

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 666.972; 693.54

ГУРИНЕНКО
Наталья Сергеевна

**ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА БЕТОНА
С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ,
СОДЕРЖАЩЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ МИКРОКРЕМНЕЗЕМ**

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

Минск, 2020

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **БАТЯНОВСКИЙ Эдуард Иванович**,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительные материалы и технология строительства» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **СЕМЕНЮК Славик Денисович**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев;

ГУБСКАЯ Алла Геннадьевна,
кандидат технических наук, зав. научно-исследовательской лабораторией физико-химических и теплофизических исследований Научно-исследовательского и проектно-производственного республиканского унитарного предприятия «Институт НИИСМ», г. Минск

Оппонирующая организация Республиканское дочернее унитарное предприятие «Белорусский дорожный научно-исследовательский институт "БелдорНИИ"», г. Минск

Защита состоится 24 апреля 2020 г. в 14⁰⁰ 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) 293-96-73, e-mail: kovshar-36@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «24» марта 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук

С. Н. Ковшар

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных народнохозяйственных задач строительной отрасли Беларуси является снижение энергопотребления в строительном производстве. Значительную роль в решении этой задачи играет сокращение затрат энергии на ускорение твердения бетона как при изготовлении сборных бетонных и железобетонных изделий, так и при строительстве из монолитного бетона и железобетона.

Одним из наиболее рациональных направлений в решении задачи снижения энергопотребления в технологии бетона при одновременном обеспечении его высоких физико-технических (потребительских) свойств является использование химических и минеральных добавок. В частности, тех из них, которые обеспечивают повышение темпа роста прочности бетона в начальный период (особенно в первые 24...72 часа) твердения, и тем самым позволяют снижать температуру и сокращать время подвода тепла к бетону, что сопровождается соответствующим уменьшением энергетических затрат на тепловую интенсификацию его твердения. При этом наиболее перспективно и актуально направление по разработке комплексных добавок, в которых сочетаются эффекты воздействия на реагирующую систему «цемент – вода» в цементном бетоне, взаимно дополняющие друг друга. В частности, многокомпонентные вещества, составляющие которых способствуют снижению начального водосодержания, развитию процессов гидролиза–гидратации цемента, зарождению кристаллогидратных новообразований, их ускоренному и в возрастающем количестве образованию, а на этой основе – ускоренному формированию плотной структуры цементного камня и бетона, что обеспечивает как высокий темп роста его прочности, так и уровень всей совокупности физико-технических свойств.

На решение данной задачи направлено настоящее диссертационное исследование.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Работа содержит результаты исследований автора, полученные при выполнении в БНТУ в 2009–2019 гг. научно-исследовательской работы по ГБ № 14-124 «Разработка инновационных технологий замещения щебня и получения вяжущих материалов с использованием наночастиц», что соответствует перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585 и перечню государственных программ научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.06.2015 № 483.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – получить комплексную полифункциональную добавку, характеризующуюся пластифицирующе-ускоряющим твердение бетона действием, разработать энергосберегающую технологию бетона с ее применением.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- разработать состав ускоряющего твердение и уплотняющего структуру компонента комплексной полифункциональной добавки в бетон, экспериментально установить рациональное соотношение его составляющих по критериям темпа роста и уровня прочности цементного камня (бетона);

- разработать состав полифункциональной пластифицирующе-ускоряющей добавки в бетон, содержащей ускоряюще-уплотняющий компонент, ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) и пластификатор, экспериментально установить их рациональное соотношение по критериям темпа роста и уровня прочности цементного камня (бетона);

- с использованием методов рентгенофазового и термического анализов в сочетании с оценкой количества химически связываемой цементом воды и степени его гидратации исследовать и обосновать механизм действия ускоряюще-уплотняющего компонента и полифункциональной добавки на процесс твердения цемента и выявить возможные изменения в морфологии продуктов его гидратации;

- экспериментально выявить влияние комплексной полифункциональной пластифицирующе-ускоряющей добавки на кинетику твердения и физико-технические свойства конструкционного тяжелого бетона, определить ее оптимальную дозировку и разработать технологический регламент на применение в бетоне;

- установить рациональные режимы твердения бетона с добавкой, провести производственную апробацию результатов исследований в варианте энергосберегающей технологии бетона (железобетона).

Таким образом, *объектом исследований* являлся конструкционный бетон, а *предметом исследований* – влияние химических (ускорителя твердения, уплотняющего структуру, пластификатора) и активных минеральных (микрокремнезема (МК) и ультрадисперсного микрокремнезема) добавок на свойства цементного теста, камня и бетона.

Основной гипотезой, которая получила экспериментальное подтверждение, было представление о том, что применение многофункциональной, разноплановой по эффектам воздействия на процесс и продукты взаимодействия цемента с водой, формирование структуры цементного камня и бетона комплексной добавки обеспечит более высокий темп роста прочности бетона, чем отдельное использование видов добавок, входящих в ее состав, и создаст основу для разработки эффективной энергосберегающей технологии бетона с ее применением.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в развитии научных представлений о влиянии на процессы взаимодействия цемента с водой и формирования новообразований – продуктов этих реакций, становления структуры и прочностных свойств твердеющего цементного камня и бетона комплексной химической добавки полифункционального действия, включающего эффекты пластификации, ускорения твердения, уплотнения формирующейся структуры и роста прочности за счет снижения водосодержания, образования дополнительных соединений и фаз в ее присутствии.

В частности, в результатах дериватографического и рентгенофазового анализов, показавших, что в пробах цементного камня, содержащего ускоряюще-уплотняющий компонент ($0,5\% \text{ Na}_2\text{SO}_4 + 0,25\% \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3$) полифункциональной добавки ($0,5\% \text{ Гпл} + 1,0\% \text{ УДМК} + 0,5\% \text{ Na}_2\text{SO}_4 + 0,25\% \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3$) и комплекс в целом, во-первых, наряду с C_2SH , появились продукты гидратации цемента сили-

катной группы в виде низкоосновного (мелкокристаллического) CSH. Во-вторых, увеличилось содержание этtringита ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$), способствующего уплотнению структуры цементного камня. В-третьих, снизилось содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и, за счет реакции гидроксида кальция с аморфным SiO_2 ультрадисперсного микрокремнезема, увеличилось общее количество кристаллогидратов силикатной группы в цементном камне с добавками, что в совокупности обеспечило рост его прочности до $\sim 30\%$ в суточном возрасте и до $\sim 25\%$ к 28 суткам.

Эти данные согласуются с экспериментально установленным ростом количества (до $\sim 38\%$) химически связанной воды цементом в присутствии ускоряюще-уплотняющего компонента ($0,5\% \text{Na}_2\text{SO}_4 + 0,25\% \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) полифункциональной добавки, в сравнении с пробами без добавки, при прочих равных условиях: водоцементном отношении цементного камня, равной исходной консистенции цементного теста, условий и времени твердения.

Имеет значимость экспериментальное обоснование более высокой эффективности ультрадисперсного микрокремнезема, в сравнении с традиционным микрокремнеземом, в цементном бетоне, отраженное в идентичности их влияния на кинетику роста и уровень прочности цементного камня и бетона при десятикратном уменьшении дозировки УДМК (1% от массы цемента (МЦ) вместо 10% МК) в бетон, что существенно упрощает технологию получения бетона с этой добавкой.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментально обоснованные рациональные сочетания компонентов полифункциональной добавки в бетон, включающей пластификатор I группы на основе поликарбоксилатных смол, характеризующийся повышенным водоредуцирующим эффектом (например, Стахемент 2000-М Ж 30 или Реламикс ПК) в количестве $0,25\% \dots 0,5\%$ от массы цемента, ускоряюще-уплотняющий компонент, включающий $0,35\% \dots 0,5\%$ сульфата натрия (CH ; (Na_2SO_4)) и $0,15\% \dots 0,25\%$ сульфата алюминия (CA ; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) и $0,25\% \dots 1,0\%$ активного минерального компонента – ультрадисперсного микрокремнезема, подтвержденные ростом прочности на сжатие цементного камня в возрасте 24 ч до 30% и к 28 суткам до 25% и тяжелого бетона до 50% и 40% , соответственно, в сравнении с бетоном, содержащим равное количество суперпластификатора, и до 80% и 70% по сравнению с бетоном без добавок при равной консистенции смеси и прочих равных условиях;

- обоснование эффективности действия полифункциональной добавки за счет возросшего количества новообразований силикатной группы (при уменьшении количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$), появления в них мелкокристаллического низкоосновного CSH, увеличения содержания этtringита, подтвержденного данными термического и рентгенофазового анализа проб цементного камня, что в совокупности обеспечило рост плотности цементного камня как базы для роста его прочности;

- экспериментально обоснованная возможность замены традиционного микрокремнезема, дозируемого в бетон с целью повышения его качественных характеристик в количестве $\geq 10\%$ от массы цемента, на ультрадисперсный микрокремнезем с десятикратным уменьшением его дозировки до $\leq 1\%$ от МЦ при сохранении уровня обеспечиваемой прочности и других свойств тяжелого конструкционного бетона;

- оценка прочностных и эксплуатационных свойств бетона с полифункциональной добавкой, подтвердившая их рост под влиянием ее вещества, а также результаты производственной апробации энергосберегающей технологии изготовле-

ния железобетонных изделий с ее применением, обеспечивающий снижение энергозатрат в 1,5...2 раза на ускорение твердения бетона, по сравнению с бетоном без добавок.

Личный вклад соискателя ученой степени. Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Совместно с научным руководителем – профессором Э. И. Батыновским, оценивался выбор направления исследований, а также результаты обобщения теоретических и экспериментальных данных. В публикациях, подготовленных совместно с другими авторами, соискатель осуществляла экспериментальную часть исследований и участвовала в совместной обработке, оценке и подготовке к опубликованию их результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Результаты диссертации представлены на следующих научных семинарах и конференциях: XVII Международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Гродно, 27–28 мая 2010 г.); научно-методическом семинаре «Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства» (г. Минск, 29 мая 2012 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева «Инновации в бетоноведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров» (г. Минск, 9–10 июня 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Инновации в дорожном строительстве» (г. Минск, 27–28 декабря 2016 г.); Международной научно-методической конференции «Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов)» (г. Минск, 30 мая 2017 г.); международной научно-методической конференции «Проблемы современного строительства» (г. Минск, 30 мая 2018 г.); XXI Международном научно-методическом семинаре «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (г. Брест, 25–26 октября 2018 г.); Международной научной конференции «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» (г. Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.); ежегодных Международных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава БНТУ в 2009–2019 гг.

Производственная апробация результатов исследований произведена на предприятиях: Государственном предприятии «УДМС и Б Мингорисполкома», «ЗЖБМК» ОАО «Дорстройиндустрия», филиале «Комбинат ЖБИК» ОАО «Оршанский строительный трест № 18», что подтверждается соответствующими актами.

Опубликование результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы отражены в 15 публикациях, в том числе в 5 статьях в изданиях по перечню ВАК, в 8 статьях и материалах докладов научно-технических конференций, получен 1 патент, подана 1 заявка на патент. Общий объем публикаций составляет 5,6 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Ее полный объем составляет 288 страниц, включая: 58 рисунков, 38 таблиц, 6 приложений на 183 страницах. Библиографический список включает 146 наименований, из которых 15 – авторские работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации рассмотрены основные положения современных представлений о процессах, сопровождающих твердение цементного бетона и их интенсификации химическими добавками. На основании анализа работ И. Н. Ахвердова, А. А. Байкова, В. Г. Батракова, Н. П. Блещика, В. В. Бозылева, Ф. Вавржика, А. И. Вовка, Н. И. Довнар, Ф. М. Иванова, В. И. Калашникова, С. С. Каприелова, В. В. Кинда, П. Г. Комохова, М. Н. Кузьменкова, З. М. Ларионовой, Ф. М. Ли, В. М. Москвина, Н. С. Протько, В. С. Рамачандрана, В. Б. Ратинова, П. А. Ребиндера, Т. И. Розенберг, Б. Г. Скрамтаева, В. С. Солдатова, В. А. Солнцевой, Х. Тейлора, Б. Д. Тринкера, А. В. Ушерова-Маршака, А. В. Шейнфельда, В. Н. Юнга, П. И. Юхневского, В. Н. Яглова, R. J. Detwiler, V. Falikman, S. Hanehara, A. Rauen, D. Sawaki, Wang Jia, H. Wchikawa и др. сделаны следующие выводы.

В современных условиях, несмотря на возросшее качество и наличие широкого выбора добавок в бетон, характеризующихся мононаправленным действием (например, ускорители твердения, пластификаторы, уплотняющие структуру и т. д.), все более широко и с большей эффективностью используются добавки полифункционального действия. Их эффективность, выраженная в повышении физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств бетона, существенно выше, чем она обеспечивается применением монодобавок. При этом наибольший эффект достигается сочетанием химических высокоэффективных пластифицирующих и ускоряющих твердение веществ с высокодисперсной минеральной составляющей – микрокремнеземом. В частности, в варианте успешно применяемых в строительстве органо-минеральных комплексных добавок серии «МБ». Одновременно с преимуществами этих добавок в бетон выявились недостатки, заключающиеся как в их высокой стоимости, так и в усложнении технологии приготовления бетона, так как их вводят в дозировке до 10 %...15 % и даже более от массы цемента, что требует соответствующего дооснащения бетоносмесительных узлов и сдерживает широкое применение таких добавок.

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

Во второй главе приведены методики испытаний и характеристики материалов, использованных в исследованиях и удовлетворяющих требованиям действующих нормативов. На основе анализа, выполненного в 1-й главе, по критериям эффективности в бетоне для исследований были выбраны доступные, недорогие (являющиеся побочными продуктами химических производств г. Светлогорска и г. Гомеля Беларуси) компоненты полифункциональной добавки: ускоритель твердения – сульфат натрия (CH ; (Na_2SO_4)) по ГОСТ 21458-75 и уплотняющий структуру цементного камня (бетона) – сульфат алюминия (CA ; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) по ГОСТ 12966-85, соли серной кислоты.

В качестве активного минерального компонента добавки использовали традиционный микрокремнезем и ультрадисперсный микрокремнезем, характеризующийся большей удельной поверхностью за счет малых размеров частиц аморфного SiO_2 , а значит и большим «реакционным» потенциалом, что подтверждают данные сравнительного гранулометрического анализа дисперсности традиционного микрокремнезема (рисунок 1а) и УДМК (рисунок 1б), полученные с помощью прибора

для измерения дисперсности твердофазных материалов «Analysette 22», NanoTec (Fritsch).

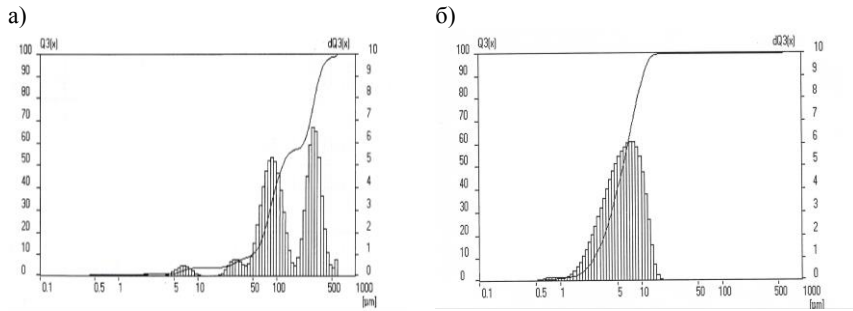


Рисунок 1. – Гранулометрический состав МК (а) и УДМК (б)

Установлено, что УДМК имеет существенные преимущества – сохранять устойчивость водной суспензии в течение 45...60 минут при механическом смешивании с водой и до 1,5...2,0 часов – при ультразвуковом воздействии в процессе смешивания, а также не снижать эффективности в цементном камне с увеличением срока хранения (таблица 1).

Таблица 1. – Прочность цементного камня в зависимости от срока хранения механически приготовленной суспензии (с побуждением перед применением)

Время хранения суспензии при механическом смешивании, сут	Прочность на сжатие, МПа, цементного камня с 1 % УДМК* от МЦ как среднее значение результатов испытаний серий из 6...12 образцов (20 x 20 x 20 мм) в возрасте, сут			
	1	3	7	28
0 (свежеприготовленная)	43,3	71,8	76,1	103,4
1	43,4	70,5	76,0	103,9
3	42,8	68,6	77,6	104,0
7	43,2	69,9	78,3	105,1

* Как оптимальной дозировкой в бетон, установленной в наших исследованиях.

В качестве пластификаторов использовали Стахемент 2000-М Ж 30 (Ст), выпускаемый по ТУ ВУ 800013176.004-2011, С-3 (ТУ 5745-001-97474489-2007), Реламикс ПК (РелПК) (ТУ ВУ 190679156.002-2013), Полипласт ПК (ТУ 20.59.59-109-58042865-2017) и Sika ViscoCrete 5-600 SK (ТУ 2493-009-13613997-2011), которые согласно СТБ 1112-98 относятся к пластифицирующим добавкам I группы.

Заполнители для бетона – щебень гранитный традиционный фракций 5...10 и 5...20 мм (ГОСТ 8267-93) и щебень кубовидный фракций 2...4; 4...6 мм (СТБ 1311-2002); песок природный $M_k \sim 2,6...2,8$ (ГОСТ 8736-93).

Вяжущее – портландцемент ПЦ 500-Д0 I группы эффективности при пропаривании по ГОСТ 30515-2013 (СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1-2015) (основные экс-

перименты; для бетона использовали ПЦ 500-Д20; ПЦ 400-Д20; ШПЦ 400); вода затворения – по СТБ 1114-98.

Кроме стандартизованных методик испытаний применены термический и рентгенофазовый анализ и общепризнанная методика оценки химически связанной цементом воды (методом прокаливания проб) с целью углубленного изучения возможных морфологических изменений в продуктах гидратации цемента в присутствии добавок, а также вариативные (авторские) методики испытаний.

В третьей главе изложены результаты экспериментальной оценки влияния компонентов полифункциональной добавки на свойства цементного камня с целью определения ее рационального состава и эффективности действия.

В таблице 2 частично приведены экспериментально выявленные изменения в кинетике твердения (в нормально-влажностных условиях (НВУ)) цементного камня (В/Ц ~ 0,25) без добавки, с добавкой 1 % Na_2SO_4 (СН) и разным соотношением СН и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (СА) в ускоряюще-уплотняющем структуре полифункциональной добавки.

Таблица 2. – Экспериментальные (табличные) данные о кинетике твердения (росте прочности) цементного камня под влиянием исследуемых добавок

Вид добавки и количество компонентов в % от МЦ	Прочность на сжатие					
	МПа				%*	
	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут		28 сут
1. Без добавки	33,0	54,4	56,5	59,8	68,0	100,0
2. 1 % СН	40,0	63,0	65,3	67,9	71,7	105,4
3. 1 % СН + 0,25 % СА	46,9	64,5	70,4	75,3	85,1	125,1
4. 0,5 % СН + 0,5 % СА	46,8	64,2	70,1	75,0	84,7	124,5
5. 0,5 % СН + 0,25 % СА	47,2	65,1	71,2	76,2	85,3	125,5

Для установления причинно-следственной связи роста прочности (на сжатие), зафиксированного и отраженного в результатах этих экспериментов, проведена оценка изменений в количестве химически связываемой цементом воды и степени его гидратации (таблица 3), а также выполнены дериватографический и рентгенофазовый анализ на возможные изменения в морфологии формирующихся в ее присутствии продуктов гидратации цемента.

Таблица 3. – Результаты определения степени гидратации цемента

Номер пробы	Состав пробы	Кол-во химически связанной воды $w_{хс}$, доли ед.	Кол-во воды, связанное при полной гидратации цемента w_0 , доли ед.	Степень гидратации цемента α , %
1	Без добавки (контрольная)	0,1164	0,227	51,28
2	0,5 % СН + 0,5 % СА	0,1570		69,16
3	0,5 % СН + 0,25 % СА	0,1610		70,92

Сопоставление графиков ДТА на дериватограммах (приведены в диссертации) для проб указанных в таблице 3 составов показало, что «пик» эндотермического

эффекта при разложении кристаллогидратов в пробах с добавками (СН + СА) смещается в сторону меньшей температуры (~ 720 °С...750 °С), чем у проб «чистого» цемента (~ 750 °С...770 °С). Это свидетельствует о понижении основности гидросиликатов кальция. Кроме этого, оценка геометрической площади эндотермических пиков графиков ДТА в области указанных температур (без добавки – площадь $F_1 \sim 193 \text{ мм}^2$; с добавкой 0,5 % СН + 0,25 % СА – $F_3 \sim 227,5 \text{ мм}^2$) показала ее рост под влиянием вещества добавки, что свидетельствует о возросшем количестве новообразований в соответствующих пробах цементного камня при прочих равных условиях (водоцементном отношении, условиях изготовления и твердения).

Анализ данных рентгенофазового анализа аналогичных проб в «привязке» ко времени твердения (1, 7 и 28 сут) показал, что в пробах с добавкой (СН + СА) возросло отражение этtringита и появление, наряду с тоберморитовым гелем C_2SH , низкоосновного CSH , который отсутствует в пробе без добавок. С учетом того обстоятельства, что низкоосновные соединения формируют и кристаллогидраты меньших размеров (а это в каменных материалах сопровождается ростом их плотности и прочности) данные рентгенофазового анализа коррелируют с результатами испытаний образцов цементного камня по прочности на сжатие, приведенными в таблице 2. В частности, образцы с добавкой 0,5 % СН + 0,25 % СА характеризовались большей прочностью, в сравнении с иными приведенными вариантами состава цементного камня, и особенно в начальный период твердения.

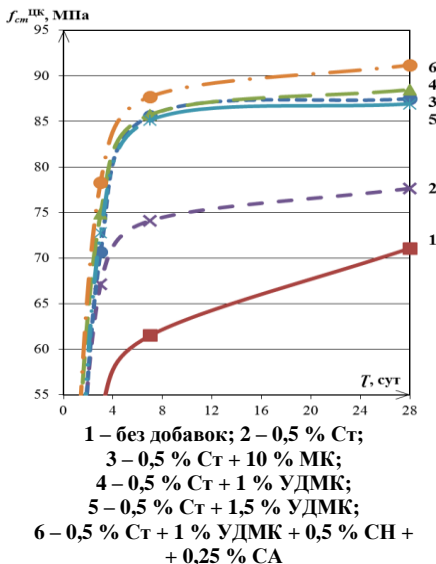


Рисунок 2. – Тенденция роста прочности образцов цементного камня при твердении в НВУ

Обобщение приведенных результатов экспериментов о наличии оптимума в соотношении СН : СА ~ 2:1 показало, что общее содержание добавки ~ 0,75 % от массы цемента позволяет рационально использовать присущие этим веществам эффекты.

В соответствии с целью исследований на следующем этапе экспериментально обосновали рациональное соотношение компонентов в полифункциональной комплексной добавке, включающей пластификатор, ультрадисперсный микрокремнезем и ускоряюще-уплотняющую составляющую СН + СА. Одновременно (в сравнительном варианте) оценили (по критерию роста прочности цементного камня) эффективность традиционного микрокремнезема и УДМК.

На рисунке 2 частично отражены результаты исследований влияния составляющих такой добавки и комплекса в целом на кинетику твердения цементного камня (тесто равной консистенции).

Очевидно практическое совпадение по значениям прочности (на сжатие) цементного камня, содержащего 10 % традиционного микрокремнезема (3) и 1 % УДМК (4) от массы цемента (при соблюдении правила прочих равных условий).

Также очевиден эффект от введения в цементный камень полифункциональной комплексной добавки, которую готовили в виде водного раствора в воде затвердения требуемого количества сульфата натрия, сульфата алюминия и пластификатора, затем ввода в него в расчетном количестве ультрадисперсный микрокремнезем.

Математическая обработка результатов исследований на прочность образцов цементного камня позволила получить уравнения регрессии:

$$y = 46,83 + 5,43 x_1 + 2,92 x_2 - 4,75 x_1x_1 - 4,00 x_2x_2 + 0,70x_1x_2, \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$y = 84,02 + 3,22 x_1 + 2,23 x_2 + 3,58 x_3 + 0,53 x_4 + 22,36 x_5 - 2,23 x_1x_1 - 3,23 x_2x_2 - 3,73 x_3x_3 + 2,77 x_4x_4 - 14,23 x_5x_5 + 1,32 x_1x_2 - 1,09 x_1x_4 - 2,01 x_1x_5 - 0,72 x_2x_3 + 0,53 x_2x_4 - 0,63 x_2x_5 + 1,12 x_3x_4 + 1,78 x_3x_5 - 1,22 x_4x_5, \text{ МПа}, \quad (2)$$

для ее оценки: уравнение (1) – с ускоряюще-уплотняющим компонентом; уравнение (2) – с полифункциональной добавкой), при отклонении расчетных и экспериментальных данных не более 5 %.

С учетом того обстоятельства, что введение с разрабатываемой добавкой аморфного кремнезема в цементный бетон способствует связыванию гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в нерастворимые гидросиликаты кальция и может понизить за этот счет уровень щелочности среды в бетоне, провели соответствующую оценку влияния УДМК на этот показатель. Измерения проводили с помощью портативного рН-метра марки HI 83141. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. – рН водных вытяжек из проб цементного камня

Время	Без добавок	0,5 % Ст	0,5 % Ст + + 10 % МК	0,5 % Ст + +1%УДМК	0,5 % Ст+ +1,5%УДМК	0,5%Ст+ + 1%УДМК+ +0,5%СН+ +0,25%СА
1 мин	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
2 мин	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3
10 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
30 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
60 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
2 сут	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
10 сут	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
20 сут	12,70	12,71	12,69	12,65	12,63	12,55
30 сут	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50
60 сут	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50

Очевидно, что исследуемое вещество (УДМК) в целом не критически снижает рН-фактор и, соответственно, при использовании его в железобетоне не требуется дополнительной защиты арматуры.

Одной из задач исследований являлась оценка влияния разрабатываемой полифункциональной добавки на тепловыделение цемента, так как теплота его экзотермии позволяет существенно снизить энергетические затраты на ускорение твердения бетона как в производстве сборных изделий, так и в монолитном строительстве (рисунок 3).

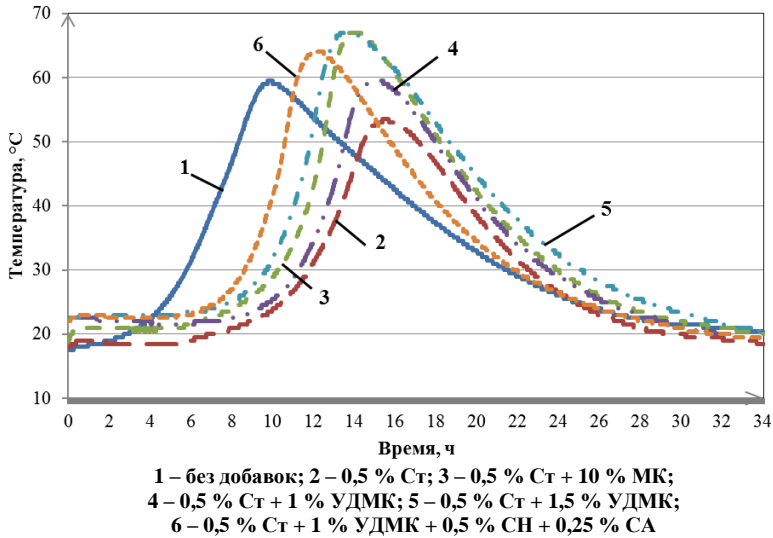


Рисунок 3. – Кинетика изменения температуры цементного теста

Очевидно, что на начальную фазу процесса гидратации цемента с добавками замедляющее влияние оказывает вещество пластификатора, молекулы поверхностно-активной составляющей которого частично «блокируют» поверхность частиц (флокул) вяжущего и сдерживают развитие его реакций с водой затворения. Также очевидно, что введение 10 % МК (3) и 1 % УДМК (4), а также 1,5 % УДМК (5), характеризуется практически равенством их влияния на тепловыделение цемента и саморазогрев цементного камня, твердевшего в условиях теплоизоляции, в оцениваемых временных пределах и при соблюдении правила прочих равных условий.

Логично, что наибольший эффект по совокупности явлений темпа саморазогрева и уровня температуры обеспечило введение полифункциональной добавки (график 6), в состав которой входит ускоряюще-уплотняющий компонент, способствующий ускорению процесса гидратации цемента.

По аналогии с ускоряюще-уплотняющим компонентом добавки провели оценку возможных изменений в морфологии продуктов гидратации цемента под влиянием веществ всего комплекса полифункциональной добавки, используя термический (термогравиметрический анализатор TGA/DSC1-1/1600 HF (METTLER TOLEDO); рисунок 4) и рентгенофазовый анализ (дифрактометр D8 Advance Bruker AXS (Германия); рисунок 5) проб цементного камня.

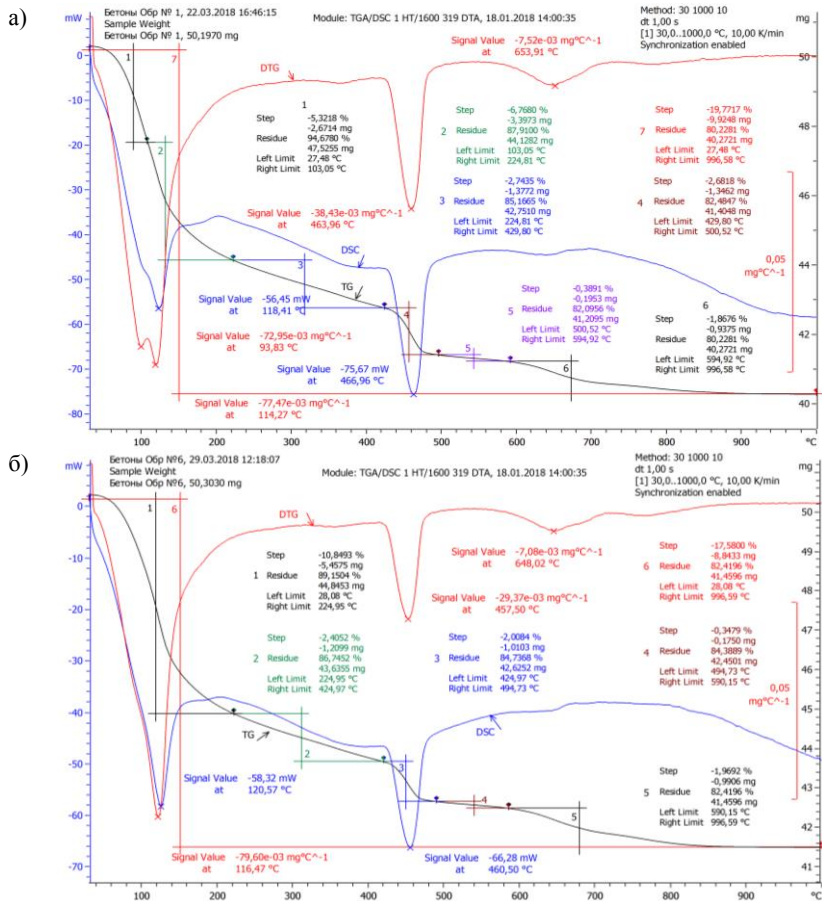


Рисунок 4. – Термограмма пробы «чистого» цементного камня (а), цементного камня, содержащего 0,5 % Ст + 1 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (б) от МЦ

Анализ графиков DSC и DTG (рисунок 4а) проб «чистого» цементного камня, и графиков (рисунок 4б) – проб с полифункциональной добавкой, показывает, во-первых, разницу в зоне температуры ~ 110 °С, отражающей потери «свободной» (находящейся в поровом пространстве проб цементного камня) воды. Снижение показателя проб «чистого» камня составляет ~ 70 мW, а проб с добавкой ~ 60 мW, то есть существенно меньше. Это свидетельствует об уменьшении объема пор в пробах цементного камня с добавкой, т.е. о росте плотности его структуры. Во-вторых, существенно уменьшилась площадь эндотермического «пика» в зоне температуры ~ 420 °С...480 °С, отражающего разложение гидроксида кальция (Ca(OH)₂), что свидетельствует о развитии реакции Ca(OH)₂ с аморфным SiO₂ при уменьшении количества гидроксида кальция. В-третьих, увеличивается площадь

эндотермического «пика» в зоне температур $\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 750\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом в пробах с добавкой снижается уровень минимальной температуры разложения: с $653,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ (проба без добавок) до $648,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ для пробы с добавкой.

Результаты рентгенофазового анализа (рисунок 5) по оценке возможных изменений в морфологии продуктов гидратации цемента под влиянием веществ полифункциональной добавки подтвердили ранее полученные данные для ускоряюще-уплотняющего компонента ($0,5\% \text{ CH} + 0,25\% \text{ CA}$) этой добавки о появлении гидросиликатов кальция низкой основности CSH и увеличении количества этtringита.

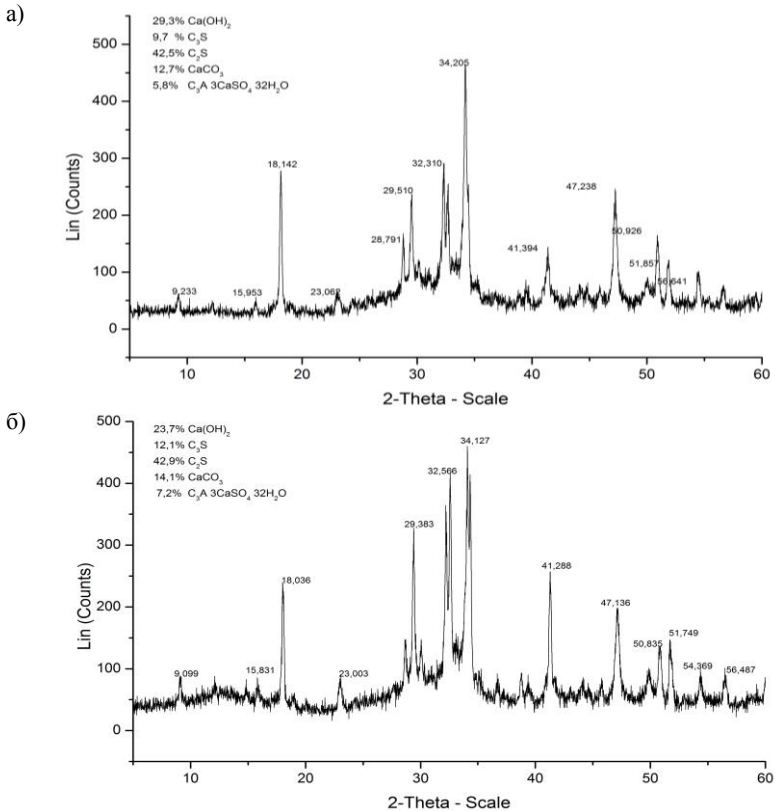
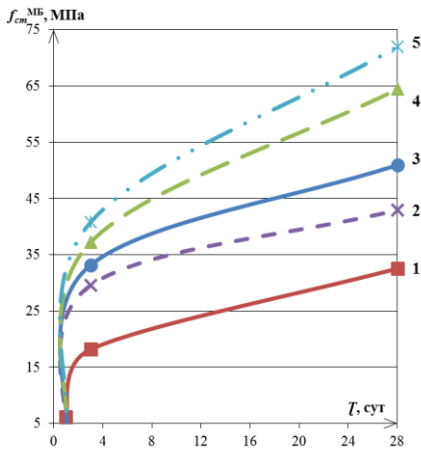


Рисунок 5. – Дифрактограмма пробы «чистого» цементного камня (а) и цементного камня, содержащего 0,5 % Ст + 1 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА (б) от МЦ

Кроме этого, отличие заключается в снижении количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с 29,3 % до 23,7 % для пробы с полифункциональной добавкой, при уменьшении отражений клинкерных минералов цемента, что свидетельствует об углублении процесса гидратации и согласуется с ранее приведенными данными.

Четвертая глава отражает особенности приготовления и введения разрабатываемой добавки в бетон, результаты исследований кинетики твердения и роста прочности тяжелого бетона (включая высокопрочный: $f_{cm,28} \geq 100$ МПа), а также ее влияния на его эксплуатационные свойства и режимы твердения, обеспечивающие снижение энергетических затрат на ускорение этого процесса.

Разработана технология приготовления полифункциональной комплексной добавки, включающая подготовку водного раствора ускоряюще-уплотняющего компонента: Na_2SO_4 и $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, введением требуемого количества этих веществ в воду, подогретую до $30\text{ }^\circ\text{C} \dots 35\text{ }^\circ\text{C}$, т.к. это оптимальная температура для растворения сульфата натрия. Затем в этот раствор вводят в расчетном количестве пластификатор, для которого указанная температура также является оптимальной. Последним компонентом в подготовленный раствор из трех указанных веществ дозируют требуемое количество ультрадисперсного микрокремнезема. Полученный раствор-суспензию в процессе приготовления и перед применением механически перемешивают, смешивают в требуемом количестве с водой затворения и вводят в бетон. Период устойчивого сохранения свойств раствора-суспензии в состоянии покоя (без признаков седиментации кремнезема) составляет 45...60 минут при механическом перемешивании (мешалки, барботаж сжатым воздухом) и не менее 7 суток при ультразвуковой (кавитационной) обработке на стадии приготовления.



- 1 – без добавок; 2 – 0,5 % Ст;
 3 – 0,5 % Ст + 1 % УДМК;
 4 – 0,5 % Ст + 1 % УДМК + 0,5 % СН;
 5 – 0,5 % Ст + 1 % УДМК + 0,5 % СН +
 + 0,25 % СА

Рисунок 6. – Кинетика роста прочности на сжатие мелкозернистого бетона, твердеющего в НВУ

Оценку влияния разрабатываемой добавки (с учетом изменения соотношения компонентов в ней) на прочность (сжатие и изгиб) на начальной стадии произвели на мелкозернистом бетоне (состав Ц : П = 1 : 3, при Ц = 500 кг; образцы-балочки 40 x 40 x 160 мм) при равной консистенции смеси.

Из данных рисунка 6 очевиден нарастающий эффект роста прочности мелкозернистого бетона с последовательным введением в состав с суперпластификатором Стахемент 2000-М Ж 30 (2) ультрадисперсного микрокремнезема (3) и ускорителя твердения (4), при наибольшем эффекте от введения комплекса в целом (5). Очевиден максимальный рост прочности за счет совокупности эффектов от снижения водосодержания бетона и влияния на процессы, сопровождающие твердение цемента и бетона, каждого из ее компонентов.

Для оценки прочности бетона получено уравнение регрессии:

$$y = 71,48 + 7,85 x_1 + 2,50 x_2 + 8,28 x_3 - 8,04 x_1 x_1 - 2,09 x_2 x_2 - 7,49 x_3 x_3 + 1,99 x_1 x_2 + 3,06 x_1 x_3, \text{ МПа}, \quad (3)$$

адекватно отражающее ее зависимость от входящих в состав полифункциональной добавки компонентов (обоснование приведено в диссертации).

Важным следствием использования добавок в бетоне является их влияние на усадочные деформации (ГОСТ 24544-81), особенно при твердении цементного бетона в воздушно-сухих условиях ($\phi \sim 40 \%$, температура: $t \geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

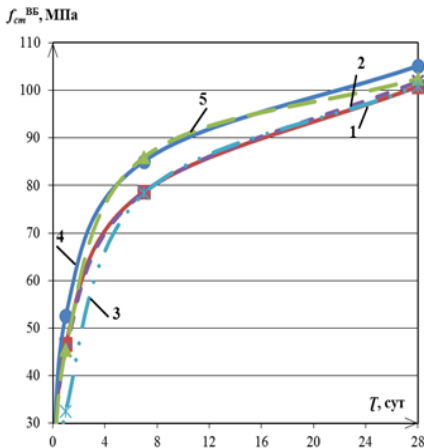
Результаты экспериментов (таблица 5) свидетельствуют о снижении (на $\geq 20 \%$) усадки бетона при замене микрокремнезема на УДМК и практически в 2 раза при использовании разрабатываемой добавки, что связано с ранее выявленным увеличением количества этtringита в новообразованиях цементного камня и большим количеством кристаллогидратов силикатной группы в целом, способствующих росту его плотности.

Таблица 5. – Результаты определения усадки мелкозернистого бетона

Возраст образцов, сут	0,5 % Ст + 10 % МК		0,5 % Ст + 1 % УДМК		0,5 % Ст + 1 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА	
	абсолютная деформация Δl , мм	относительная деформация $\epsilon_{ус}$, %	абсолютная деформация Δl , мм	относительная деформация $\epsilon_{ус}$, %	абсолютная деформация Δl , мм	относительная деформация $\epsilon_{ус}$, %
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,08	0,05	0,06	0,04	0,04	0,03
7	0,10	0,06	0,08	0,05	0,05	0,03
14	0,14	0,09	0,12	0,07	0,07	0,04
21	0,17	0,11	0,14	0,09	0,09	0,06
28	0,21	0,13	0,16	0,10	0,10	0,06

В современных условиях ведения бетонных работ и производства сборных изделий микрокремнезем и добавки, его содержащие, вводят в основном в состав высокопрочных бетонов, а также и для обеспечения повышенных характеристик в части плотности и непроницаемости «рядового» по прочности бетона ряда конструкций (изделий). В этой связи одной из задач, которые были решены в экспериментальных исследованиях с высокопрочным бетоном прочностью на сжатие в проектном возрасте $f_{cm,28} \sim 100 \dots 110$ МПа (номинальный состав: цемента – 500 кг; песка – 570 кг; щебня кубовидного (фр. 2...4 мм) – 350 кг; (фр. 4...6 мм) – 760 кг; подвижность марок П2 и П5 при В/Ц_{п2} $\sim 0,28$ долей ед. и В/Ц_{п5} $\sim 0,29$ долей ед., соответственно), являлась оценка возможности замены микрокремнезема (МК) в его составе на ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК), при дозировке последнего в 10 раз меньше, но без снижения прочности бетона. Реализация такого решения позволяет существенно упростить технологию приготовления конструкционного бетона (для бетона прочностью до 60...80 МПа материал приведен в тек-

сте диссертации) за счет введения УДМК в виде суспензии с водой затворения. Не менее значимой является задача по обеспечению прочности бетона более 100 МПа, полученного из литых бетонных смесей (ОК ~ 23 см), которую решили применением разработанной полифункциональной добавки (в данных экспериментах с повышенным содержанием пластификатора Реламикс ПК ~ 1 % от МЦ по сухому веществу (рисунок 7)).



- 1 – 0,5 % РелПК + 10 % МК;
 2 – 0,5 % РелПК + 1 % УДМК;
 3 – 1 % РелПК + 1 % УДМК (П5);
 4 – 0,5 % РелПК + 1 % УДМК +
 + 0,5 % СН + 0,25 % СА;
 5 – 1 % РелПК + 1 % УДМК +
 + 0,5 % СН + 0,25 % СА (П5)

Рисунок 7. – Тенденция роста прочности бетона

содержания) и на формирование (уплотнение и упрочнение) структуры цементного камня и бетона, прочность в нормально-влажностных условиях твердения повышается за первые 24 ч до 50 % и к проектному (28 суток) возрасту до 40 % для бетона, содержащего равное количество суперпластификатора, и до 80 % и 70 %, соответственно, для бетона без добавок, что позволяет на 10 %...15 % снизить расход цемента. При твердении с начальным разогревом бетона до $t \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и последующим выдерживанием в условиях «термоса» (при медленном (до $2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) остывании среды в тепловом агрегате) прочность за 12...16 ч достигает уровня в 70 %...90 % от проектной (при бóльших значениях для бетона из жестких смесей), что обеспечивает снижение в 1,5...2 раза энергозатрат на тепловую обработку изделий.

Одновременно с ростом прочности бетона снижается его водопоглощение (до 2 %...3 %), растет водонепроницаемость (до марки W8 ... W20) и морозостойкость (до марки F500 ... F1000 (бетон класса $\leq C50/60$) и до $\geq F1000$ (высокопрочный

По совокупности результатов экспериментов с высокопрочным бетоном подтверждена возможность замены традиционно применяемого микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем с эффектом 10-кратного снижения расхода последнего, что позволяет упростить технологию и организацию процесса его введения в приготавливаемую бетонную смесь, а в целом – упростить технологию получения конструкционного бетона с использованием разработанной полифункциональной добавки, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем.

Исследования свойств «рядового» по прочности бетона ($f_{cm,28} \sim 40 \dots 80 \text{ МПа}$; класс по прочности на сжатие C25/30 ... C50/60) показали, что за счет комплексного влияния веществ полифункциональной добавки на пластические свойства бетонной смеси (с сохранением равноподвижности при снижении водо-

бетон $f_{cm,28} \sim 100 \dots 110$ МПа). В связи с ростом непроницаемости бетона обеспечивается высокая степень защиты стальной арматуры, определенная электрохимическим методом контроля (СТБ 1168-99).

Производственная проверка основных положений технологии приготовления разработанной полифункциональной добавки, технологии приготовления бетона и изготовления изделий с его применением подтвердила результаты диссертационного исследования. Соответствующие акты и справки приведены в диссертации. Согласно им, применение полифункциональной добавки обеспечивает снижение расхода цемента на 10 %...15 % без ухудшения физико-механических свойств бетона и снижение в 1,5...2 раза энергозатрат на прогрев бетонных и железобетонных изделий, что в совокупности обеспечивает удельный экономический эффект до 5,0...7,5 бел. руб. на 1 м³ бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны научно-практические основы получения новой полифункциональной добавки в бетон, обеспечивающей повышение темпа и уровня роста его прочности при снижении энергетических затрат на ускорение процесса твердения [1–15].

2. Экспериментально выявлено рациональное соотношение компонентов полифункциональной добавки, соответствующее: суперпластификатора на основе поликарбоксилатных смол (например, Стахемент 2000-М Ж 30, Реламикс ПК или Полипласт ПК) – 0,25 %...0,5 % от массы цемента, ультрадисперсного микрокремнезема (SiO₂) – 0,25 %...1,0 % от МЦ, ускорителя твердения – сульфата натрия (Na₂SO₄) – 0,35 %...0,5 % от МЦ и уплотняющей структуру добавки – сульфата алюминия (Al₂(SO₄)₃) – 0,15 %...0,25 % от МЦ, при меньших значениях для тяжелого конструкционного бетона класса $\leq C50/60$ и больших значениях для высокопрочного, особо плотного бетона класса $\geq C70/85$ (прочностью $f_{cm,28} \geq 100$ МПа) [4, 6, 15].

3. Экспериментально обоснована зависимость роста прочности цементного камня и конструкционного тяжелого бетона, включая высокопрочный ($f_{cm,28} \geq 100$ МПа), от входящих в состав полифункциональной добавки компонентов и подтверждено преимущество применения всего комплекса в целом, обеспечившего рост прочности цементного камня в начальные 24 ч нормально-влажностного твердения до 30 % и к проектному (28 сут) возрасту до 25 %, а цементного бетона до 50 % и 40 %, соответственно, по сравнению с бетоном, содержащим равное количество примененного в добавке пластификатора, и до 80 % и 70 % в сравнении с бетоном без добавок [4, 6].

4. Установлено, что при кратковременном нагреве бетона с полифункциональной добавкой до 30 °С...35 °С и последующем термостатировании в тепловом устройстве прочность через 16 ч составляет 70 %...90 % от прочности в проектном (28 сут) возрасте, что обеспечивает необходимые и достаточные условия для реализации энергосберегающей технологии производства сборных изделий и устройства монолитных конструкций из бетона с разрабатываемой добавкой и снижение в 1,5...2 раза энергозатрат на его прогрев (обогрев) [4, 10].

5. Результаты термического и рентгенофазового анализа показано, что эффект роста прочности цементного камня и бетона базируется на образовании мелкокристаллической формы кристаллогидратов силикатной группы CSH, дополняющей традиционно формирующиеся при реакции трех- и двухкальциевого силиката с водой – C_2SH , а также на увеличении количества новообразований за счет реакции $Ca(OH)_2$ с аморфным SiO_2 и этtringита – $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, образующегося за счет реакций с алюминатами вещества ускоряюще-уплотняющего компонента добавки, что в совокупности обеспечивает рост плотности и прочности цементного камня. В бетоне эффект дополняется упрочнением зон контакта поверхности заполнителя с цементным камнем за счет реакции в этих объемах между $Ca(OH)_2$ и SiO_2 [1, 2, 3, 4, 8, 12, 13].

6. Экспериментально подтверждено равенство эффекта по влиянию на прочность бетона традиционно применяемого микрокремнезема, дозируемого в бетон ~ 10 % (и более) от массы цемента, и ультрадисперсного микрокремнезема в дозировке 1 % от массы цемента. При этом упрощается технология приготовления бетона, так как УДМК можно вводить в бетон как индивидуально с водой затворения, так и в составе разработанной полифункциональной добавки [2, 4, 5, 6, 9, 10, 13, 15].

7. Экспериментально подтверждена эффективность полифункциональной добавки, выразившаяся в росте качественных характеристик и свойств конструкционного тяжелого бетона в проектном (28 сут) возрасте: прочности на сжатие до 40 %, на растяжение при изгибе до 15 %, а также в снижении усадки до 50 % и водопоглощения до 2 %...3 %, росте морозостойкости до марки F500 ... F1000, водонепроницаемости до марки W8 ... W20; существенно возросла защитная способность бетона по отношению к стальной арматуре за счет роста плотности (непроницаемости) бетона [4, 5, 10, 13, 15].

Производственная апробация результатов исследований подтвердила их эффективность.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Экспериментально-практические результаты диссертационного исследования рекомендуются использовать:

- при производстве химических добавок в бетон, как в варианте полифункционального комплекса в целом, так и в варианте ускоряюще-уплотняющего компонента полифункциональной добавки, применяемого отдельно;
- при производстве сборных бетонных и железобетонных изделий для строительства;
- при строительстве зданий и сооружений различного назначения монолитным способом;
- при производстве строительных растворов и сухих строительных смесей различного назначения (с введением в их состав полифункциональной добавки или ее ускоряюще-уплотняющего компонента в сухом порошкообразном виде).



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Батяновский, Э. И. Физико-технические и структурно-морфологические свойства цементного камня с многокомпонентным ускорителем твердения / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко // Строит. наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 14–20.

2. Гуриненко, Н. С. Кинетика твердения и свойства цементного камня с ускоряющими твердение бетона добавками / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Автомобил. дороги и мосты. – 2014. – № 2. – С. 90–98.

3. Наномодифицированный бетон / Б. М. Хрусталева, В. Н. Яглов, Я. Н. Ковалев, В. Н. Романюк, Г. А. Бурак, А. А. Меженцев, Н. С. Гуриненко // Наука и техника. – 2015. – № 6. – С. 3–8.

4. Гуриненко, Н. С. Влияние полифункциональной добавки на процесс твердения и свойства цементного бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 4. – С. 330–338.

Статьи в сборниках научных трудов

5. Гуриненко, Н. С. Микро- и ультракремнезем в высокопрочном бетоне / Н. С. Гуриненко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / «Ин-т БелНИИС». – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 53–69.

6. Гуриненко, Н. С. Полифункциональная добавка с ультрадисперсным микрокремнеземом для цементного бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / «Ин-т БелНИИС». – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 135–154.

Статьи в других изданиях

7. Теоретико-практические аспекты эффективности добавок-ускорителей твердения бетона / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко, И. А. Кортянович, Д. А. Михневич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : сб. науч. ст. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Т. М. Пецольд (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2010. – С. 278–282.

Статьи в материалах семинаров и конференций

8. Структурно-морфологические изменения и прочность цементного камня / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский, Д. В. Карнилович, Е. Н. Пашкевич // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. ст. (материалы науч.-метод. семинара), Минск, 29 мая 2012 г. : в 2 ч. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа, С. Н. Делендик. – Минск, 2012. – Ч. 2. – С. 52–64.

9. Гуриненко, Н. С. Цементный камень с ультрадисперсным микрокремнеземом / Н. С. Гуриненко // Инновации в бетоноведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров : сб. ст. по материалам Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г. : в 2 ч. / Беларус. нац. техн. ун-т, Ин-т жилища – НИПТИС, Союз строителей Респ. Беларусь ; редкол.: Э. И. Батяновский, В. В. Бабицкий. – Минск, 2016. – Ч. 1. – С. 71–76.

10. Гуриненко, Н. С. Конструкционный тяжелый бетон с добавкой ультракремнезема / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Инновации в дорожном строи-

тельстве : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 дек. 2016 г. / Белавтор [и др.]. – Минск, 2016. – С. 105–114.

11. Гуриненко, Н. С. Микро- и ультрадисперсный кремнезем в бетоне / Н. С. Гуриненко, Е. В. Головатая // Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск, 2017. – С. 232–239.

12. Гуриненко, Н. С. Основы эффективности ультрадисперсного микрокремнезема в цементном бетоне / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30 мая 2018 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск, 2018. – С. 256–264.

13. Гуриненко, Н. С. Об эффективности применения в цементном камне и бетоне полифункциональной добавки с ультрадисперсным микрокремнеземом / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест, 2018. – Ч. 2. – С. 14–22.

Патенты

14. Химическая добавка для ускорения твердения цемента : пат. 21123 ВУ МКИ С 04 В 22/08 / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский. – Оpubл. 10.03.2017.

15. Комплексная добавка для ускорения твердения и повышения прочности бетона : заявка 2018/ЕА/0100 / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко. – Оpubл. 21.12.2018.

РЭЗІЮМЭ Гурыненка Наталля Сяргееўна

Тэхналогія і ўласцівасці бетону з поліфункцыянальнай дабаўкай, якая змяшчае ультрадысперсны мікракрэмнязем

Ключавыя словы: цэмент, паскаральнікі цвярдзення, мікракрэмнязем, ультрадысперсны мікракрэмнязем, цэментны камень, бетон, высокатрывалы бетон, трываласць, уласцівасці.

Мэта працы – атрымаць комплексную поліфункцыянальную дабаўку, якая характарызуецца пластыфікуюча-паскаральным цвярдзенне бетону дзеяннем, распрацаваць энергазберагальную тэхналогію бетону з яе выкарыстаннем.

У выніку тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў распрацавана комплексная поліфункцыянальная дабаўка ў бетон, якая ўключае суперпластыфікатар на аснове поліакрыламідаў (напрыклад, Стахемент 2000-М В 30 або Рэламікс ПК) – 0,25 %...0,5 % ад вагі цэменту, ультрадысперсны мікракрэмнязем (SiO_2) – 0,25 %...1,0 % ад ВЦ, паскаральнік цвярдзення – сульфат натрыю (Na_2SO_4) – 0,35 %...0,5 % ад ВЦ і ўшчыльняючы структуру сульфат алюмінію ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – 0,15 %...0,25 % ад ВЦ і якая пры меншых дазіроўках забяспечвае рост трываласці бетону класаў $\leq \text{C50/60}$ з роўнаароўнаемых сумесяў да 50 % праз 28 дзён цвярдзення ў нармальна-вільготных умовах і да 40 % у практычным (28 сутак) узросце ў параўнанні з бетонам, які змяшчае роўную колькасць ужытага ў дабаўцы пластыфікатару, і да 80 % і 70 % у параўнанні з бетонам без дабавак; пры большых дазіроўках забяспечвае атрыманне высокатрывалага і асабліва шчыльнага бетону ($f_{cm,28} \geq 100$ МПа) з літых сумесяў.

Распрацавана ўдасканаленая энергазберагальная тэхналогія цяжкага канструкцыйнага бетону, адлюстраваная ў адпаведным тэхналагічным рэгламенце, якая ўключае прыёмы прыгатавання і выкарыстання поліфункцыянальнай дабаўкі ў бетон, атрыманы з сумесяў асноўнага дыяпазону кансістэнцый, якія выкарыстоўваюцца ў будаўніцтве. Абгрунтаваны рэжымы цвярдзення бетону з дабаўкай пры кароткачасовым (за 1,5...2 гадзіны) разагрэве да тэмпературы 30 °С...35 °С з наступнай вытрымкай вырабаў у цеплавым аграце на працягу 12...16 гадзін без падводу цяпла, якія забяспечваюць трываласць на ўзроўні да 70 %...90 % ад практычнай, што дазваляе ў 1,5...2 разы знізіць расход цеплавой энергіі на прагрэў бетону.

Устаноўлены асноўныя фізіка-механічныя і эксплуатацыйныя ўласцівасці і характарыстыкі цяжкага канструкцыйнага бетону з дабаўкай, уключаючы высокатрывалы бетон (трываласцю на спіск $f_{cm,28} \sim 100...110$ МПа).

Эксперыментальна пацверджана магчымасць замены ў бетонах традыцыйнага мікракрэмнязему на ультрадысперсны мікракрэмнязем з эфектам 10-разовага зніжэння расхода апошняга (складае 1 % ад вагі цэменту), што палягчае працэс яго ўвядзення пры падрыхтоўцы бетоннай сумесі, а ў цэлым робіць больш простай тэхналогію атрымання бетону з такой дабаўкай.

Выканана вытворчая апрацаваная вынікаў даследавання, якая пацвердзіла іх эфектыўнасць.

РЕЗЮМЕ

Гуриненко Наталья Сергеевна

Технология и свойства бетона с полифункциональной добавкой, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем

Ключевые слова: цемент, ускорители твердения, микрокремнезем, ультрадисперсный микрокремнезем, цементный камень, бетон, высокопрочный бетон, прочность, свойства.

Цель работы – получить комплексную полифункциональную добавку, характеризующуюся пластифицирующе-ускоряющим твердение бетона действием, разработать энергосберегающую технологию бетона с ее применением.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана комплексная полифункциональная добавка в бетон, включающая суперпластификатор на основе поликарбоксилатных смол (например, Стахемент 2000-М Ж 30 или Реламикс ПК) – 0,25 %...0,5 % от массы цемента, ультрадисперсный микрокремнезем (SiO_2) – 0,25 %...1,0 % от МЦ, ускоритель твердения – сульфат натрия (Na_2SO_4) – 0,35 %...0,5 % от МЦ и уплотняющий структуру – сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – 0,15 %...0,25 % от МЦ и обеспечивающая при меньших дозировках рост прочности бетона классов $\leq \text{C}50/60$ из равноподвижных смесей до 50 % через 24 ч твердения в нормально-влажностных условиях и до 40 % в проектном (28 суток) возрасте по сравнению с бетоном, содержащим равное количество примененного в добавке пластификатора, и до 80 % и 70 % в сравнении с бетоном без добавок; при больших дозировках обеспечивает получение высокопрочного и особо плотного бетона ($f_{\text{cm},28} \geq 100$ МПа) из литых смесей.

Разработана усовершенствованная энергосберегающая технология тяжелого конструкционного бетона, отраженная в соответствующем технологическом регламенте, включающая приемы приготовления и работы с полифункциональной добавкой в бетон из смесей основного диапазона консистенций, используемых в строительстве. Обоснованы режимы твердения бетона с добавкой при кратковременном (за 1,5...2 ч) разогреве до температуры 30 °С...35 °С с последующим выдерживанием изделий в тепловом агрегате в течение 12...16 ч без подвода тепла, обеспечивающие прочность на уровне до 70 %...90 % от проектной, позволяющие в 1,5...2 раза снизить расход тепловой энергии на прогрев бетона.

Установлены основные прочностные и эксплуатационные свойства и характеристики тяжелого конструкционного бетона с добавкой, включая высокопрочный бетон (прочностью на сжатие $f_{\text{cm},28} \sim 100 \dots 110$ МПа).

Экспериментально подтверждена возможность замены традиционно применяемого в бетонах микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем с эффектом 10-кратного снижения расхода последнего (составляет 1 % от массы цемента), что упрощает процесс его введения в приготавливаемую бетонную смесь, а в целом упрощает технологию получения бетона с такой добавкой.

Выполнена производственная апробация результатов исследования, подтверждающая их эффективность.

SUMMARY

Gurinenko Natalya

Technology and properties of concrete with a multifunctional additive, containing microsilica ultra dispersible

The key words: cement, hardening accelerators, microsilica, microsilica ultra dispersible, cement stone, concrete, high strength concrete, strength. properties.

The purpose of the work: to obtain a complex multifunctional additive, characterized by plastifying-accelerating concrete injection action, to develop energy-saving concrete technology with its use.

As a result of theoretical and experimental studies, a complex polyfunctional additive to concrete was developed, including a superplasticizer based on polycarboxylate resins (for example, Stachement 2000-M L 30 or Relamix PK) – 0.25 %...0.5 % by weight of cement, microsilica ultra dispersible (SiO_2) – 0.25 %...1.0 % of the WC, hardening accelerator – sodium sulfate (Na_2SO_4) – 0.35 %...0.5 % of the WC and sealing structure – aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – 0.15 %...0.25 % of the WC and providing, at lower dosages, an increase in concrete strength classes $\leq \text{C}50/60$ from equal mixes up to 50% after 24 h of hardening in normal-humidity conditions and up to 40% in the project (28 days) of age, as compared with concrete containing an equal amount of additive applied to the plasticizer and up to 80 % and 70 %, as compared with concrete without the additive; at large dosages, it provides high-strength and especially dense concrete ($f_{cm,28} \geq 100$ MPa) from cast mixtures..

An improved energy-saving technology of heavy structural concrete has been developed, reflected in the corresponding technological regulation, including methods of preparation and work with a polyfunctional additive to concrete from mixtures of the main range of consistencies used in construction. Substantiated during the hardening of concrete with the additive during short-term (1.5...2 h) heating to a temperature of 30 °C...35 °C, followed by holding the products in a heating unit for 12...16 h without heat supply, providing strength at the level of up to 70 %...90 % of the project, allowing 1.5...2 times to reduce the consumption of thermal energy for concrete heating.

The main strength and operational properties and characteristics of heavy structural concrete with additives, including high-strength concrete (compressive strength $f_{cm,28} \sim 100...110$ MPa), have been established.

The possibility of replacing microsilica traditionally used in concrete with microsilica ultra dispersible with the effect of a 10-fold reduction in the consumption of the latter (equal to 1 % of the cement mass) has been experimentally confirmed, which simplifies the process of its introduction into the prepared concrete mix, and generally simplifies the technology for producing concrete with such an additive.

The production approbation of the research results was completed, which confirmed their effectiveness.

Научное издание

ГУРИНЕНКО
Наталья Сергеевна

**ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА БЕТОНА
С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ,
СОДЕРЖАЩЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ МИКРОКРЕМНЕЗЕМ**

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

Подписано в печать 10.03.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,45. Уч.-изд. л. 1,14. Тираж 80. Заказ 188.

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.

