

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 666.972; 693.54

**МАРКО**  
**Ольга Юрьевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМОСНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ  
ДОБАВКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ УГЛЕРОДНЫЙ НАНОМАТЕРИАЛ**

**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     | <b>Батяновский Эдуард Иванович,</b><br>доктор технических наук, профессор,<br>профессор кафедры «Строительные<br>материалы и технология строительства»<br>Белорусского национального технического<br>университета, г. Минск |
| Официальные оппоненты:   | <b>Яглов Валерий Николаевич,</b><br>доктор химических наук, профессор,<br>профессор кафедры «Инженерная экология»<br>Белорусского национального технического<br>университета, г. Минск                                      |
|                          | <b>Терехова Ирина Анатольевна,</b><br>кандидат технических наук, доцент, ведущий<br>научный сотрудник Республиканского<br>унитарного предприятия «Институт жилища –<br>НИПТИС им. Атаева С. С.», г. Минск                   |
| Оппонирующая организация | Учреждение образования «Белорусский<br>государственный университет транспорта»,<br>г. Гомель  |

Защита состоится 13.05.2022 г. в 14.00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т 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 «07» апреля 2022 г.

Ученый секретарь  
Совета по защите диссертаций  
кандидат технических наук

С. Н. Ковшар

© Марко О. Ю., 2022

© Белорусский национальный  
технический университет, 2022

## **ВВЕДЕНИЕ**

Задачи по снижению энергетических затрат в строительном производстве, включая производство сборного железобетона и монолитное строительство, а также повышение темпа строительства зданий и сооружений с применением монолитного бетона и железобетона не теряют со временем своей актуальности. Для климатической зоны Беларуси характерно наличие продолжительного периода холодного времени года, в течение которого (фактически с октября по март) резко возрастают затраты энергии на ускорение твердения цементного бетона как с целью повышения темпа набора им прочности, так и для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик бетона, долговечности и эксплуатационной надежности строительных конструкций.

Одним из технологических приемов решения этих задач является использование комплексных химических добавок в бетон, проявляющих эффект пластификации (и способствующих росту плотности и непроницаемости бетона за счет снижения его начального водосодержания) в сочетании с эффектом ускорения твердения и роста прочности, что обеспечивает ускорение оборота форм и опалубок, а в итоге способствует снижению энергозатратности, повышению темпа и сокращению сроков строительства.

Приведенным критериям полностью отвечает новая химическая добавка «УКД-1», разработанная в Беларуси с использованием в составе отечественного углеродного наноматериала (УНМ) и обладающая эффективным сочетанием пластифицирующе-ускоряющего воздействия на цементный бетон.

Настоящее диссертационное исследование отражает этапы экспериментальной разработки термосной технологии бетона, модифицированного этой добавкой, а на этой основе – энергосберегающей технологии производства сборных изделий и круглогодичного бетонирования монолитных конструкций с его применением.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Связь работы с научными программами (проектами) и темами.** Настоящая работа выполнялась в соответствии с положением государственной научно-технической программы и постановления № 1589 Совмина РБ от 28.10.2010 г. «Об утверждении Концепции развития строительного комплекса Республики Беларусь на 2011–2020 годы» в части разработки и освоения новых энергосберегающих технологий изготовления сборных и монолитных конструкций с применением модифицированных бетонов и является составной частью тематики выполненных по заданиям Министерства образования Республики Беларусь исследований, в которых принимал участие автор: «Прогрессивные строительные технологии и материалы для капитального строительства и реконструкции зданий и сооружений в Республике Беларусь» (№ ГБ 1603, 2017–2020 гг.).

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований являлась разработка энергосберегающей технологии бетона, модифицированного комплексной химической добавкой, содержащей углеродный наноматериал, для производства сборных железобетонных изделий и монолитного строительства.

**Задачи исследований, решенные для достижения поставленной цели:**

– экспериментально исследовано влияние комплексной углеродсодержащей добавки «УКД-1», в состав которой входит структурированный углеродный наноматериал, и ее компонентов на возможные структурно-морфологические изменения, кинетику твердения и прочность затвердевшего цементного камня;

– экспериментально исследованы закономерности приготовления и свойства растворов-суспензий добавки «УКД-1» для определения условий ее применения в бетоне;

– экспериментально исследовано влияние добавки «УКД-1» на изменение формовочных свойств бетонных смесей во времени при использовании различных цементов, изменении температуры и условий транспортирования для выработки соответствующих рекомендаций по транспортированию бетона с этой добавкой;

– экспериментально исследована кинетика твердения цементного бетона с добавкой «УКД-1» в естественных условиях твердения (в диапазоне температуры 5 °С ... 30 °С) и с разогревом до температуры 30 °С ... 50 °С для установления соответствующих закономерностей роста прочности бетона и разработки режимов его твердения при минимизации затрат энергии на этот процесс;

– дано экспериментальное обоснование малоэнергоёмких режимов твердения бетона с добавкой «УКД-1» при низкой положительной и отрицательной температуре воздуха (в диапазоне +5 °С ... 0 °С ... -20 °С) для выработки соответствующих рекомендаций по энергосберегающей технологии зимнего бетонирования;

– обобщены результаты исследований в форме технологического регламента на применение добавки «УКД-1» в бетоне для производства сборных железобетонных изделий и монолитного строительства;

– осуществлена производственная апробация результатов диссертационного исследования при устройстве монолитных строительных конструкций и изготовлении сборных изделий, подтвердившая эффективность разработки.

**Научную новизну и значимость полученных результатов** составляют:

– новые, экспериментально обоснованные данные о закономерностях влияния комплексной трехкомпонентной добавки «УКД-1», содержащей в своем составе пластифицирующий, ускоряющий твердение цементного бетона компоненты и структурированный углеродный наноматериал, на структурно-морфологические свойства, кинетику твердения и прочность затвердевшего цементного камня, на динамику изменений формовочных свойств бетонных смесей и кинетику твердения цементного тяжелого конструкционного бетона, что

позволило обосновать правила эффективного использования добавки «УКД-1» с целью разработки малоэнергоёмкой, энергоэффективной технологии бетона с ее применением при изготовлении сборных железобетонных изделий и устройстве монолитных конструкций;

– новые экспериментальные данные рентгенофазового анализа проб цементного камня, содержащего структурированный углеродный наноматериал, введенный в состав добавки «УКД-1», которые подтверждают гипотезу об отсутствии химического взаимодействия между веществом УНМ и продуктами гидратации портландцемента, и что рост прочности цементного камня и бетона с УНМ связан с физико-химическими аспектами его влияния на процессы взаимодействия цемента с водой и формирования кристаллогидратных новообразований в объеме цементного камня (бетона). Тем самым подтверждается предположение о роли ультрадисперсных частиц УНМ как центров кристаллизации, катализирующих процесс образования кристаллогидратов, что способствует росту плотности и прочности цементного камня и бетона. Это действие дополняется эффектом «наноармирования» структуры кристаллогидратных новообразований в цементном камне и бетоне за счет встраивания и «защемления» однослойных трубчатых УНМ, имеющих поперечное сечение менее 1 нм ( $< 10 \text{ \AA}$ ), в порах между кристаллогидратами (сечение  $\leq 4...5 \text{ нм}$  ( $\leq 40...50 \text{ \AA}$ )), а также за счет микроармирования структуры цементного камня в целом многослойными трубчатыми УНМ, имеющими большие поперечные сечения ( $\geq 10 \text{ нм}$  ( $\geq 100 \text{ \AA}$ )), что способствует росту прочности на растяжение таких структур и, следовательно, на сжатие;

– на основании результатов экспериментальных исследований бетона с добавкой «УКД-1» расширены представления о влиянии на реологические (технологические) свойства цементобетонных смесей многокомпонентных химических добавок в бетон, на кинетику набора им прочности в разных температурных условиях твердения в диапазоне от  $+30 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также в зависимости от теплозащитной функции форм-опалубок ( $K_{Т.оп} \sim 0,6...3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ), что создало необходимые предпосылки для успешной производственной апробации разработанной энергосберегающей технологии бетона.

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

– результаты экспериментальных исследований и выявленные закономерности влияния составляющих комплексную добавку «УКД-1» веществ (суперпластификатора (СП), ускорителя твердения (СН) и углеродного наноматериала (УНМ)) на свойства цемента, кинетику твердения и прочность цементного камня, что позволило обосновать оптимальное соотношение компонентов (СП – 0,45 доли ед., СН – 0,50 доли ед., УНМ – 0,05 доли ед.) в составе комплексной добавки и ее рациональную дозировку (0,7 % ... 1,0 % от массы цемента), обеспечивающие ее эффективность в цементном бетоне;

– результаты экспериментальных исследований проб затвердевшего цементного камня методом рентгенофазового анализа, показавших отсутствие морфологических изменений в продуктах гидратации цемента с добавкой

«УКД-1» в сравнении с «чистым» цементом, а также с моновеществами СП и СН, что подтверждает физико-химическую природу воздействия вещества углеродного наноматериала (содержащегося в добавке «УКД-1»), которое отражается в росте прочности цементного камня и бетона;

– экспериментально-теоретическое обоснование роли углеродного наноматериала в росте прочности цементного камня и цементного бетона, заключающееся в том, что энергетически активные ультрадисперсные частицы УНМ и характеризующиеся большим энергетическим потенциалом вершины (изломы) трубчатых УНМ катализируют гидратацию цемента и образование кристаллогидратов – продуктов реакции клинкерных минералов цемента с водой, являясь «центрами кристаллизации», а однослойные и многослойные трубчатые УНМ проявляют эффект наноармирования формирующейся структуры кристаллогидратных новообразований за счет встраивания («защемления») в порах между ними однослойных УНМ, а также эффект микроармирования объема цементного камня в бетоне многослойными УНМ, что в совокупности обеспечивает рост прочности на растяжение и сжатие такой структуры при деформациях под действием приложенной нагрузки;

– результаты экспериментальных исследований и выявленные закономерности изменения формуемости бетонной смеси с добавкой «УКД-1» под влиянием температуры (в диапазоне от 5 °С до 30 °С) и условий транспортирования (без побуждения, с кратковременным или постоянным побуждением) и свойств цемента, что позволило установить рекомендуемые периоды их транспортирования при сохранении требуемой подвижности с учетом конкретных условий ведения работ;

– результаты экспериментальных исследований кинетики роста прочности бетона с добавкой «УКД-1» под воздействием изменяющейся в диапазоне от 5 °С до 50 °С температуры его разогрева и среды твердения (от -20 °С до 30 °С), а также теплозащитных характеристик формопалубок ( $K_{т.оп.} \sim \text{const}$ ,  $K_{т.оп.} \sim \text{переменный}$  (от 0,6 до 3,5 Вт/(м<sup>2</sup>·°С)), что позволило разработать малоэнергоемкие режимы его твердения для различных (включая зимние) условий ведения бетонных работ;

– результаты внедрения разработки при изготовлении сборных изделий и устройстве монолитных конструкций, подтвердившие ее экономическую эффективность.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения, выносимые на защиту, результаты теоретических и экспериментальных исследований, материалы научных публикаций получены и подготовлены автором самостоятельно. Определение целей и задач исследований, обобщение полученных результатов и формулирование выводов проводилось совместно с научным руководителем – доктором технических наук, профессором Батяновским Э. И.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные материалы диссертации докладывались и обсуждены на международных научно-технических конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» в Белорусско-Российском университете (г. Могилев, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2019, 2020, 2021);

Международном семинаре «Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства» в БНТУ (г. Минск, 2012); международных научно-методических семинарах «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (г. Брест, 2014; г. Гродно, 2016; г. Брест, 2018); V Международном семинаре «Проблемы сохранения культурного наследия» (г. Брянск, 2015); Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева (г. Минск, 2016); Международной научно-технической конференции «Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов)» (г. Минск, 2017); Международной научной конференции «Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте» (г. Брест, 2017); Международной научно-технической конференции «Проблемы современного строительства» (г. Минск, 2018); Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2018); Международной научной конференции «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» (г. Новополоцк, 2019); Международной научно-технической конференции «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 2020).

**Опубликование результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 29 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, 6 из которых включены в перечень ВАК (объем 5 авторских листов), 22 материала конференций и тезисов докладов. Общий объем публикаций составляет 10 авторских листов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, включающей 5 глав, заключения, библиографического списка из 147 наименований использованных источников и 29 наименований публикаций соискателя, 4 приложений на 87 страницах. Полный объем диссертации составляет 239 страниц, в т. ч. ~ 100 страниц машинописного текста, 21 рисунок, 38 таблиц, 4 приложения. Библиографический список включает 176 наименований, из которых 29 – авторские работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** содержит обзор и оценку проблем и их решений при круглогодичном ведении бетонных работ, при этом выделяется наиболее сложный – зимний период, характеризующийся ростом энергозатрат при производстве сборных изделий и в большей степени в монолитном строительстве. Анализ информации основополагающих источников в данной области позволил дать краткую характеристику методов ускорения твердения бетона в заводском производстве и в построечных условиях с использованием традиционных водозатворенных бетонных смесей, включая «модифицированные» – содержащие в своем составе химические добавки, и обосновать возможность их сочетания с разрабатываемой технологией бетонирования.

По результатам анализа первоисточников с учетом данных исследований А. С. Арбеньева, В. С. Абрамова, С. А. Амбарцумяна, А. А. Афанасьева, Р. В. Вегенера, В. Я. Гендина, С. Г. Головнева, Б. А. Крылова, В. П. Лысова, И. Б. Заседателя, С. А. Миронова, И. Г. Совалова, С. М. Трембицкого, В. Д. Топчия, С. А. Шифрина, А. В. Ушерова-Маршака и многих других авторов определена необходимость выполнения исследований по разработке энергосберегающей технологии, характеризующейся низкотемпературным и кратковременным разогревом бетона, модифицированного добавкой с комплексным водопонижающим и ускоряющим твердение бетона действием. Сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

**Во второй главе** приведены общая методология исследования, методики испытаний и характеристики материалов для бетона, а также методика приготовления и свойства растворов-суспензий трехкомпонентной добавки «УКД-1», содержащей структурированный углеродный наноматериал.

В качестве *вяжущего вещества* для бетона использовали цемент марок М500-Д0 (I), М500-Д20 (II), М400-Д0 (II), М400-Д20 (III) по ГОСТ 30515–2013 (I, II и III групп эффективности при пропаривании) белорусских цементных заводов с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Таблица 1. – Общая характеристика цемента, использованных в исследованиях

| Завод-изготовитель             | Марка цемента | Группа эффективности при пропаривании | Минералогический состав, % |        |        |         | $K_{НГ}$ , доли ед. | Сроки схватывания, ч; мин |          |
|--------------------------------|---------------|---------------------------------------|----------------------------|--------|--------|---------|---------------------|---------------------------|----------|
|                                |               |                                       | $C_3S$                     | $C_3A$ | $C_2S$ | $C_4AF$ |                     | начало                    | конец    |
| 1. БЦЗ                         | М500-Д0       | I                                     | 58                         | 7,3    | 20     | 11,5    | 0,255               | $2^{05}$                  | $3^{10}$ |
| 2. БЦЗ                         | М500-Д20      | II                                    | 56,3                       | 8      | 20,4   | 10,6    | 0,260               | $2^{05}$                  | $3^{20}$ |
| 3. БЦЗ                         | М400-Д0       | I                                     | 56                         | 6,5    | 18     | 13      | 0,265               | $2^{10}$                  | $3^{20}$ |
| 4. Кричевцементно-шифер        | М500-Д0       | II                                    | 54                         | 5      | 21     | 16      | 0,260               | $3^{15}$                  | $4^{10}$ |
| 5. Кричевцементно-шифер        | М400-Д20      | III                                   | 51                         | 4,5    | 26     | 15      | 0,270               | $3^{20}$                  | $4^{10}$ |
| 6. Красносельск-стройматериалы | М500-Д0       | I                                     | 55                         | 4,7    | 20     | 15      | 0,255               | $2^{05}$                  | $3^{15}$ |
| 7. Красносельск-стройматериалы | М500-Д20      | II                                    | 53                         | 3,3    | 23     | 15,7    | 0,260               | $2^{35}$                  | $3^{55}$ |
| 8. Красносельск-стройматериалы | М400-Д20      | II                                    | 52                         | 3,8    | 22     | 17,5    | 0,265               | $2^{30}$                  | $3^{40}$ |

*Примечания.* 1. Данные о примерном минералогическом составе цемента приведены по результатам обобщения (усреднения) характеристик вяжущих, полученных от ряда производственных лабораторий заводов сборного железобетона. 2. Сроки схватывания и  $K_{НГ}$  определены для соответствующих вяжущих перед их использованием

*Заполнители для бетона* – щебень гранитный крупностью 5...20 мм,  $\rho_{щ}^0 = 1440 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{щ}^3 = 2700 \text{ кг/м}^3$ , прочностью по дробимости  $\geq 100 \text{ МПа}$ ; песок природный с  $M_k = 2,45$ ,  $\rho_{п}^0 = 1550 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{п}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ .



В качестве *химических добавок* для бетона использованы: ускоритель твердения – сульфат натрия кристаллизационный, ГОСТ 21458–75 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; в тексте обозначено как СН); пластифицирующий компонент – суперпластификатор «СУПЕРПЛАСТ С-3», ТУ 5730-004-97474489–2007 (в тексте – СП); комплексная углеродосодержащая добавка «УКД-1», техническое свидетельство ТС 01.2093.14.

Для реализации экспериментальной части исследований и их внедрения разработали методику приготовления, хранения и использования растворов-суспензий добавки «УКД-1», полученной путем интенсивного механического смешивания порошкообразных сульфата натрия (СН; 0,5 доли ед. массы) с УНМ (0,05 доли ед.) и суперпластификатором (СП; 0,45 доли ед.). Определены условия хранения (с периодическим механическим перемешиванием (через 45...60 мин) либо малоинтенсивным постоянным побуждением) и использования растворов-суспензий добавки «УКД-1» при, как будет показано далее, рекомендуемой дозировке в бетон в количестве 0,7 % ... 1,0 % от массы цемента.

**Третья глава** отражает результаты исследований по выявлению закономерностей влияния добавки «УКД-1» на свойства цемента: нормальную плотность, сроки схватывания и активность, кинетику роста прочности цементного камня, а также степень гидратации цемента и морфологию продуктов его гидратации.

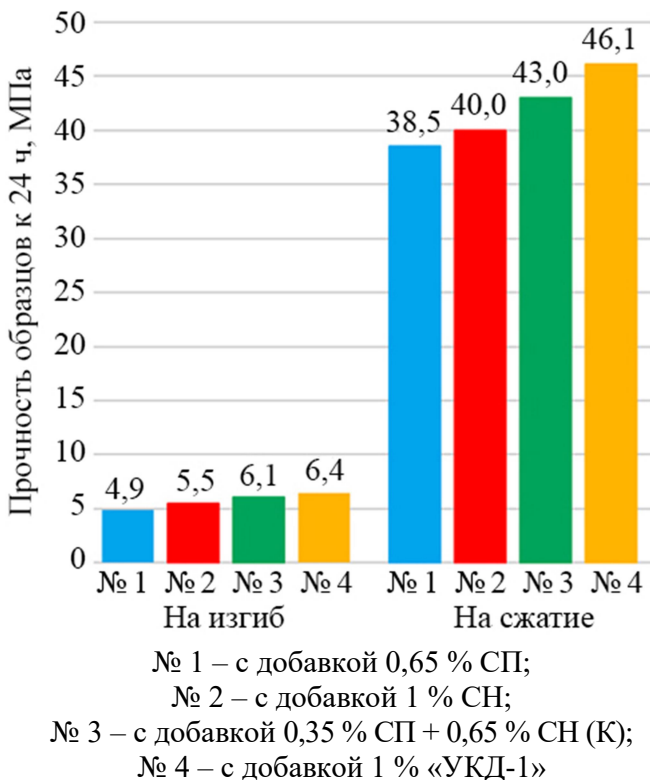
Установлено, что добавка «УКД-1» в дозировке 1,5 % от массы цемента (МЦ) характеризуется водоредуцирующим эффектом  $\geq 25$  %, а при дозировке «УКД-1» в 0,7 % ... 1,0 % от МЦ эффект составляет 15 % ... 20 % для цементов с 20 % минеральных добавок и до 25 % для чистоклинкерного вяжущего марки М500. При этом добавка в дозировке  $\leq 0,7$  % ... 1,0 % от МЦ не изменяет срока начала схватывания цементного теста без корректировки воды затворения и на 15 % ... 20 % сокращает его при уменьшении количества воды затворения (в экспериментах на  $\sim 20$  %) с сохранением постоянной консистенции цементного теста (на уровне нормальной плотности), что в рекомендациях по ее применению предложено учитывать соответствующим поправочным коэффициентом.

*Активность цемента* (по темпу роста прочности в 1, 2, 3, 7-е сут и значению в 28 сут) и ее изменение для цементов разных марок и групп эффективности (I, II и III) под влиянием добавки «УКД-1» экспериментально установили по стандартизированной методике ГОСТ 310.3–76 для водных условий твердения и при паропрогреве по стандартизированному режиму (ГОСТ 310.3–76), а также по режимам, включающим начальный разогрев бетона и последующее остывание в пропарочном бачке, имитирующим условия твердения по энергосберегающей технологии «горячего» термоса.

На рисунке 1 частично представлены экспериментальные данные в виде графиков, отражающих общую тенденцию кинетики водного твердения (роста прочности) цементно-песчаного раствора без добавок (№ 1) и с добавками

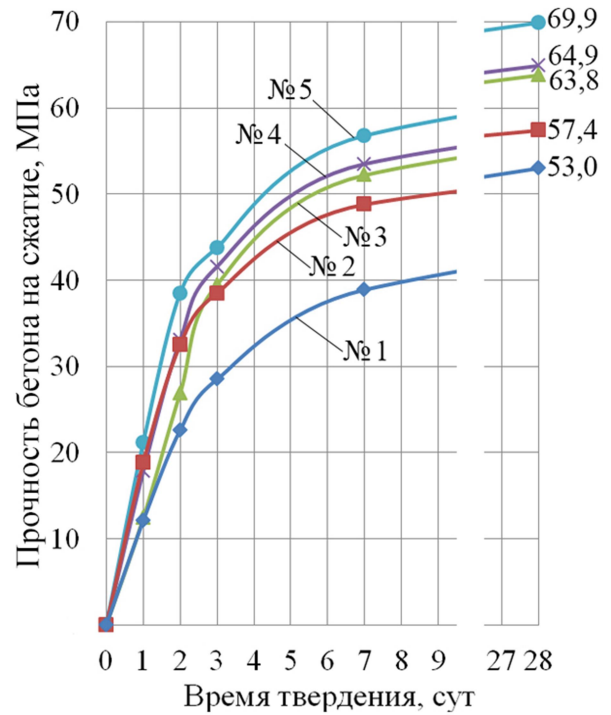
1 % СН (№ 2), 0,65 % СП (№ 3), 0,35 % СП + 0,65 % СН (№ 4) и 1 % «УКД-1» (№ 5). Эта тенденция характерна для всех разновидностей цементов приведенных в таблице 1; параллельное исследование указанных добавок в бетоне осуществлено с целью, во-первых, сопоставления их эффективности, во-вторых, оценки роли наноглеродной составляющей комплекса «УКД-1».

На рисунке 2 частично представлены данные в виде диаграмм, отображающих прочность цементно-песчаного раствора на цементе 1-й группы эффективности при паропрогреве с режимом: подъем температуры до  $t \sim 40^\circ\text{C}$  за 2 ч и твердение ( $\sim 16...17$  ч) по методу «термоса» с добавками 1 % СН (№ 1), 0,65 % СП (№ 2), 0,35 % СП + 0,65 % СН (№ 3) и 1 % «УКД-1» (№ 4).



**Рисунок 2. – Прочность цементно-песчаного раствора на цементе М500-Д0 1-й группы эффективности**

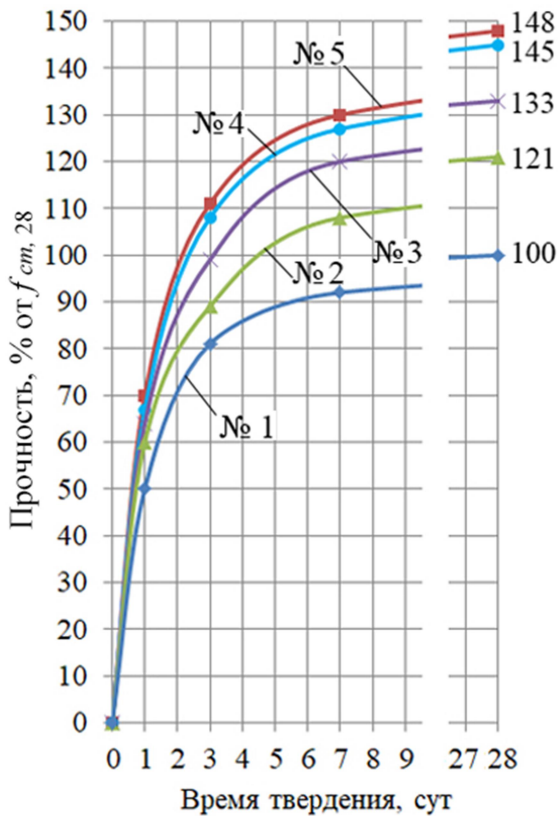
Определена (в сравнении с добавками (0,5 % ... 1 % СН; 0,5 % СП; 0,5 % СН + 0,5 % СП)) оптимальная дозировка добавки «УКД-1» по кинетике



№ 1 – без добавок; № 2 – с добавкой 1 % СН;  
 № 3 – с добавкой 0,65 % СП;  
 № 4 – с добавкой 0,35 % СП + 0,65 % СН (К);  
 № 5 – с добавкой 1 % «УКД-1»

**Рисунок 1. – Кинетика роста прочности цементно-песчаного раствора на цементе М500-Д0 1-й группы эффективности**

Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение добавки «УКД-1» повышает активность цемента, а это отражается в ускоренном темпе роста прочности цементно-песчаного раствора и обеспечивает при кратковременном (за 2...3 ч) нагреве до температуры  $40^\circ\text{C} \dots 60^\circ\text{C}$  и последующем твердении по методу термоса (16...17 ч) прочность цементно-песчаных образцов стандартизированного состава и консистенции в 70 % ... 90 % от номинальной марки цемента, т. е. создает базу для разработки энергосберегающей технологии бетона.



№ 1 – без добавок; № 2 – 0,5 % «УКД-1»;  
 № 3 – 0,75 % «УКД-1»; № 4 – 1 % «УКД-1»;  
 № 5 – 1,5 % «УКД-1»

**Рисунок 3.** – Кинетика роста прочности цементного камня (цемент № 1 по таблице 1) в нормально-влажностных условиях

мент (1 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  или СН), комплексную добавку (0,5 % СН + 0,5 % СП), включающую оба эти компонента, но не содержащую УНМ, и пробы с добавкой 1 % «УКД-1». Установлено, что в рентгеновских спектрах всех проб присутствуют дифракционные отражения только традиционных продуктов гидратации клинкерных минералов портландцемента. Причем интенсивность отражений исходных клинкерных минералов уменьшается в пробах с добавками. При этом максимальное количество новообразований: тоберморитового геля (С – S – Н (II), ксоротлента ( $\text{C}_2\text{S}_5\text{H}$ ), риверсайдита ( $\text{C}_2\text{S}_5\text{H}_3$ ), гиллебрандита ( $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}$ ), гиролита ( $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$ ), этрингита ( $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) и других соединений – продуктов реакций клинкерных минералов с водой – содержится в пробах, содержащих добавку «УКД-1».

Как мы считаем, ультрадисперсные частицы УНМ и окончания (изломы) трубчатых УНМ, обладающие значительным потенциалом поверхности, служат своеобразной «подложкой» (центрами кристаллизации) и катализируют ускоренное формирование кристаллогидратных новообразований в твердеющем цементном камне. При этом однослойные трубчатые УНМ, характеризующиеся размерами поперечных сечений  $\leq 1$  нм, что меньше размеров пор новообразований (пор геля;  $\leq 4 \dots 5$  нм), обеспечивают специфическое «наноармирование» формирующейся из них структуры цементного камня,

роста прочности (на сжатие) образцов цементного камня ( $20 \times 20 \times 20$  мм; в серии 6...12 шт.), изготовленных из теста нормальной густоты (В/Ц  $\sim 0,26$  без добавки и  $0,19 \dots 0,21$  с «УКД-1») и твердевших в нормально-влажностных, водных условиях и с начальным нагревом при последующем термосном выдерживании, составившая 0,75 % ... 1,0 % от массы цемента (рисунок 3). При этом рост прочности цементного камня к проектному (28 сут) возрасту составил 120 % ... 145 % при введении 0,75 % ... 1,0 % «УКД-1» за счет эффектов снижения начального водосодержания и ускорения твердения цемента под комплексным влиянием углеродного наноматериала и сульфата натрия, взаимно дополняющих этот эффект. После испытаний образцов отбирали пробы для оценки количества химически связанной воды (ХСВ) цементом и степени его гидратации, а также возможных изменений в морфологии продуктов его гидратации рентгенофазовым анализом. Исследовали 12 проб, содержащих ускоряющий компо-

а многослойные (сечением  $\geq 10$  нм) – микроармирование его структуры, что способствует повышению как темпа роста, так и уровня прочности цементного камня и цементного бетона.

Этому выводу соответствуют данные таблицы 2, полученные при оценке количества химически связанной воды и степени гидратации цемента в пробах цементного камня без добавки «УКД-1» и содержащего ее. Рост ( $\geq 4$  %) степени гидратации цемента в пробах с добавкой «УКД-1» подтверждает вывод о более глубоком развитии реакций вяжущего с водой за счет катализирующего действия ускоряющих компонентов этой добавки – углеродного наноматериала и сульфата натрия.

В четвертой главе приведены результаты исследования закономерностей влияния добавки «УКД-1» (в сравнении с ускорителем твердения – сульфатом натрия – как ее компонентом) на технологические свойства бетонных смесей разной консистенции – формуемость (удобоукладываемость), водо- и раствооротделение, влияющие на однородность свойств и качество бетона.

Оценивали снижение подвижности ( $OK$ , см) или рост жесткости ( $Ж$ , с) по СТБ 1035–96 и СТБ EN 12350-3–2012 бетонных смесей без добавок и с добавками во времени при следующих изменяющихся факторах:

- начальной формуемости смесей и составах бетона (таблица 3);
- при использовании смесей с различной начальной температурой и при изменении температуры наружного воздуха;
- при использовании разных по свойствам цементов;
- при статическом состоянии и с периодическим перемешиванием смесей.

Таблица 3. – Характеристики бетонных смесей и бетона

| Номер состава          | Класс бетона                    | Формуемость бетонной смеси |        | Марка цемента | Расход составляющих, кг, на 1 м <sup>3</sup> бетона: |     |      |     | Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> | Водоцементное отношение бетона |
|------------------------|---------------------------------|----------------------------|--------|---------------|--|-----|------|-----|--------------------------------------|--------------------------------|
|                        |                                 | Ж, с                       | OK, см |               | Ц  | П   | Щ    | В   |                                      |                                |
| 1                      | 2                               | 3                          | 4      | 5             | 6  | 7   | 8    | 9   | 10                                   | 11                             |
| А. Составы без добавок |                                 |                            |        |               |  |     |      |     |                                      |                                |
| 1                      | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | 7...8                      | –      | M400          | 245  | 760 | 1230 | 155 | 2390                                 | 0,63                           |
| 2                      | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –                          | 3...4  | M400          | 275  | 765 | 1200 | 160 | 2400                                 | 0,58                           |

Таблица 2. – Количество химически связанной воды в пробах и степень гидратации цемента

| Вид добавки              | Номер пробы | Количество химически связанной цементной воды, % | Степень гидратации цемента $\alpha$ , % |
|--------------------------|-------------|--|---|
| Цемент без добавки       | 1           | 15,4   | –                                       |
|                          | 2           | 14,6   | –                                       |
|                          | 3           | 15,3   | –                                       |
|                          | Среднее     | 15,1   | 66,52                                   |
| 0,5 % СН +<br>+ 0,5 % СП | 1           | 15,2   | –                                       |
|                          | 2           | 16,0   | –                                       |
|                          | 3           | 15,1   | –                                       |
|                          | Среднее     | 15,43  | 67,99                                   |
| 1 %<br>«УКД-1»           | 1           | 16,1   | –                                       |
|                          | 2           | 15,4   | –                                       |
|                          | 3           | 15,7   | –                                       |
|                          | Среднее     | 15,73  | 69,31                                   |

## Окончание таблицы 3

| 1                                       | 2                               | 3     | 4       | 5    | 6   | 7   | 8    | 9   | 10   |      |
|---|---------------------------------|-------|---------|------|-----|-----|------|-----|------|------|
| 3                                       | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –     | 12...14 | M400 | 380 | 685 | 1100 | 201 | 2365 | 0,53 |
| 4                                       | C <sup>25</sup> / <sub>30</sub> | –     | 3...4   | M500 | 385 | 620 | 1180 | 176 | 2350 | 0,46 |
| 5                                       | C <sup>25</sup> / <sub>30</sub> | –     | 12...14 | M500 | 465 | 590 | 1090 | 208 | 2350 | 0,45 |
| Б. Составы с добавкой 1 % СН от МЦ      |                                 |       |         |      |     |     |      |     |      |      |
| 6                                       | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | 7...8 | –       | M400 | 235 | 740 | 1280 | 145 | 2400 | 0,62 |
| 7                                       | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –     | 3...4   | M400 | 270 | 738 | 1230 | 147 | 2380 | 0,56 |
| 8                                       | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –     | 12...14 | M400 | 360 | 720 | 1100 | 182 | 2370 | 0,50 |
| 9                                       | C <sup>25</sup> / <sub>30</sub> | –     | 3...4   | M500 | 364 | 670 | 1185 | 161 | 2380 | 0,44 |
| 10                                      | C <sup>25</sup> / <sub>30</sub> | –     | 12...14 | M500 | 442 | 625 | 1100 | 195 | 2360 | 0,44 |
| В. Составы с добавкой 1 % «УКД-1» от МЦ |                                 |       |         |      |     |     |      |     |      |      |
| 11                                      | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | 7...8 | –       | M400 | 220 | 825 | 1240 | 122 | 2410 | 0,55 |
| 12                                      | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –     | 3...4   | M400 | 247 | 785 | 1250 | 130 | 2415 | 0,52 |
| 13                                      | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –     | 12...14 | M400 | 340 | 755 | 1150 | 163 | 2380 | 0,48 |
| 14                                      | C <sup>12</sup> / <sub>15</sub> | –     | 21...23 | M400 | 405 | 720 | 1065 | 180 | 2370 | 0,44 |
| 15                                      | C <sup>25</sup> / <sub>30</sub> | –     | 12...14 | M500 | 345 | 725 | 1175 | 145 | 2395 | 0,42 |
| 16                                      | C <sup>25</sup> / <sub>30</sub> | –     | 21...23 | M500 | 420 | 720 | 1065 | 175 | 2380 | 0,41 |
| 17                                      | C <sup>32</sup> / <sub>40</sub> | –     | 12...14 | M500 | 400 | 695 | 1150 | 156 | 2405 | 0,39 |

На рисунке 4 частично приведены данные об изменении формуемости бетонной смеси (на примере класса C<sup>12</sup>/<sub>15</sub> марок П1 и П3) во времени в зависимости от наличия и вида добавки («УКД-1» или СН). Температура бетонной смеси соответствовала ~15 °С ... 18 °С при температуре окружающей среды ~18 °С ... 22 °С.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить уравнения регрессии, описывающие изменение формуемости бетонной смеси составов, например, № 2, 7, 12, 3, 8 и 13 (см. таблицу 3), которые представлены в таблице 4, где R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации, служащий мерой качества зависимости. Полученные на бетонных смесях данные полностью соответствуют ранее установленным закономерностям влияния этих добавок на сроки схватывания цемента.

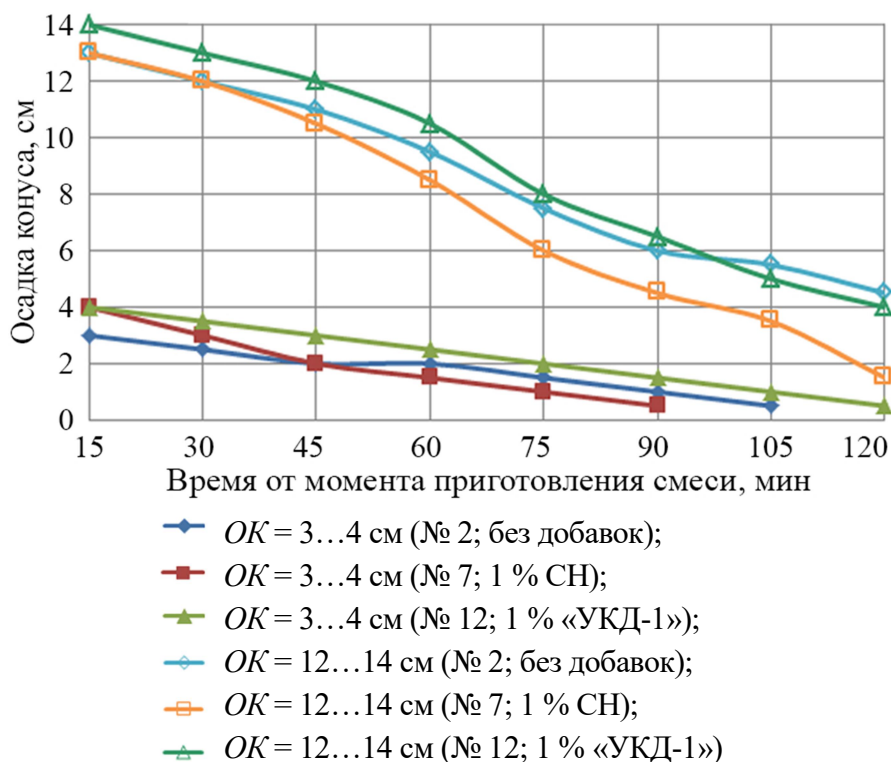


Рисунок 4. – Изменение формуемости бетонной смеси

Таблица 4. – Уравнения регрессии, отражающие изменение формуемости бетонной смеси различных составов

| Состав бетона и наличие добавки | Уравнение регрессии                      |
|---------------------------------|--|
| Состав № 2 (без добавок)        | $y = -0,0258x + 3,3357$ ; $R^2 = 0,9804$ |
| Состав № 7 (1 % СН)             | $y = -0,0457x + 4,4$ ; $R^2 = 0,9681$    |
| Состав № 12 (1 % «УКД-1»)       | $y = -0,0337x + 4,5179$ ; $R^2 = 0,9953$ |
| Состав № 3 (без добавок)        | $y = -0,0867x + 14,484$ ; $R^2 = 0,9838$ |
| Состав № 8 (1 % СН)             | $y = -0,1139x + 15,125$ ; $R^2 = 0,9907$ |
| Состав № 13 (1 % «УКД-1»)       | $y = -0,1024x + 16,036$ ; $R^2 = 0,9868$ |

Экспериментально установлены закономерности изменения подвижности пластичных бетонных смесей конструкционного тяжелого бетона классов от  $C^{12}/_{15}$  до  $C^{32}/_{40}$  в диапазоне температур смеси и наружного воздуха  $5\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и определено, что с введением добавки «УКД-1» период сохранения формовочных свойств в пределах исходной марки для низкопластичных смесей (П1) при указанной температуре соответственно составляет до 120...90 мин, для пластичных (П3) – до 90...75 мин, для литых (П5) – до 30 мин, при этом изменения формуемости отражаются линейными уравнениями регрессии (приведены в диссертации).

Одновременно выявлено, что смеси на алито-алюминатных цементах I группы эффективности (суммарное содержание  $C_3S + C_3A > 60\%$ ) как с добавкой «УКД-1», так и без нее ускоренно снижают подвижность в сравнении с вяжущими II и III групп эффективности. Вместе с тем период снижения осадки конуса смесей, содержащих «УКД-1», от марки П3 до марки П2 составляет не менее 60 мин для цементов I группы и до 75...90 мин для II и III групп эффективности соответственно, что достаточно для нормальной работы с бетоном. При этом введение в бетон 1 % «УКД-1» от массы цемента (при обеспечении условия равноподвижности бетонных смесей) способствует снижению их водоотделения (на  $\sim 25\% \dots 40\%$  для марок П1 и П3 соответственно) и раствооотделения ( $\sim 18\% \dots 22\%$ ), что обеспечивает условия сохранения однородности бетонных смесей и, таким образом, способствует повышению однородности свойств и качества бетона.

Установлено, что при продолжительном перемешивании бетонных смесей (в экспериментах до 30 мин), включая смеси с добавкой «УКД-1», они ускоренно снижают подвижность после его прекращения в сравнении со смесью равной консистенции при традиционном приготовлении (перемешивание в течение 1,5...3 мин); период сохранения ее исходной подвижности после выгрузки составляет до 30 мин, что отражено в технологическом регламенте на ведение бетонных работ.

**В пятой главе** представлены результаты разработки энергосберегающих режимов твердения бетона с добавкой «УКД-1» по беспрогревной технологии (в диапазоне температуры  $5\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и малоэнергоемкой технологии для диапазона температур  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -5\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -10\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  путем оценки роста прочности бетона с исследуемой добавкой в этих условиях.

На начальном этапе по кинетике твердения (росту прочности на сжатие) бетона подтвердили величину оптимальной дозировки ( $\sim 1\%$  от МЦ) добавки «УКД-1» по методике ГОСТ 30459–96 на стандартизованном составе бетона (цемент М500-Д0 (№ 6 по таблице 1)  $C = 350$  кг;  $Щ = 1100$  кг;  $П = 750$  кг;  $B = 175$  кг; подвижность смеси  $OK \sim 3..4$  см) и твердении образцов ( $100 \times 100 \times 100$  мм) в нормально-влажностных условиях ( $\phi \geq 90\%$ ;  $t \sim 20$  °С) (таблица 5).

Таблица 5. – Влияние добавки «УКД-1» на кинетику твердения бетона в нормально-влажностных условиях

| Вид и количество добавки, % от МЦ | Прочность бетона, % от проектной, в возрасте, сут |    |      |     |     | Прочность на сжатие в 28 сут |     |
|-----------------------------------|---|----|------|-----|-----|------------------------------|-----|
|                                   | 1   | 2  | 3    | 4   | 7   | МПа                          | %   |
| Без добавок                       | 26  | 43 | 53   | 60  | 71  | 38,5                         | 100 |
| СН; 1 %                           | 42  | 66 | 78   | 82  | 91  | 40,8                         | 106 |
| «УКД-1»; 0,5 %                    | 42  | 67 | 79,5 | 84  | 93  | 43,1                         | 112 |
| «УКД-1»; 0,75 %                   | 44  | 71 | 83   | 91  | 101 | 45,4                         | 118 |
| «УКД-1»; 1,0 %                    | 48  | 77 | 92   | 100 | 110 | 48,5                         | 126 |
| «УКД-1»; 1,5 %                    | 49  | 78 | 94   | 104 | 111 | 49,7                         | 129 |
| «УКД-1»; 2,0 %                    | 50  | 80 | 95   | 106 | 113 | 50,0                         | 130 |
| «УКД-1»; 1,0 %*                   | 28  | 46 | 58   | 63  | 76  | 40,8                         | 106 |
| «УКД-1»; 1,5 %*                   | 26  | 44 | 55   | 61  | 73  | 39,7                         | 103 |

\* Составы без уменьшения расхода воды; бетонная смесь характеризовалась подвижностью  $OK_{1,0} \sim 16..18$  см и  $OK_{1,5} \sim 23..25$  см соответственно

В дальнейшем режимы твердения бетона исследовали, используя оптимальную дозировку добавки –  $1\%$  от массы цемента, при этом образцы бетона (кубы с ребром 100 и 150 мм) твердели в формах, имитирующих опалубки различных типов (таблица 6) и различающихся коэффициентами теплопередачи ( $K_T = 0,6..3,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С)) при скорости ветра  $V_g = 0$  м/с.

Таблица 6. – Характеристики форм-опалубок

| Материал форм-опалубок и крышек                | Коэффициент (расчетный) теплопередачи стенок форм (крышек) при скорости ветра $V_g = 0$ м/с, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) |
|--|--|
| 1. Доска, 25 мм                                | 2,44   |
| 2. Металл (сталь), 10 мм                       | 3,50   |
| 3. Металл (10 мм) + 60 мм минераловатная плита | $\sim 1,00$  |
| 4. Фанера (12 мм) + 60 мм минераловатная плита | $\sim 2,98 / \sim 0,60^*$  |

\* Форма из фанеры с утеплением

Основой эффективной *беспрогревной технологии* цементного бетона является максимально возможное использование экзотермии вяжущего при организации твердения бетона по методу термоса. Экспериментально выявлены закономерности изменения температуры и прочности бетона (относительной, выраженной в процентах от проектной) с добавкой  $1\%$  «УКД-1» и без нее,



твердеющего в условиях теплоизоляции (термоса) в течение 1...3 сут (т. е. в условиях, обеспечивающих накопление теплоты экзотермии вяжущего) при начальной температуре смеси  $\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и цементах I, II и III групп эффективности. Зафиксирован прирост температуры от начальной за счет саморазогрева бетона без добавки на  $8\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 13\text{ }^{\circ}\text{C}$  (большее значение для цемента I группы эффективности) и с добавкой 1 % «УКД-1» (на цементе I группы) – на  $18\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 22\text{ }^{\circ}\text{C}$  (большее значение при  $t_{нв} \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Обработка экспериментальных данных отражена уравнениями (таблица 7).

Таблица 7. – Уравнения регрессии, описывающие изменение температуры бетонной смеси и прочности при твердении в условиях термоса

| Наличие добавки и начальная температура бетонной смеси | Кинетика изменений температуры     | Кинетика изменений прочности                 |
|--|------------------------------------|--|
| Без добавок, $t_{нач} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$    | $y = 3,5x + 20$ ; $R^2 = 0,9761$   | $y = 25,037\ln(x) + 35,713$ ; $R^2 = 0,9854$ |
| 1 % «УКД-1», $t_{нач} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$     | $y = 5,1x + 4,6$ ; $R^2 = 0,951$   | $y = 32,192\ln(x) + 26,107$ ; $R^2 = 0,9861$ |
| 1 % «УКД-1», $t_{нач} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$    | $y = 5,8x + 11,8$ ; $R^2 = 0,9397$ | $y = 29,946\ln(x) + 34,448$ ; $R^2 = 0,9533$ |
| 1 % «УКД-1», $t_{нач} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$    | $y = 6,2x + 19,7$ ; $R^2 = 0,9907$ | $y = 34,438\ln(x) + 50,765$ ; $R^2 = 0,9992$ |

Влияние теплоизолирующих свойств форм (опалубки) на кинетику роста прочности бетона связано с обеспечением условий для аккумуляции тепла экзотермии цемента и сопутствующего повышения температуры бетона в процессе твердения (рисунок 5).

Экспериментально установлено, что твердение бетона с добавкой «УКД-1» в условиях «термоса» обеспечивает рост прочности бетона  $\geq 50\%$  от проектной за 24 ч при температуре окружающей среды  $t_{нв} \sim (20 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; за 24...48 ч при  $t_{нв} \sim 12\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и за 48...60 ч твердения при  $t_{нв} \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; прочность бетона  $\geq 70\%$  от проектной в аналогичных условиях обеспечивается за 2; 2...3; 3...4 сут соответственно.

На следующем этапе экспериментально исследована кинетика роста прочности первоначально разогретого и затем твердеющего без подвода тепла бетона с добавкой «УКД-1» для зимнего периода ведения бетонных работ в диапазоне низкой положительной  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и отрицательной  $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \dots -20\text{ }^{\circ}\text{C}$

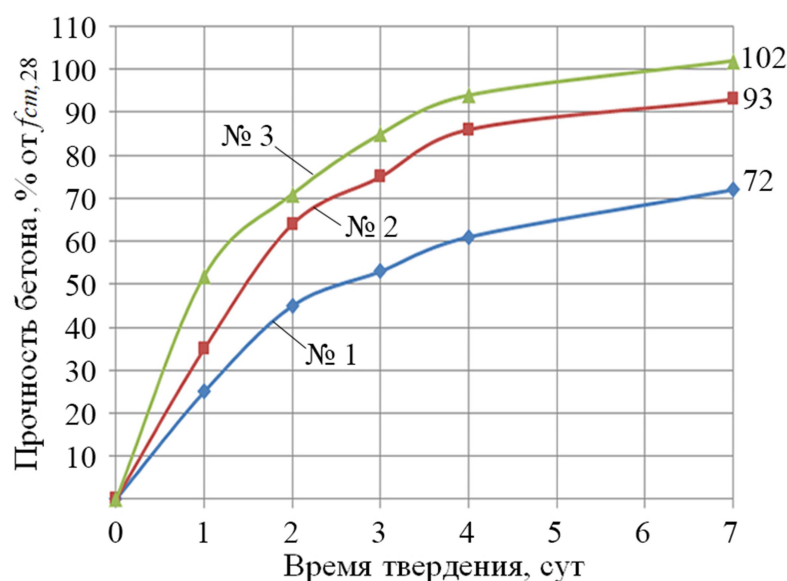
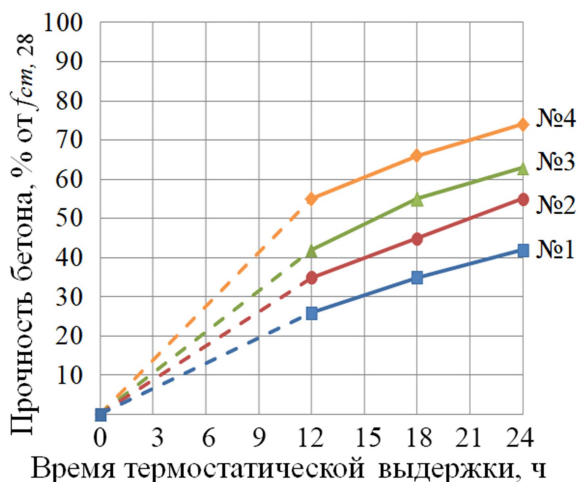


Рисунок 5. – Тенденция роста прочности бетона (класс  $C^{25}/_{30}$ ; температура среды  $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) без добавки и с добавкой 1 % «УКД-1» в металлических (без теплоизоляции – № 1 и № 2) и теплоизолированной (№ 3) формах

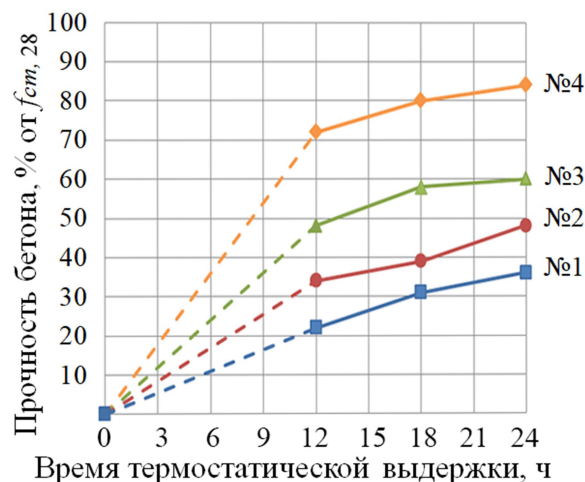


температуры наружного воздуха для опалубки с палубой из фанеры ( $K_T \sim 2,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ) и ее утепленного варианта ( $K_T \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ), а также из деревянной доски ( $K_T \sim 2,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ) (рисунки 6–8).



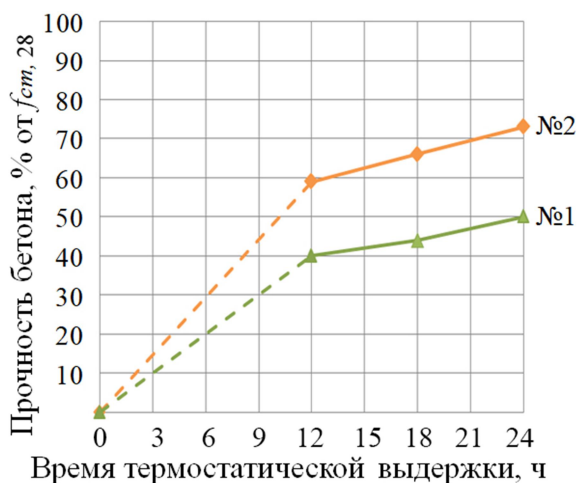
№ 1 – бетон без добавок, температура разогрева бетона  $t_p = 30 \text{ °C}$ ;  
 № 2 – бетон без добавок,  $t_p = 50 \text{ °C}$ ;  
 № 3 – бетон с 1 % «УКД-1»,  $t_p = 30 \text{ °C}$ ;  
 № 4 – бетон с 1 % «УКД-1»,  $t_p = 50 \text{ °C}$

**Рисунок 6.** – Кинетика роста прочности бетона при температуре среды в 5 °C



№ 1 – бетон без добавок, температура разогрева бетона  $t_p = 30 \text{ °C}$ ;  
 № 2 – бетон без добавок,  $t_p = 50 \text{ °C}$ ;  
 № 3 – бетон с 1 % «УКД-1»,  $t_p = 30 \text{ °C}$ ;  
 № 4 – бетон с 1 % «УКД-1»,  $t_p = 50 \text{ °C}$

**Рисунок 7.** – Кинетика роста прочности бетона при температуре среды в -5 °C



№ 1 – бетон с 1 % «УКД-1»,  $t_p = 30 \text{ °C}$ ;  
 № 2 – бетон с 1 % «УКД-1»,  $t_p = 50 \text{ °C}$

**Рисунок 8.** – Кинетика роста прочности бетона при температуре среды в -20 °C

По совокупности исследований кинетики твердения бетона при отрицательной температуре окружающей среды установлено, что при использовании утепленных типов опалубки бетон с 1 % «УКД-1», разогретый до 50 °C с последующим твердением по методу «термоса» в течение 18...24 ч, достигает прочности в 75 % ... 90 % от проектной при  $t_{не} = -5 \text{ °C} \dots -20 \text{ °C}$  и модуле поверхности  $M_n \leq 40 \text{ м}^{-1}$  и  $M_n \leq 18 \text{ м}^{-1}$  соответственно; в опалубках без утепления с палубой из фанеры ( $\delta = 12 \text{ мм}$ ) и доски ( $\delta = 25 \text{ мм}$ ) прочность в указанных условиях достигла 60 % ... 65 % от проектной.

Одновременно экспериментально подтверждено, что, используя добавку «УКД-1» в сочетании с кратковременным изотермическим прогревом (в течение 1...4 ч) бетона, возможно реализовать малоэнергоёмкую технологию в неутепленных типах опалубки (палуба из фанеры, деревянной доски). Так, за период твердения до 24 ч (включая подъем температуры, изотермический прогрев бетона на цементе II группы эффективности при  $t \sim 30 \text{ °C} \dots 50 \text{ °C}$  и последующее остывание конструкции в опалубке 12...18 ч) обеспечивается

прочность до 70 % ... 80 % от проектной, а с увеличением времени выдержки бетона в опалубке до 30...36 ч – до 80 % ... 90 % от проектной (таблица 8).

Таблица 8. – Кинетика роста прочности бетона с кратковременным прогревом (твердение в деревянной форме-опалубке при  $t_{нв} = -10$  °С)

| Температура прогрева бетона | Режим подвода тепла, ч (нагрев + изотермический прогрев) | Группа эффективности цемента при пропаривании (М400) | Вид добавки | Прочность бетона, % от $f_{cm,28}$ , после твердения в течение, ч, от начала изотермического прогрева |    |    |
|-----------------------------|--|--|-------------|---|----|----|
|                             |  |  |             | 12  | 18 | 24 |
| 30                          | 1,5+3  | I  | «УКД-1»     | 65  | 76 | 78 |
|                             | 1,5+4  | I  | «УКД-1»     | 71  | 80 | 86 |
| 40                          | 2,5+2  | II   | «УКД-1»     | 63  | 72 | 75 |
|                             | 2,5+3  | II   | «УКД-1»     | 69  | 78 | 84 |
| 50                          | 3,5+1  | III  | «УКД-1»     | 61  | 71 | 77 |
|                             | 3,5+2  | III  | «УКД-1»     | 70  | 77 | 84 |
| 50                          | 3,5+1  | I  | «УКД-1»     | 80  | 89 | 93 |

Производственная апробация результатов исследований при изготовлении сборных изделий в заводских условиях производства стендовым (кассетным) и конвейерным способами, а также при устройстве монолитных конструкций в зимний период ведения работ подтвердила их эффективность. Соответствующие акты и справки приведены в диссертации. Удельный экономический эффект за счет снижения энергетических затрат на прогрев бетона при изготовлении сборных изделий составил до 6...7 р./м<sup>3</sup> и при устройстве монолитных конструкций – до 9 р./м<sup>3</sup> бетона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны научно-практические основы усовершенствованной технологии бетона с использованием комплексной, содержащей суперпластификатор, ускоритель твердения и углеродный наноматериал добавки «УКД-1», обеспечивающей высокий темп его твердения при снижении энергетических затрат в производстве сборных изделий и в монолитном строительстве [1–29].

2. Экспериментально выявлены закономерности влияния добавки «УКД-1» на кинетику твердения и прочность цементного камня и бетона и установлена ее рациональная дозировка, составляющая 0,7 % ... 1,0 % от массы цемента и обеспечивающая рост прочности бетона, твердеющего при положительной температуре (5 °С ... 25 °С) среды за 24...48 ч соответственно  $\geq 50$  % и  $\geq 80$  % от уровня прочности проектного (28 сут) возраста, что обеспечивает необходимые и достаточные условия для бездефектной распалубки сборных изделий круглогодично и монолитных конструкций в весенне-летне-осенний период ведения бетонных работ.

При кратковременном (за 2...4 ч) разогреве бетона с 0,7 % ... 1,0 % «УКД-1» до температуры 30 °С ... 50 °С и последующей выдержке сборных изделий в установках тепловой обработки, а монолитных конструкций в термоизолированной опалубке в течение 16...24 ч (включая условия твердения при температуре наружного воздуха до -10 °С) обеспечивается прочность 70 % ... 80 % от ее уровня в проектном (28 сут) возрасте, что позволяет изготавливать сборные изделия и вести бетонные работы в зимний период года с более чем 2-кратным снижением затрат энергии на прогрев бетона [2, 8, 12, 17, 18, 22, 28].

3. Экспериментальными данными рентгенофазового анализа проб затвердевшего цементного камня без добавок и содержащего как компоненты комплексной добавки – сульфат натрия и суперпластификатор, так и комплекс «УКД-1» показано, что во всех случаях продукты гидратации цемента соответствовали традиционно образующимся от его реакций с водой затворения, но при более глубоком развитии процесса гидратации в пробах с «УКД-1», что подтверждено уменьшением в этих пробах отражений исходных клинкерных минералов; одновременно в пробах с «УКД-1» установлен рост ( $\geq 4$  %) степени гидратации цемента, что в совокупности обеспечивает выявленный рост прочности цементного камня и бетона с этой добавкой [2, 5, 12].

4. Экспериментально выявлены закономерности влияния добавки «УКД-1» на изменения формуемости бетонных смесей (жестких, пластичных, литых) с течением времени и в зависимости от свойств цемента (марок М400, М500, М550; 1, 2 и 3-й групп эффективности), температуры смеси и окружающей среды (в диапазоне 5 °С ... 30 °С), условий транспортирования (статически или с побуждением в пути следования) и установлены пределы сохранения формуемости смесей разной консистенции, соответствующие от 0,5 до 1,5 ч, отраженные в технологическом регламенте, что обеспечивает необходимые условия для круглогодичного ведения бетонных работ с использованием добавки «УКД-1». При этом установлено, что введение 0,7 % ... 1 % «УКД-1» в равноподвижные бетонные смеси (марок П5...П1 соответственно) обеспечивает снижение их водоотделения до 25 % ... 40 % и раствооротделения до 18 %... 22 %, что способствует сохранению их однородности, однородности свойств и повышению качества бетона [1, 6, 7, 10, 15, 24].

5. Экспериментально установлены закономерности роста прочности бетона основных используемых в строительстве классов  $C^{12}/_{15}$ ... $C^{32}/_{40}$  (прочностью в проектном возрасте в диапазоне 20...50 МПа) с добавкой «УКД-1» в диапазоне температуры окружающей среды +5 °С ... 0 °С ... -20 °С с первоначальным нагревом бетона до 30 °С ... 50 °С и твердением в формах-опалубках, характеризующихся коэффициентом теплопередачи  $K_T \sim 0,60...3,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

В результате установлено, что:

– при производстве сборных изделий и использовании утепленных типов опалубки монолитных конструкций бетон с 1 % «УКД-1», разогретый до 50 °С, с последующим твердением по методу «термоса» в течение 18...24 ч достигает

прочности в 75 % ... 90 % от проектной, в том числе при работе в зимний период при  $t_{нв} = -5 \text{ } ^\circ\text{C} \dots -20 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

– используя добавку «УКД-1» в сочетании с нагревом за 2...4 ч до  $30 \text{ } ^\circ\text{C} \dots 50 \text{ } ^\circ\text{C}$  и кратковременным изотермическим прогревом (в течение 1...4 ч) бетона обеспечивается реализация малоэнергоёмкой технологии монолитного бетона при температуре окружающей среды до  $-20 \text{ } ^\circ\text{C}$  в неутепленных типах опалубки (палуба из фанеры ( $K_T \sim 2,98 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ), деревянной доски ( $K_T \sim 2,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ). Экспериментально подтверждено, что за период твердения до 24 ч (включая подъем температуры, изотермический прогрев бетона на цементе I, II группы эффективности при  $t \sim 30 \text{ } ^\circ\text{C} \dots 50 \text{ } ^\circ\text{C}$  и последующее остывание конструкции в опалубке 12...18 ч) обеспечивается прочность бетона в 70 % ... 80 % от проектной, а с увеличением времени выдержки бетона в опалубке до 24...30 ч – 80 % ... 90 % от проектной, что обеспечивает эффективное круглогодичное ведение бетонных работ, включая зимний период [3, 4, 6, 11, 13–19, 21, 23, 25–27, 29].

6. Производственная апробация результатов исследований подтвердила их эффективность, что отразилось в сопутствующем удельном экономическом эффекте, составившем до  $6 \dots 7 \text{ р./м}^3$  бетона при изготовлении сборных изделий и до  $9,0 \text{ р./м}^3$  бетона при устройстве монолитных конструкций [9].

### **Рекомендации по использованию практических результатов**

Экспериментально-практические результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать:

– при производстве бетонных и железобетонных сборных изделий для строительства (производственная апробация на ОП «Стройпрогресс» ОАО «МАПИД» г. Минска; ОАО «Завод СЖБ» г. Борисова (акты, протоколы, справки – приложение Г диссертации));

– при строительстве зданий и сооружений различного назначения монолитным способом (производственная апробация на ОАО «Стройтрест № 12» управляющей компании холдинга «Стройтрест-холдинг» г. Могилева (акты, протоколы – приложение Г диссертации));

– при производстве строительных растворов различного назначения, а также сухих строительных смесей различного назначения с введением в их состав добавки «УКД-1» в исходном сухом (порошкообразном) состоянии.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Шейда, О. Ю. Формовочные свойства бетонных смесей с добавкой «УКД-1», содержащей углеродный наноматериал / О. Ю. Шейда, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2014. – Вып. 6. – С. 443–458.

2. Шейда, О. Ю. Влияние комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал, на свойства цемента / О. Ю. Шейда, Э. И. Батяновский // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 30–38.

3. Марко, О. Ю. Кинетика твердения бетона с наноуглеродной добавкой «УКД-1» в варианте беспрогревной технологии / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 271–280.

4. Марко, О. Ю. Энергосберегающая технология монолитного бетона с комплексной добавкой «УКД-1» / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 172–194.

5. Марко, О. Ю. Теоретические аспекты влияния наноуглеродо-содержащей добавки на продукты реакции цемента с водой / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 343–364.

6. Марко, О. Ю. Бетонные смеси и бетон с добавкой «УКД-1» – оценка изменений свойств / О. Ю. Марко, В. А. Ливинская, Е. Е. Корбут // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 164–188.

### Статьи в других изданиях

7. Шейда, О. Ю. Технологические свойства бетонных смесей для энерго-сберегающей технологии монолитного бетона / О. Ю. Шейда, Е. Е. Корбут, Э. И. Батяновский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 2 (35). – С.153–164.

### Статьи из материалов семинаров и конференций

8. Шейда, О. Ю. Влияние химических добавок на физико-механические свойства цемента / О. Ю. Шейда // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : материалы науч.-метод. семинара, Минск, 29 мая 2012 г. : в 2 ч. – Минск : БНТУ, 2012. – Ч. 2. – С. 178–186.

9. Шейда, О. Ю. О производственной апробации новой химической добавки, содержащей углеродный наноматериал / О. Ю. Шейда, Э. И. Батяновский // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : сб. междунар. науч.-техн. ст., Минск, 27–28 мая 2014 г. : в 2 ч. – Минск : БНТУ, 2015. – Ч. 2. – С. 7–19.

10. Шейда, О. Ю. Влияние добавки «УКД-1» на сохранение свойств бетонной смеси / О. Ю. Шейда, Э. И. Батяновский // Перспективные

направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XIX Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 23–25 окт. 2014 г. – Брест : БрГТУ, 2014. – С. 228–237.

11. Шейда, О. Ю. Проблемы и решения при ведении бетонных работ в зимний период / О. Ю. Шейда, Е. Е. Корбут // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты : БПИ – БГПА – БНТУ, 1920–2015 : 95 лет : материалы науч.-метод. конф., Минск, 26–27 мая 2015 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 318–321.

12. Марко, О. Ю. Влияние добавки «УКД-1», содержащей углеродный наноматериал, на структурно-морфологические свойства цемента / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XX Междунар. науч.-метод. семинара, Гродно, 17–19 февр. 2016 г. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 267–271.

13. Марко, О. Ю. Малоэнергетическая технология монолитного бетона с нанокремниевой добавкой «УКД-1» / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский, А. И. Орлович // Инновации в бетоноведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г. – Минск : БНТУ, 2016. – С. 140–146.

14. Марко, О. Ю. Кинетика твердения бетона с добавкой «УКД-1» в зимних условиях ведения работ / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2017 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 255–268.

15. Марко, О. Ю. Кинетика твердения бетона с добавкой «УКД-1» при низкой положительной и отрицательной температурах воздуха / О. Ю. Марко // Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте : материалы II Междунар. науч. конф., Брест, 18–20 окт. 2017 г. – Брест: БрГТУ, 2017. – С. 116–120.

16. Марко, О. Ю. Режимы твердения и прочность бетона с добавкой «УКД-1» / О. Ю. Марко // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2018 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 279–286.

17. Марко, О. Ю. О кинетике твердения цементного камня и бетона с добавкой «УКД-1» / О. Ю. Марко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров = Perspective Directions of Innovative Development of Construction Industry and Engineering Training : материалы XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г. : в 2 ч. / Брестский государственный технический университет ; редкол.: В. В. Тур [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2018. – Ч. 2. – С. 66–74.

18. Марко, О. Ю. Эффективность введения в бетон углеродного наноматериала [Электронный ресурс] / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. II Междунар. науч. конф., Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – С. 226–235. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

#### **Тезисы докладов**

19. Исследование эффективности использования добавки-ускорителя твердения сульфата натрия в бетоне / О. Ю. Шейда [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2011. – Ч. 2. – С. 158–159.

20. Шейда, О. Ю. Влияние химических добавок на схватывание цемента / О. Ю. Шейда, Д. С. Корбут, Е. Е. Корбут // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 134–135.

21. Шейда, О. Ю. Химические добавки в бетон при зимних условиях работ / О. Ю. Шейда, Е. Е. Корбут, Д. С. Корбут // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 2. – С. 152.

22. Шейда, О. Ю. Влияние комплексной добавки, содержащей структурированный УНМ, на свойства цемента / О. Ю. Шейда, Е. Е. Корбут, Д. А. Рабыко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 275–276.

23. Корбут, Е. Е. Перспективы применения добавок-ускорителей процесса твердения в монолитном бетоне / Е. Е. Корбут, О. Ю. Шейда, Д. А. Рабыко // Проблемы сохранения культурного наследия : материалы V Междунар. семинара, Брянск, 26 нояб. 2015 г. / Филиал ОАНО ВО «МПСУ» в г. Брянске ; редкол. : Н. А. Патов [и др.]. – Брянск : Новый проект, 2015. – С. 253–255.

24. Марко, О. Ю. Влияние добавки «УКД-1» на сохраняемость формовочных свойств бетонной смеси / О. Ю. Марко, Е. Е. Корбут, Д. А. Рабыко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 220–221.

25. Марко, О. Ю. Бетон с добавкой «УКД-1» в зимних условиях ведения работ / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16 Междунар. науч.-техн. конф. (71 науч.-техн. конф.

профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол. : С. В. Харитончик, А. М. Маляревич, А. С. Калиниченко. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 2. – С. 223.

26. Марко, О. Ю. Твердение бетона с добавкой «УКД-1» с начальным разогревом и кратковременным прогревом / О. Ю. Марко, Е. Е. Корбут // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 271–272.

27. Марко, О. Ю. Разработка энергосберегающих режимов твердения бетона с добавкой «УКД-1» / О. Ю. Марко, Е. Е. Корбут // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 18–21.

28. Корбут, Е. Е. Характеристики и свойства сульфатосодержащих добавок и их влияние на схватывание и твердение цемента / Е. Е. Корбут, О. Ю. Марко, А. А. Масленков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 237–238.

29. Марко, О. Ю. Твердение бетона с добавкой «УКД-1» при отрицательной температуре воздуха / О. Ю. Марко, Е. Е. Корбут, А. А. Савостеенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусско-Российский университет ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 247–248.

### **Производственно-практическое издание**

30. Технологический регламент на приготовление и применение комплексной наноуглеродосодержащей добавки «УКД-1» в бетон для производства бетонных и железобетонных изделий и монолитного строительства : ТР-1-2021 / НИИЛ БиСМ филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт». – Минск : БНТУ, 2021. – 38 с.



## РЭЗІЮМЭ

Марко Вольга Юр'ёўна

**Тэхналогія тэрмаснага бетанавання з ужываннем комплекснага хімічнага дадатку, які змяшчае вугляродны нанаматэрыял**

**Ключавыя словы:** цэмент, дабаўка, тэхналогія, цэментны камень, бетон, уласцівасці, энергазберажэнне.

**Мэта працы:** распрацоўка энергазберагальнай тэхналогіі бетону, мадыфікаванага комплексным хімічным дадаткам, які змяшчае вугляродны нанаматэрыял, для вытворчасці зборных вырабаў і маналітнага будаўніцтва.

У выніку тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў распрацавана ўдасканаленая тэхналогія бетону з выкарыстаннем комплекснага дадатку «УКД-1», у склад якога уваходзяць суперпластыфікатар, паскаральнік цвярдзення і вугляродны нанаматэрыял, якая забяспечвае высокі тэмп яго цвярдзення пры зніжэнні ў 2 і больш разоў энэргетычных выдаткаў на паскарэнне гэтага працэсу.

Устаноўлена рацыянальная дазіроўка дадатку «УКД-1», якая складае 0,7 % ... 1,0 % ад масы цэменту і якая забяспечвае рост трываласці бетону, які цвярдзее пры станоўчай тэмпературы асяроддзя (5 °С ... 25 °С) за 24...48 г адпаведна  $\geq 50$  % і  $\geq 80$  % ад узроўню трываласці праектнага (28 сут) ўзросту, пры кароткачасовым разагрэве (за 2...4 г) бетону з 0,7 % ... 1,0 % «УКД-1» да тэмпературы 30 °С ... 50 °С і наступнай вытрымцы зборных вырабаў ва ўстаноўках цеплавой апрацоўкі, а маналітных канструкцый у термоізаляванай апалубцы на працягу 16...24 г (уключаючы ўмовы цвярдзення пры тэмпературы вонкавага паветра да -20 °С) забяспечваецца трываласць 70 % ... 90 % ад яе ўзроўню ў праектным (28 сут) узросце. Спалучэнне нагрэву бетону з дадаткам 2...4 г да 30 °С ... 50 °С з кароткачасовым ізатэрмічным прагрэвам (на працягу 1...4 г) забяспечвае рэалізацыю малаэнергаёмкай (з больш чым 2-разовым зніжэннем выдаткаў энэргіі) тэхналогіі маналітнага бетону пры тэмпературы навакольнага асяроддзя да -20 °С у неўцепленых тыпах апалубкі (палуба з фанеры ( $K_T \sim 2,98$  Вт/ (м<sup>2</sup>·°С)), драўлянай дошкі ( $K_T \sim 2,44$  Вт/ (м<sup>2</sup>·°С)), што забяспечвае эфектыўнае круглагадовае вядзенне бетонных работ, уключаючы зімовы перыяд.

Адначасова выяўлена, што ўвядзенне 0,7 % ... 1,0 % «УКД-1» у роўнаарухомыя бетонныя сумесі (марак П5...П1 адпаведна) забяспечвае зніжэнне іх водааддзялення да 25 % ... 40 % і растворааддзялення да 18 % ... 22 %, што спрыяе захаванню іх аднастайнасці, аднастайнасці ўласцівасцяў і павышэнню якасці бетону.

Выканана вытворчая апрабацыя вынікаў даследаванняў, якая пацвердзіла іх эфектыўнасць.

## РЕЗЮМЕ

**Марко Ольга Юрьевна**

### **Технология термосного бетонирования с применением комплексной химической добавки, содержащей углеродный наноматериал**

**Ключевые слова:** цемент, добавка, технология, цементный камень, бетон, свойства, энергосбережение.

**Цель работы:** разработка энергосберегающей технологии бетона, модифицированного комплексной химической добавкой, содержащей углеродный наноматериал, для производства сборных изделий и монолитного строительства.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана усовершенствованная технология бетона с использованием комплексной добавки «УКД-1», содержащей суперпластификатор, ускоритель твердения и углеродный наноматериал, обеспечивающая высокий темп его твердения при снижении в 2 и более раза энергетических затрат на ускорение этого процесса.

Установлена рациональная дозировка добавки «УКД-1», составляющая 0,7 % ... 1,0 % от массы цемента и обеспечивающая рост прочности бетона, твердеющего при положительной температуре среды (5 °С ... 25 °С) за 24...48 ч соответственно  $\geq 50$  % и  $\geq 80$  % от уровня прочности проектного (28 сут) возраста, при кратковременном разогреве (за 2...4 ч) бетона с 0,7 % ... 1,0 % «УКД-1» до температуры 30 °С ... 50 °С и последующей выдержке сборных изделий в установках тепловой обработки, а монолитных конструкций в термоизолированной опалубке в течение 16...24 ч (включая условия твердения при температуре наружного воздуха до -20 °С) обеспечивается прочность 70 % ... 90 % от ее уровня в проектном (28 сут) возрасте. Сочетание нагрева бетона с добавкой за 2...4 ч до 30 °С ... 50 °С с кратковременным изотермическим прогревом (в течение 1...4 ч) обеспечивает реализацию малоэнергоемкой (с более чем 2-кратным снижением затрат энергии) технологии монолитного бетона при температуре окружающей среды до -20 °С в неутепленных типах опалубки (палуба из фанеры ( $K_T \sim 2,98$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С)), деревянной доски ( $K_T \sim 2,44$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С)), что обеспечивает эффективное круглогодичное ведение бетонных работ, включая зимний период.

Одновременно выявлено, что введение 0,7 % ... 1,0 % «УКД-1» в равноподвижные бетонные смеси (марок П5...П1 соответственно) обеспечивает снижение их водоотделения до 25 % ... 40 % и раствооротделения до 18 % ... 22 %, что способствует сохранению их однородности, однородности свойств и повышению качества бетона.

Выполнена производственная апробация результатов исследований, подтвердившая их эффективность.

**RESUME****Marko Olga Yuryevna****Thermos concreting technology using a complex chemical additive containing carbon nanomaterial**

**Keywords:** cement, additive, technology, cement stone, concrete, properties, energy saving.

**The purpose of the work:** to design an energy-saving technology of concrete modified with a complex chemical additive containing a carbon nanomaterial for the production of prefabricated elements and monolithic construction.

As a result of theoretical and experimental studies, improved concrete technology has been designed using a complex additive “UKD-1” containing a superplasticizer, a hardening accelerator, and a carbon nanomaterial, which provides a high rate of concrete hardening and reduces the energy costs for accelerating this process by 2 or more times.

A rational dosage of the additive “UKD-1” has been established, which is 0.7–1.0 % of the cement mass. This dosage provides the strength increase of concrete (which hardening at a positive temperature environment 5–25 °C)  $\geq 50$  % of the strength level and at the design age (28 days) for 24 hours,  $\geq 80$  % of the strength level for 48 hours, respectively. In case of short-term concrete heating (within 2–4 hours) with adding 0.7–1.0 % of “UKD-1” to a temperature of 30–50 °C, and subsequent exposure of prefabricated elements in heat treatment plant and monolithic structures in heat-insulated formworks within 16–24 hours (including hardening conditions at outdoor temperature up to -20 °C), this provides 70–90 % of the level strength at the design age (28 days). The combination of the heating concrete with the additive in 2–4 hours up to 30–50 °C and short-term isothermal heating method (within 1–4 hours) ensures the implementation of low-energy technology of monolithic concrete at outdoor temperature up to -20 °C in non-insulated types of formwork (made of plywood deck with  $k_T \sim 2.98$  W/(m<sup>2</sup>·°C), wooden boards with  $k_T \sim 2.44$  W/(m<sup>2</sup>·°C)). This combination leads to more than a double reduction in energy costs. The proposed technology provides effective year-round concrete work, including the winter period.

At the same time, it was established that the adding of 0.7–1.0 % “UKD-1” into equally workable concrete mixtures (classes S5–S1, respectively) reduces dehydration to 25–40 % and mortar separation to 18–22 %, which advantages to reserve concrete mix homogeneity, uniformity of properties and improves the quality of concrete.

The production approbation of the research results was carried out, which confirmed the effectiveness of obtained data.



Научное издание

**МАРКО**  
Ольга Юрьевна

**ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМОСНОГО БЕТОНИРОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ  
ДОБАВКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ УГЛЕРОДНЫЙ НАНОМАТЕРИАЛ**

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

Подписано в печать 28.03.2022. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,79. Тираж 60 экз. Заказ № 135.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.