сут павелічэннем, мацней выяўленым для ўзораў, мадыфікаваных уводам камбінацыі наначасціц  $\text{SiO}_2$  + МУНТ і, такім чынам, спарадкаванасці структуры часціц гідрасілікатаў кальцыя; павышэнне ўдзельнай паверхні часціц гідратаў сіліката кальцыя і адпаведна памяншэнне сярэдняга памеру часціц на 13–18 %.

Выканана вытворчая апрабавая вынікаў даследавання, якая пацвердзіла іх эфектыўнасць.

## РЕЗЮМЕ

Полонина Елена Николаевна

**Конструкционный бетон, модифицированный комплексной добавкой, содержащей гидротермальный нанокремнезем и углеродные нанотрубки**

**Ключевые слова:** наночастицы  $\text{SiO}_2$ , наноуглерод, цементный камень, бетонная смесь, бетон, механизм влияния, методы.

**Цель исследования** – разработка способа модифицирования портландцементного бетона комбинированной добавкой, влияющей на наноструктуру С-S-H-геля, для повышения упруго-механических характеристик, показателей вязкопластичного разрушения и долговечности.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны рецептуры цементных материалов, а также технология получения комплексной добавки в диапазоне малых доз наночастиц. Разработанная технология позволила повысить реологические характеристики бетонных смесей, механические и физические характеристики бетона и улучшить структуру геля гидросиликатов кальция С-S-H за счет высокой удельной площади поверхности и удельной поверхностной энергии наночастиц  $\text{SiO}_2$  и наночастиц углерода. Поверхность наночастиц выполняет роль дополнительных центров кристаллизации частиц гидросиликатов кальция и поликонденсации кремнекислородных тетраэдров, способствуя: увеличению скорости гидратации алита и образования С-S-H-геля, уменьшению средних размеров и повышению объемной плотности упаковки частиц и механических характеристик в фазах С-S-H-геля, повышению структурной упорядоченности в фазах С-S-H-геля и в частицах гидросиликатов кальция. Следствием наномодифицирования являются изменения структуры С-S-H-геля:

- повышение объемной доли фаз С-S-H-геля, имеющих более высокую объемную плотность упаковки частиц гидросиликатов кальция до 29,4 %, и, соответственно, более высокие механические характеристики – средний модуль упругости  $M$  в фазе повышается от 23,2 до 41,7 ГПа; повышение средних по объему фаз значений  $M$  от 18,0 до 29–39 ГПа, значений  $H$  – от 1,32 до 1,40–1,49 ГПа; уменьшение отношения ширины распределения объемной доли С-S-H-геля по модулю упругости  $M$  к среднему значению  $M_{\text{ср}}$  в фазе от 0,457 до 0,283–0,364, и повышение структурной упорядоченности в фазах С-S-H-геля;

- повышение степени поликонденсации кремнекислородных тетраэдров, входящих в структуру частиц гидросиликатов кальция, путем увеличения содержания гидросиликатов с повышенной степенью поликонденсации до 18–24 % в возрасте 1–28 сут, увеличением, сильнее выраженным для образцов, модифицированных вводом комбинации наночастиц  $\text{SiO}_2$  + МУНТ, и, таким образом, упорядоченности структуры частиц гидросиликатов кальция; повышение удельной поверхности частиц гидратов силиката кальция и соответственно, уменьшение среднего размера частиц на 13–18 %.

Выполнена производственная апробация результатов исследования, подтверждающая их эффективность.

## SUMMARY

Polonina Alena Nikolaevna

### **Structural concrete modified with a complex additive containing hydrothermal nanosilica and carbon nanotubes**

**Key words:** SiO<sub>2</sub> nanoparticles, nanocarbon, cement stone, concrete mix, concrete, mechanism of influence, methods.

**Purpose of the study** – development of a method for modifying portlandcement concrete with a combined additive that affects the nanostructure of the C-S-H-gel to improve the elastic-mechanical characteristics, indicators of viscous-plastic fracture and durability.

As a result of theoretical and experimental studies, formulations of cement materials, as well as a technology for obtaining a stabilized suspension of a complex additive in the range of small doses of nanoparticles, have been developed. The developed technology made it possible to improve the rheological characteristics of concrete mixtures, the mechanical and physical characteristics of concrete and improve the structure of the gel of calcium hydro-silicates C-S-H due to the high specific surface area and specific surface energy of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and carbon nanoparticles. The surface of nanoparticles acts as additional centers of crystallization of particles of calcium hydrosilicates and polycondensation of silicon-oxygen tetrahedra, contributing to: an increase in the rate of hydration of alite and the formation of C-S-H-gel, a decrease in the average size and an increase in the volumetric packing density of particles and mechanical characteristics in the phases of C-S-H-gel, an increase in the structural order in the phases C-S-H-gel and in particles of calcium hydrosilicates. The consequence of nanomodification are changes in the structure of the C-S-H-gel:

– an increase in the volume fraction of the C-S-H-gel phases having a higher volume packing density of particles of calcium hydrosilicates up to 29.4 %, and, accordingly, higher mechanical characteristics – the average modulus of elasticity  $M$  in the phase increases from 23.2 to 41.7 GPa; an increase in the volume-averaged  $M$  values from 18.0 to 29–39 GPa,  $H$  values from 1.32 to 1.40–1.49 GPa; a decrease in the ratio of the width of the distribution of the volume fraction of the C-S-H-gel by the modulus of elasticity  $M$  to the average value of  $M$  in the phase from 0.457 to 0.283–0.364, and an increase in the structural ordering in the phases of the C-S-H-gel;

– an increase in the degree of polycondensation of silicon-oxygen tetrahedra included in the structure of calcium hydrosilicate particles, an increase in the content of hydrosilicates with an increased degree of polycondensation up to 18–24 % at the age of 1–28 days, an increase more pronounced for samples modified by the introduction of a combination of SiO<sub>2</sub> + nanoparticles MCNT and, thus, the ordering of the structure of the particles of calcium hydrosilicates; an increase in the specific surface area of calcium silicate hydrates particles and, accordingly, a decrease in the average particle size by 13–18 %.

Production approbation of the research results was carried out, confirming their effectiveness.

Научное издание

**ПОЛОНИНА**  
**Елена Николаевна**

**КОНСТРУКЦИОННЫЙ БЕТОН, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ  
НАНОКРЕМНЕЗЕМ И УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Подписано в печать 02.11.2022. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,73. Тираж 100. Заказ 668.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.