

На правах рукописи



Шулдяков Кирилл Владимирович

**ТЯЖЕЛЫЕ БЕТОНЫ, СТОЙКИЕ К ЦИКЛИЧЕСКИМ
ВОЗДЕЙСТВИЯМ В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пенза – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Крамар Людмила Яковлевна

Официальные оппоненты: **Соловьева Валентина Яковлевна**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I», и.о.
заведующего кафедрой «Инженерная химия и ес-
тествознание»

Ильина Лилия Владимировна,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин)», декан
факультета инженерных и информационных тех-
нологий

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государствен-
ный университет технологий и управления
(ВСГУТУ)», г. Улан-Удэ

Защита состоится 19 марта 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте: <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01/2-uncategorised/111-shuldyakov-kirill-vladimirovich>.

Автореферат разослан 19 января 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Бакушев
Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В стратегии социально-экономического развития Арктической зоны России отмечается, что для улучшения промышленной, энергетической и транспортной инфраструктуры необходимо решить проблему ресурсного обеспечения объектов строительства с учетом экстремальных природно-климатических условий. В связи с этим актуальными становятся вопросы совершенствования технологий производства конструкционных композиционных материалов, удовлетворяющих специальным требованиям для использования их на объектах строительства в суровых климатических условиях*. Для строительства высокотехнологичных и ресурсоемких объектов инфраструктуры, а также железных дорог, скоростных автомобильных магистралей и аэродромов на территории северной строительно-климатической зоны перспективным становится применение цементных бетонов со специальными функциональными свойствами. Подобный тип бетонов в конструкциях и сооружениях в суровых условиях эксплуатации подвергается циклическим механическим нагрузкам и климатическим воздействиям. Стойкость бетонов к физико-механическим воздействиям существенно зависит от вида новообразований цементного камня, параметров микроструктуры и их стабильности. Управлять фазовым составом, структурообразованием и плотностью структуры цементного камня бетона для повышения его стойкости к внешним циклическим воздействиям в условиях Арктической зоны можно введением в бетонную смесь суперпластифицирующих (водоредуцирующих) и активных минеральных добавок. Исходя из этого, особую ценность представляет проведение комплексных исследований по формированию плотной и стабильной во времени микроструктуры, состоящей преимущественно из низкоосновных гидросиликатов, обеспечивающей повышенную стойкость цементного камня бетона при циклических физико-механических воздействиях. Результаты исследований имеют большое практическое значение при разработке научно-обоснованных технологических процессов изготовления бетонов для конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в суровых климатических условиях.

Исследование стойкости тяжелого бетона в суровых условиях эксплуатации и технологии его изготовления проводилось при грантовой поддержке Президента России (приказ №843, 2017 г.), Законодательного Собрания Челябинской области (№1153-пр, 2016 г.) и Губернатора Челябинской области (постановление №319, 2015 г.), а также в рамках государственного договора 7544ГУ2/2015 (У.М.Н.И.К.) Фонда содействия малых форм предприятий в научно-технической сфере по теме «Исследование технологии тяжелых бетонов, стойких к циклическим воздействиям».

* СП 131.13330.2018 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология»

Степень разработанности темы

Физико-химические процессы гидратационного твердения портландцемента и структурообразования цементного камня бетонов с различными пластифицирующими и активными минеральными добавками исследовались отечественными учеными Ю.М. Баженовым, В.Г. Батраковым, О.Я. Бергом, А.И. Вовком, А.В. Волженским, Г.И. Горчаковым, И.М. Грушко, Ф.М. Ивановым, Л.В. Ильиной, В.И. Калашниковым, С.С. Каприеловым, П.Г. Комоховым, А.И. Кудяковым, Т.В. Кузнецовой, В.С. Лесовиком, В.М. Москвиным, Г.В. Несветаевым, В.П. Носовым, А.М. Радовским, Н.К. Розенталем, В.Я. Соловьевой, М.М. Сычёвым, Б.Я. Трофимовым, С.В. Федосовым, С.В. Шестоперовым, С.В. Эккелем, М.Я. Якобсоном и другими, а также зарубежными учеными – P.C. Aitcin, L. Lei, M. Pigeon, J. Plank, H. Taylor, K. Yamada и другие. Установлено, что для повышения морозостойкости бетонов используют в основном два способа:

– повышение плотности цементного камня бетона с уменьшением объема макропор и их водопроницаемости, например, снижением В/Ц, путем введения в смесь поликарбоксилатных суперпластификаторов и активных минеральных добавок;

– создание в цементном камне бетона резервных воздушных пор (4–8 % от его объёма) с обеспечением толщины прослоек между соседними порами не более 0,025 мм, например, путем введения воздухововлекающих добавок.

Тем не менее, для обеспечения стойкости тяжелого бетона в суровых условиях эксплуатации необходимы дополнительные сведения о механизме разрушения при циклическом воздействии влаги, отрицательных температур или механических нагрузок. Известно, что при внешнем механическом воздействии вокруг макро и капиллярных пор бетона концентрируются напряжения, превышающие их средние значения в 1,7–2,0 раза, что существенно повлияет на стойкость при воздействии отрицательных температур на увлажненный бетон в северной строительно-климатической зоне. Особенности изменения структуры бетонов с поликарбоксилатными добавками и микрокремнеземом в суровых климатических условиях при циклических физико-механических воздействиях требуется исследовать дополнительно. Необходимо установить взаимосвязь между фазовым составом, микроструктурой цементного камня и стойкостью тяжелого бетона к физико-механическим внешним циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации.

Цель работы: научное обоснование способа получения тяжелых бетонов повышенной стойкости к циклическому замораживанию и физико-механическим воздействиям.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Исследование влияния добавок суперпластификаторов с разным механизмом водоредуцирования совместно с активной пуццоланой на процесс

формирования структуры гидратных фаз цементного камня и её неизменность при различных воздействиях в суровых условиях эксплуатации.

2. Исследование влияния условий формирования первичной микроструктуры гидратных фаз цементного камня на свойства тяжелого бетона.

3. Исследование микроструктуры цементного камня бетона при внешних физико-механических циклических воздействиях.

4. Установление технологических особенностей производства тяжелого бетона с использованием местных сырьевых ресурсов для суровых условий эксплуатации железобетонных конструкций и проведение их технико-экономической оценки.

Объект исследования: тяжелый бетон с водоредуцирующими добавками и микрокремнеземом для изготовления конструкций зданий и сооружений, подвергающихся при эксплуатации в суровых климатических условиях циклическим воздействиям.

Предмет исследования: процессы, обеспечивающие направленное формирование гелеобразной структуры гидратных фаз цементного камня, её неизменность при различных циклических воздействиях и влияние на свойства тяжелых бетонов.

Научная новизна работы

1. Установлено, что в комплексной добавке, состоящей из пластификатора и микрокремнезема, замена пластификатора на основе нафталинформальдегида на пластификатор на основе поликарбоксилата обеспечивает увеличение марки по морозостойкости бетона с F₂300 до F₂500 вследствие сохранения при циклических воздействиях «замораживание – оттаивание» в цементном камне слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция пластинчатого строения за счет снижения содержания в нём портландита.

2. Установлено, что циклические механические нагружения бетона, с уровнем напряжений выше 80 % от призмочной прочности, активизируют перекристаллизацию метастабильных гидратных фаз цементного камня, сопровождающуюся выделением микрокристаллов портландита, что уменьшает на 37 % количество циклов нагружения образцов до разрушения.

Теоретическая значимость работы заключается в установлении зависимостей между оптимальными дозировками модифицирующих добавок и условиями формирования в цементном камне низкоосновных гидросиликатов, которые в условиях различных циклических воздействий остаются неизменными. Пуццоланизация и водоредуцирование поликарбоксилатным суперпластификатором обеспечивают формирование слабозакристаллизованных гидратных фаз цемента. Остаточное содержание портландита 3–5 % от массы цемента может быть критерием стойкости микроструктуры и долговечности бетона.

Практическая значимость

1. Установлено, что при совместном введении в бетон микрокремнезема и поликарбоксилатного суперпластификатора MasterGlenium ACE 430 на

37 % повышается стойкость к циклическим механическим воздействиям и марка по морозостойкости до F₂₅₀₀.

2. Выявлено, что постоянная скорость насыщения бетона 5 % раствором поваренной соли при испытании морозостойкости, обеспечивается неизменностью пористости и микроструктуры цементного камня. По увеличению кинетики насыщения можно сделать вывод об увеличении пористости, вследствие изменения микроструктуры цементного камня, что может использоваться для оценки морозостойкости бетона.

3. Установлены оптимальные режимы тепловлажностной обработки разработанных составов бетонов и составлены технологические схемы для сборной и монолитной технологии железобетонных дорожных плит.

4. Эффективность разработанных технологий бетона подтверждена при проведении опытно-промышленных испытаний. Получен тяжелый бетон класса по прочности на сжатие B60, на осевое растяжение не менее 4,4 МПа и на растяжение при изгибе не менее 8,4 МПа, с высокими показателями по морозостойкости F₂₅₀₀, водонепроницаемости W16 и износостойкости G1. Изготовленные дорожные плиты использованы фирмами ООО «Инновационные технологии в строительстве» и ООО «Опытный завод «УралНИИстром» при устройстве дорожного полотна.

Методология исследования

Методологической основой исследования является системный подход к изучению процессов структурообразования цементного камня в бетоне, включающий создание математической модели, позволяющей установить взаимосвязь между структурой и свойствами цементного камня бетона при различных воздействиях среды эксплуатации. Научная гипотеза связывает повышение стойкости тяжелого бетона с формированием цементного камня предпочтительно из низкоосновных гидратных фаз с C/S <1,5.

Методы исследования

Для установления количественных характеристик цементного камня и бетона использовались испытания, соответствующие требованиям национальных стандартов, а также комплекс физико-химических методов исследования структуры цементного камня: рентгенофазовый, дифференциально-термический, термогравиметрический, калориметрический и сканирующая электронная микроскопия, модифицированная рентгеновским микроанализатором.

Положения, выносимые на защиту:

1. Увеличение марки по морозостойкости бетона с F₂₃₀₀ до F₂₅₀₀ за счет замены в комплексной добавке, состоящей из пластификатора и микрокремнезема, нафталинформальдегидного пластификатора на поликарбоксилатный, что обеспечивает снижение содержания в цементном камне портландита и сохранение при циклических воздействиях «замораживание – оттаивание» слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция пластинчатого строения.

2. Количество циклических механических нагружений бетона до разрушения, с уровнем напряжений выше 80 % от призмной прочности, сни-

жается на 37 % в результате перекристаллизации метастабильных гидратных фаз цементного камня, подтверждающееся выделением микрокристаллов портландита.

Степень достоверности результатов исследований характеризуется коэффициентом вариации не более 5 % и построением математических моделей, адекватность которых подтверждается критерием Фишера, а воспроизводимость критерием Кохрена. При проведении экспериментов использовалось аттестованное оборудование и поверенные приборы, результаты исследований подтверждены опытно-промышленными испытаниями при проведении внедрения.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались и публиковались в материалах: 65 и 68 научной конференции «Наука ЮУрГУ» (г. Челябинск, 2013 и 2016, ЮУрГУ); международной научно-технической конференции «Перспективы развития строительного материаловедения» (г. Челябинск, 2013, ЮУрГУ); III Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону (г. Москва, 2014, МГСУ); I международной научно-практической конференции «Строительство и экология: теория, практика, инновации» (г. Челябинск, 2015, ЮУрГУ); международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные науки – основа современной инновационной системы» (г. Омск, 2015, СибАДИ); международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Челябинск, 2015 и 2017, ЮУрГУ); II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием «Перспективные материалы в технике и строительстве: ПМТС 2015» (г. Томск, 2015, ТГАСУ); 8 научной конференции аспирантов и докторантов (г. Челябинск, 2016, ЮУрГУ); XX международной научно-технической конференции «Проблемы строительного комплекса России» (г. Уфа, 2016, УГНТУ); IV международной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: Новые идеи и перспективы» (г. Томск, 2017, ТГАСУ); международной конференции по строительному производству и энергосбережению (г. Гонконг, 2017, CEIS); международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и техно-сферная безопасность» (г. Челябинск, 2018, ЮУрГУ); XV международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2018, ТГАСУ).

Реализация полученных результатов

Разработана технология сборного и монолитного железобетона для устройства автомобильных дорожных покрытий. При промышленном внедрении, совместно с фирмой ООО «Инновационные технологии в строительстве» г. Челябинск, построено 200 погонных метров дорожного покрытия по сборной технологии. По решению рабочей группы Министерства Транспорта Российской Федерации железобетонные плиты включены в Перечень инновационной продукции гражданского назначения и рекомендованы к государственным закупкам.

Также было осуществлено строительство экспериментального участка дорожного полотна из железобетонных плит в г. Челябинске совместно с ООО «Опытный завод «УралНИИСтром». Разработанная в диссертации технология бетона признана более эффективной по сравнению с аналогами.

Полученные в диссертации выводы и рекомендации используются в специальных курсах и выпускных квалификационных работах на кафедре «Строительные материалы и изделия» архитектурно-строительного института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 08.03.01, 08.04.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и 08.06.01 «Техника и технология строительства».

Личный вклад диссертанта состоит в разработке методологии работы, плана экспериментов и их реализации, а также оптимизации варьируемых факторов и установление математических моделей, тщательной подготовке материалов и оборудования, обеспечении достоверности проводимых исследований, анализе и описании полученных результатов, выборе оптимальных решений и проведении промышленного внедрения разработанной в диссертации технологии.

Публикации

Основные выводы и результаты диссертационного исследования опубликованы в 22 научных работах, в том числе шесть статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, семь статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура и объём диссертации

Диссертация объёмом 178 страниц формата А4 состоит из введения, пяти глав, выводов по главам, заключения, списка сокращений, списка литературы и двух приложений. В работе содержится 70 рисунков и 29 таблиц в основном тексте, а также 15 таблиц в приложении А. Список литературы содержит 273 наименования на русском и английском языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются актуальность и современные методы решения исследуемой проблемы – необходимость учета структурных особенностей гидратных фаз цементного камня тяжелых бетонов для повышения их стойкости в суровых условиях эксплуатации. Сформулированы цели и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе (*Бетоны для суровых условий эксплуатации. Состояние вопроса*) рассмотрены актуальные задачи и проблемы разработки тяжелых бетонов, стойких к циклическим воздействиям в суровых климатических условиях. Для развития транспортной, промышленной и энергетической инфраструктуры Арктики, Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока необ-

ходимо разработать конструкционные цементные бетоны со специальными функциональными параметрами качества. Наиболее агрессивное влияние на тяжелые бетоны в процессе эксплуатации оказывают циклические механические воздействия, а также замораживание и оттаивание при насыщении растворами солей антиобледенителей и морской водой. В национальных стандартах для суровых условий эксплуатации нормируется марка бетона по морозостойкости не ниже F₂₄₅₀ и класс по прочности выше В45, что обеспечивается увеличением расхода цемента, снижением В/Ц и применением воздухововлекающих добавок. Безусловно, эти факторы оказывают значительное влияние на характеристики бетона. Однако, для управления параметрами и стабильностью качества тяжелых бетонов необходимы знания процессов и факторов, влияющих на формирование гидратных фаз цементного камня с добавками при циклических физико-механических внешних воздействиях в суровых климатических условиях.

Управлять процессами гидратации и структурообразования цементного камня можно путем введения различных модифицирующих добавок. Широкое распространение в мировой строительной практике получил микрокремнезем, способствующий формированию в бетоне микроструктуры цементного камня с повышенным содержанием низкоосновных гидросиликатов кальция высокой плотности и прочности. Высокая дисперсность микрокремнезема является причиной повышения водопотребности бетонной смеси, поэтому его необходимо вводить совместно с эффективными водоредуцирующими добавками. Повышенное водоредуцирование до 40 % обеспечивается при введении в бетонную смесь поликарбоксилатных суперпластификаторов, которые активно используются в производстве бетонов.

По результатам литературного обзора установлено, что при значительном объеме исследований свойств тяжелых бетонов (с В/Ц менее 0,35), вопросы обеспечения стойкости гидратных фаз цементного камня при циклических воздействиях в суровых условиях эксплуатации до сих пор изучены недостаточно.

Во второй главе представлены используемые материалы и методы исследования. Для изготовления тяжелого бетона применялся цемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства «Дюккерхофф Коркино цемент», исследования цементного камня проводили на ЦЕМ I 42,5Б «Топкинский цемент», а при внедрении использовали ЦЕМ I 42,5Н цементных заводов «Горнозаводскцемент» и «Якутцемент». Все цементы соответствовали требованиям ГОСТ 31108-2016, содержание С₃А не превышало 7 %. Крупный заполнитель – щебень Новосмолинского карьера фракции 5...20 и 5(3)...10 соответствующий требованиям ГОСТ 8267-93. Мелкий заполнитель – песок кварцевый месторождения «Хлебороб» с М_к=2,4, соответствующий требованиям для среднего песка I класса по ГОСТ 8736-2014. Все заполнители соответствуют требованиям ГОСТ 26633-2015. Для пластификации и водоредуцирования бетонной смеси применяли поликарбоксилат MasterGlenium ACE 430 (ACE), изготовитель BASF (СТО 70386662-310-2014), рекомендуемый для получения изделий с высоким качеством поверхности, прочностью и плотностью.

Для сравнения использовали наиболее распространенный нафталинформальдегидный суперпластификатор СП-1, изготовитель ООО «Полипласт Урал-Сиб», отвечающий требованиям ТУ 5870-005-58042865-05. В качестве активной минеральной добавки применяли микрокремнезем (МК), г. Новокузнецк, соответствующий требованиям ТУ 5743-048-02495332-96.

Испытания свойств цементного камня и бетона проводилось в соответствии с требованиями национальных стандартов, а также использовались методики для оценки их стойкости к циклическим воздействиям. При определении фазового состава цементного камня использовали дериватографические (ДТА), рентгеновские (РФА), калориметрические и электронно-микроскопические методы исследований. Проектирование состава бетона осуществлялось по методу абсолютных объёмов. Разработаны математические модели типа «состав-свойства», достоверность и адекватность которых оценивалась по критериям Фишера и Кохрена. Для оценки стабильности результатов экспериментальных исследований и параметров качества бетона определялись коэффициенты вариации.

В третьей главе (*Структура и свойства цементного камня с добавками модификаторами*) приведены результаты исследований структуры и свойств цементного камня.

При исследовании свойств цементного камня реализован двухфакторный план эксперимента, в котором значимыми факторами приняты дозировки поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезема.

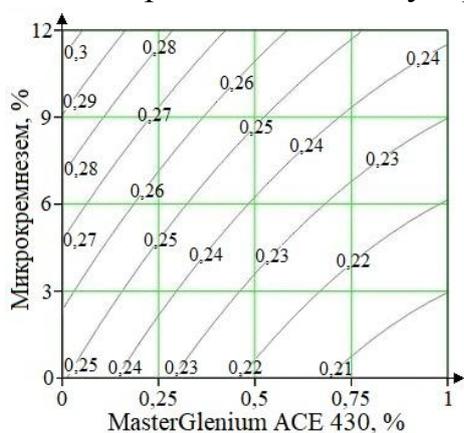


Рисунок 1 – Влияние добавок на величину водовяжущего отношения

Так как МК является пуццолановой добавкой и взаимодействует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе C_3S , то было принято считать его компонентом вяжущего, а водопотребность оценивать не по водоцементному, а по водовяжущему отношению (рисунок 1).

Установлено, что при введении пластификатора совместно с МК сохраняется значение нормальной плотности цементного теста на уровне состава без добавок ($V/V=0,25$), а при введении ACE в количестве 1 % и МК 6 % снижается до $V/V=0,225$.

Результаты испытаний прочностных характеристик цементного камня нормальной плотности приведены на рисунке 2. По полученным данным прочность цементного камня при сжатии в основном зависит от V/V отношения. При введении МК эффект модификации продуктов гидратации проявляется только с увеличением возраста образцов цементного камня.

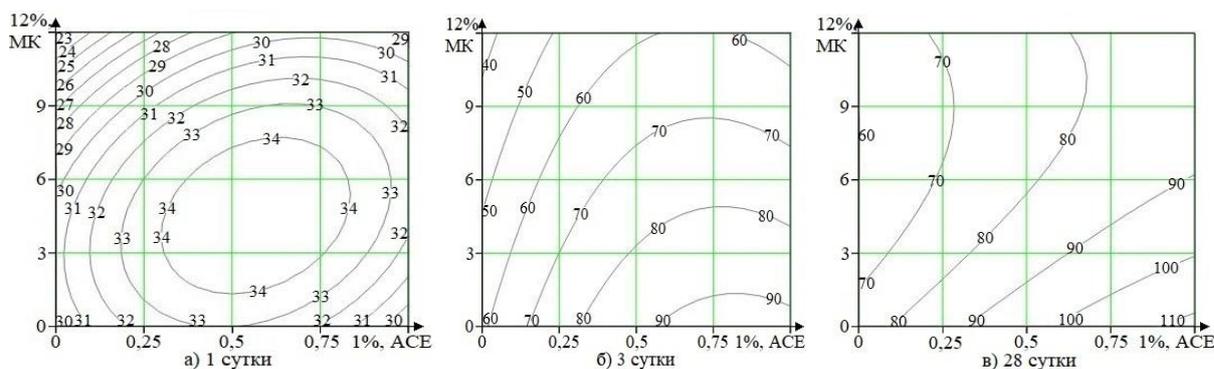


Рисунок 2 – Характер изменения прочности на сжатие образцов цементного камня в зависимости от вводимого количества добавок, МПа

Введение в цементный камень добавок, в количестве 0,4–0,8 % АСЕ и 6–8 % МК от массы цемента, в первые сутки твердения приводит к ускорению процессов структурообразования и обеспечивает ему наибольшую прочность 34 МПа. Наиболее интенсивный набор прочности цементного камня в основном происходит в период до 3 суток, при достижении максимальной прочности 90 МПа.

В возрасте 28 суток, при совместном введении добавок 0,8–1 % АСЕ и 8–12 % МК, прочность цементного камня достигает значений 80–90 МПа, с дальнейшим её увеличением до 100 МПа. Цементный камень с добавкой пластификатора в количестве 0,5–1 % набирает прочность свыше 100 МПа, что объясняется более низким $V/V=0,21$, по сравнению с $V/V=0,22...0,25$ при использовании АСЕ совместно с МК.

Прочностные характеристики бетона зависят от состава и структуры цементного камня.

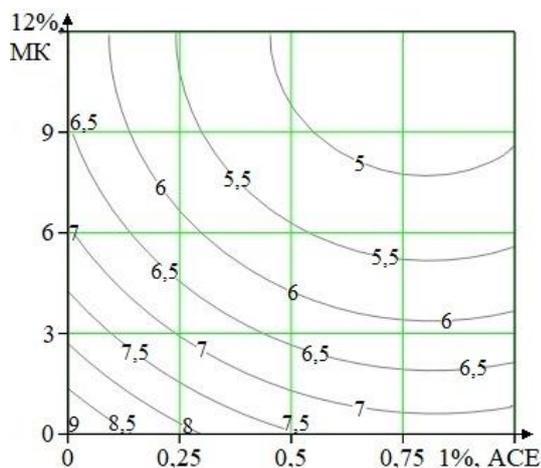


Рисунок 3 – Изменение содержания портландита в цементном камне, %

По данным ДТА (рисунок 3) в бездобавочном цементном камне в возрасте 28 суток содержание свободного гидроксида кальция составляет 9,0 %, что способствует формированию его структуры преимущественно из высокоосновных гидросиликатов. При введении суперпластификатора АСЕ содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне снижается до 7,5 %, а при введении МК до 6,5 %. Совместное использование добавок снижает содержание гидроксида кальция до 5 % и на дериватограммах наблюдается экзоэффект при температуре 830–860 °С, свидетельствующий о формировании слабозакристаллизованной С–S–Н(I) фазы.

Из данных рентгенофазового анализа цементного камня без добавок в возрасте 28 суток (рисунок 4) следует, что его структура представлена слабозакристаллизованными гидросиликатами С–S–Н(I) с $d/n=1,25; 0,307; 0,28; 0,183$ нм, С–S–Н(II) с $d/n=0,98; 0,307; 0,285; 0,28; 0,24; 0,183; 0,156$ нм, а также $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с $d/n=0,493; 0,311; 0,263; 0,193; 0,179; 0,1485$ нм, C_3AH_6 с

$d/n=0,514; 0,282; 0,230; 0,223; 0,204; 0,141$ нм и остатками непрореагировавших исходных цементных минералов.

Исследование цементного камня без добавок с использованием электронной растровой микроскопии подтверждает данные РФА (рисунок 5) – на поверхности скола видны сформировавшиеся кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, слабозакристаллизованные массы из гидросиликатов кальция, типа C–S–H(II), которые по данным рентгеновского микроанализатора имеют повышенную основность – $C/S \geq 1,5$, и участки гелеподобной мелкокристаллической массы.

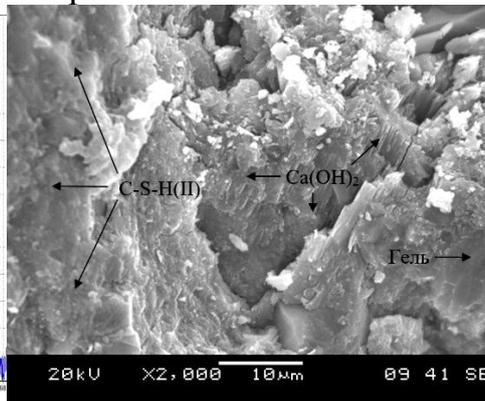
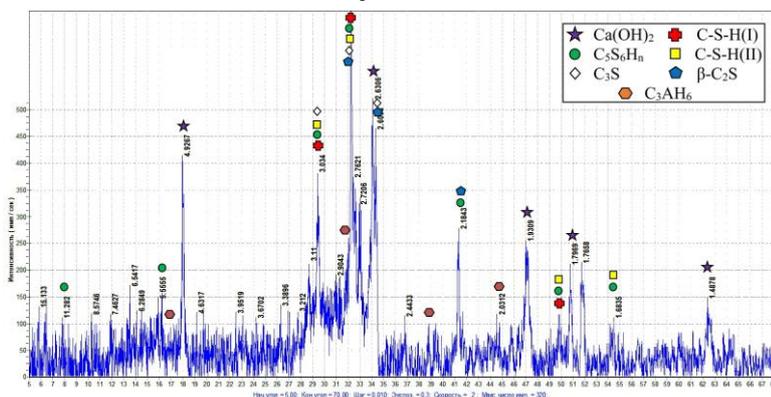


Рисунок 4 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня без добавок в возрасте 28 суток

Рисунок 5 – Снимок поверхности скола цементного камня без добавок в возрасте 28 суток

Цементный камень, модифицированный добавкой МК, отличается от бездобавочного плотной поверхностью с раковисто-занозистым изломом и фазовым составом, представленным низкоосновными гидросиликатами кальция – C–S–H(I) фазой, и содержанием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 6,5 %.

Структура цементного камня с добавкой поликарбоксилатного суперпластификатора состоит из гелеобразных высокоосновных гидросиликатных фаз, типа C–S–H(II) с $C/S \geq 1,5$ (рисунки 6 и 7), что подтверждается данными рентгеновского микроанализатора.

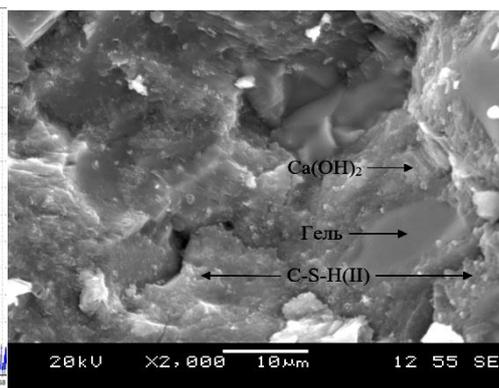
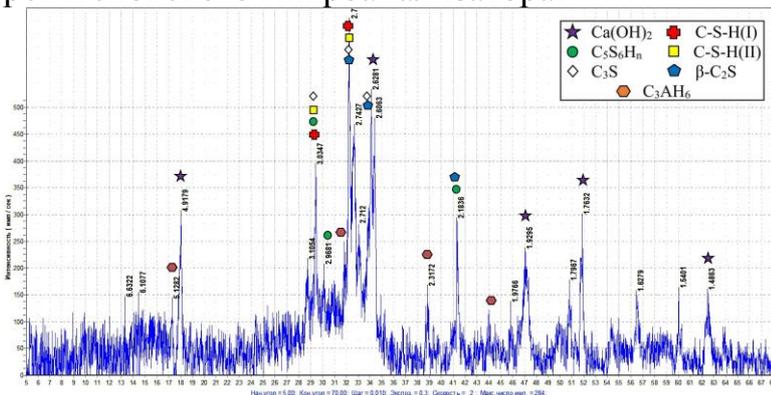


Рисунок 6 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня с 1 % добавки АСЕ

Рисунок 7 – Электронная микрофотография цементного камня с добавкой 1 % АСЕ

Портландит распределяется в цементном камне в виде небольших участков, которые располагаются между гидросиликатными составляющими.

На поверхности скола цементного камня (рисунок 8), модифицированного добавками АСЕ и МК, видны области слабозакристаллизованной C–S–H(I) фазы с отношением $C/S=1,1-1,3$ и наблюдаются отдельные вкрапления гидроксида кальция, при общем его содержании не более 5 %.

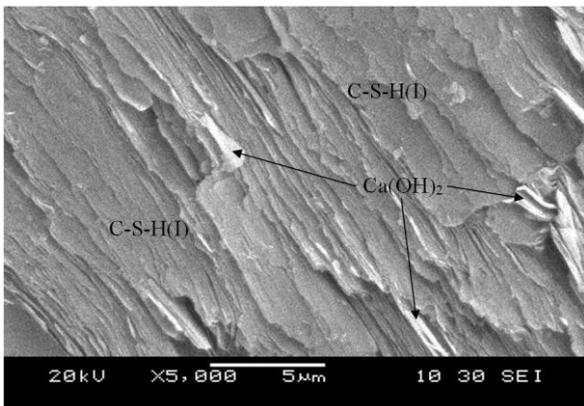


Рисунок 8 – Электронная микрофотография цементного камня с добавкой 1 % АСЕ и 12 % МК

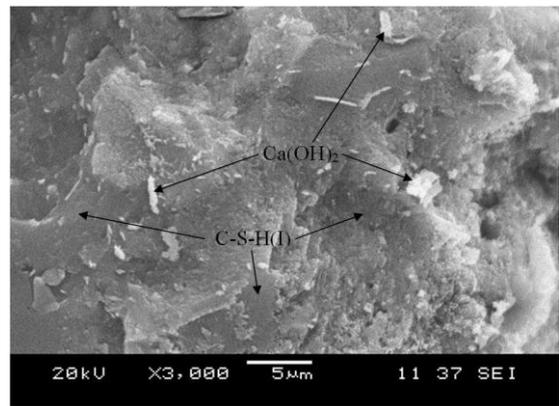


Рисунок 9 – Электронная микрофотография цементного камня с добавкой 1 % СП-1 и 12 % МК

Введение в цементный камень АСЕ+МК способствует формированию структуры из слабозакристаллизованных гидратных фаз пластинчатой формы, типа С–S–Н(I), что приводит к повышению его плотности и прочности.

Для уточнения модифицирующего эффекта поликарбоксилатного суперпластификатора на цементный камень, дополнительно проведено исследование влияния на его структуру нафталинформальдегидной добавки – СП-1. Из полученных данных следует, что введение добавки СП-1 существенно не влияет на фазовый состав цементного камня. При введении СП-1 совместно с МК структура цементного камня формируется преимущественно из низкоосновных гидросиликатных фаз типа С–S–Н(I) (рисунок 9 и 10).

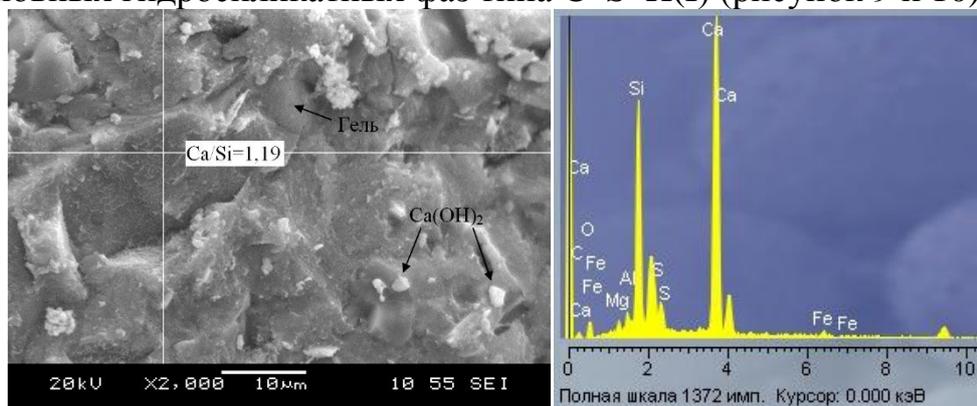


Рисунок 10 – Микроструктура цементного камня с добавками СП-1 и МК, а также графическое отображение результатов рентгеновского анализа в области перекрестия

В возрасте 28 суток нормального твердения и одинаковом В/В=0,24 наибольшим приростом прочности обладает цементный камень с добавками 1 % АСЕ+10 % МК – 110 МПа по сравнению с 1 % СП-1+10 % МК – 85 МПа. Из приведенных данных рентгенофазового анализа и электронной микроскопии следует, что при введении добавок СП-1+МК в структуре цементного камня содержится на 1,5 % больше свободного гидроксида кальция, чем с добавками АСЕ+МК. Таким образом, наибольшее влияние на прочность цементного камня оказывает модификация гидросиликатных фаз.

Оценку стойкости структуры цементного камня с различными добавками проводили по результатам циклических увлажнений и высушиваний, а также замораживаний и оттаиваний. Испытания проводили на образцах кубах с ребром 20 мм из теста нормальной плотности, твердевших 28 суток в воз-

душно-влажных условиях. При проведении исследований за один цикл испытания основных образцов были приняты следующие режимы – для увлажнения и высушивания два часа насыщения образцов в воде при температуре 20 °С и 22 часа высушивания при температуре 50 °С, а для замораживания и оттаивания – выдерживание на воздухе при температуре минус 20 °С в течение четырех часов и 20 часов оттаивание в воде при плюс 20 °С.

Контрольные образцы не подвергались внешним воздействиям и испытывались одновременно с основными. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные термоанализа цементного камня после циклических воздействий

Модификатор	Потеря адсорбционной влаги после нагрева до 200 °С, %	Портландит, %
Цементный камень без циклических воздействий		
1 % АСЕ	6,5	7,2
1 % СП-1	6,3	9,1
1 % АСЕ+10 % МК	7,3	4,2
1 % СП-1+10 % МК	7,3	5,7
Цементный камень после увлажнения и высушивания		
1 % АСЕ	4,6	6,9
1 % СП-1	3,8	8,9
1 % АСЕ+10 % МК	6,9	4,2
1 % СП-1+10 % МК	5,5	5,8
Цементный камень после замораживания и оттаивания		
1 % АСЕ	6,1	7,3
1 % СП-1	6	8,7
1 % АСЕ+10 % МК	6,9	4,3
1 % СП-1+10 % МК	6,5	5,9

Из полученных данных следует, что наиболее стойкими к циклическим воздействиям являются образцы с добавками 1 % АСЕ+10 % МК. Также установлено, что циклическое замораживание и оттаивание является менее агрессивным, чем циклическое увлажнение и высушивание.

При введении добавок АСЕ и МК в формируемой структуре цементного камня содержание гидроксида кальция и адсорбционно связанной воды практически не изменяется до и после циклических воздействий.

Таким образом, введение модифицирующих добавок – АСЕ и МК, способствует повышению стойкости цементного камня к увлажнению и высушиванию, а также замораживанию и оттаиванию, что обеспечивается направленным формированием слабозакристаллизованной структуры с пониженным содержанием Са(ОН)₂.

В четвертой главе (*Модифицированные бетоны и их свойства*) исследуются свойства бетонной смеси и тяжелых бетонов при циклических физико-механических внешних воздействиях.

Состав бетона с модифицирующими добавками рассчитывали по стандартному методу абсолютных объемов (таблица 2).

Таблица 2 – Откорректированная рецептура бетонов с модификаторами на 1 м³ бетонной смеси, кг

Модифицирующая добавка	Цемент	Микрокремнезем	Пластификатор	Вода	Песок	Щебень	В/Ц	R _{теорет.} , кг/м ³
Без добавок*	647	–	–	201	674	920	0,31	2442
СП-1	454	–	4,54	139	791	1090		2478
АСЕ	433	–	4,33	134	813	1100		2484
СП-1+МК	471	37,7	4,71	146	770	1040		2469
АСЕ+МК	468	37,4	4,68	145	768	1050		2473
*данный состав не рекомендуется для практического использования, а применялся только для сравнения структуры и свойств с модифицированными бетонами								

Все составы рассчитывались для бетона класса В60 с маркой по удобоукладываемости П1.

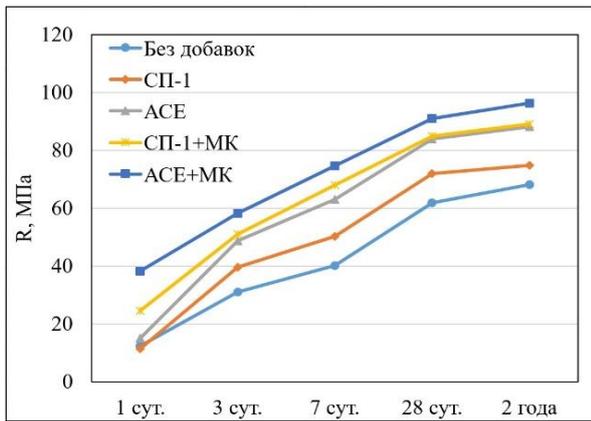
В процессе приготовления бетонной смеси добавки дозировали и вводили селективно – сухой микрокремнезем смешивали с цементом, а пластифицирующие добавки – с водой затворения. Однородность бетонной смеси оценивалась по коэффициенту вариации прочности бетона, а также определением содержания щебня в пробе бетонной смеси при испытании на раствороотделение. Результаты испытаний бетонной смеси приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технологические и реологические характеристики бетонной смеси по ГОСТ 7473-2010

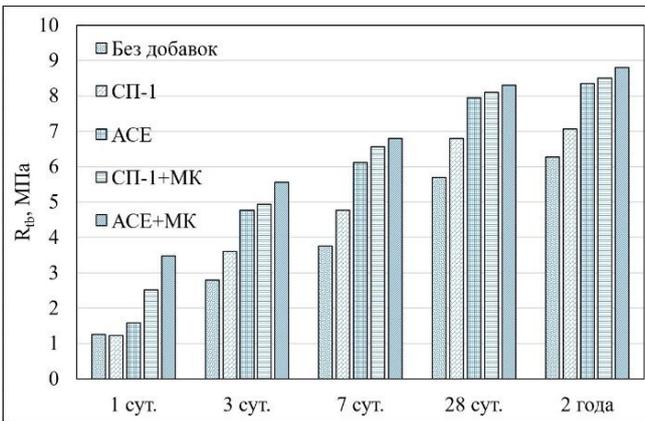
Модифицирующая добавка	Плотность, кг/м ³	ОК, см	Коэффициент уплотнения	Расслаиваемость, %		Сохраняемость, мин.	Коэффициент вариации, C _v , %
				Водоотделение	Раствороотделение		
Без добавок	2403	4±1	0,985	0,3±0,1	2,5	30	5±2
СП-1	2433	3±1	0,982	0,3±0,05	0,5	60	4±1
АСЕ	2435	4±1	0,980	0,15±0,1	0,4		3±1
СП-1+МК	2429	2±1	0,984	0	0,2		3±2
АСЕ+МК	2432	3±1	0,983	0	0,3		2±1

Влияние добавок модификаторов на прочностные свойства бетона в различные сроки нормального твердения представлены на рисунке 11.

Из полученных данных следует отметить модифицирующую роль добавки АСЕ, которая способствует формированию в бетоне слабозакристаллизованной структуры цементного камня и, соответственно, повышает его прочность. Интенсификация процессов структурообразования бетона путем введения модифицирующих добавок АСЕ и МК приводит к приросту прочности в суточном возрасте более чем в три раза.

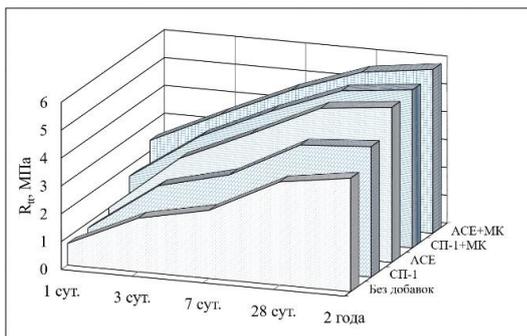


а) Сжатие



б) Растяжение при изгибе

Рисунок 11 – Прочностные характеристики бетонов



в) Растяжение при раскалывании

К 28 суткам бетон с АСЕ и МК имеет прочность на сжатие 91 МПа, растяжение при изгибе 8,1 МПа и растяжение при раскалывании 5,5 МПа. Прирост прочности в интервале с 28 суток до 2 лет примерно одинаков со всеми разновидностями добавок и составляет ~10–15 %.

Результаты испытания водопоглощения по массе бетонов с различными добавками представлены на рисунке 12.

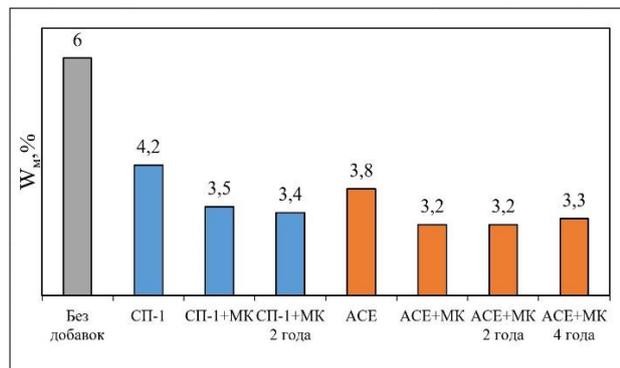


Рисунок 12 – Результаты испытания водопоглощения модифицированных бетонов в возрасте 28 суток, двух и четырех лет

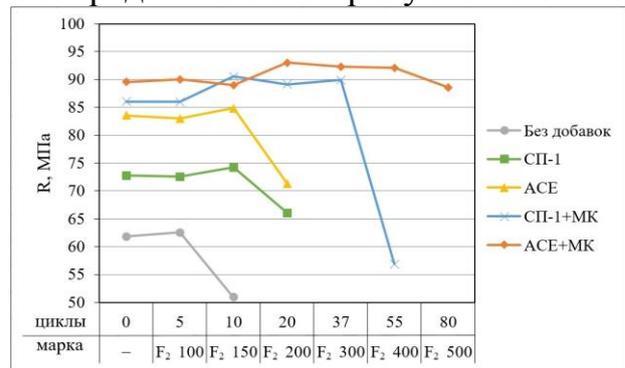


Рисунок 13 – Результаты испытания образцов модифицированных бетонов на морозостойкость

Величина водопоглощения бетонов, модифицированных добавками АСЕ+МК, в возрасте 28 суток уменьшается с 6 % до 3,2 %, а с СП-1+МК – до 3,5 %. Значения их водопоглощения практически не изменяются на протяжении длительного времени. Для устройства сборного дорожного покрытия по ГОСТ 21924.0-84 величина водопоглощения бетона должна быть менее 5 %.

Марку бетона по морозостойкости определяли по 3-ему ускоренному методу в соответствии с ГОСТ 10060-2012 (рисунок 13). Образцы бетона для испытаний на морозостойкость формовали из бетонной смеси с одинаковым значением В/Ц=0,31 и маркой по удобоукладываемости П1. Установлено, что бетоны, модифицированные добавкой АСЕ+МК, имеют наибольшую марку по морозостойкости – F₂500. Этот результат подтверждается данными, полученными при испытании образцов бетона на растяжение при раскалывании

после 80 циклов замораживания и оттаивания, которое сохраняется на уровне 5,4 МПа (рисунок 14). Причиной повышенной стойкости бетона с этими добавками является увеличение количества слабозакристаллизованных гидросиликатных фаз и снижение содержания свободного портландита в структуре цементного камня при постоянном В/Ц.

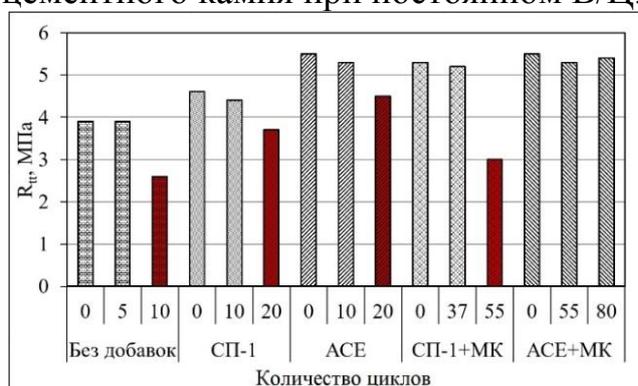


Рисунок 14 – Влияние циклических замораживаний образцов бетона с различными модификаторами на прочность при раскалывании

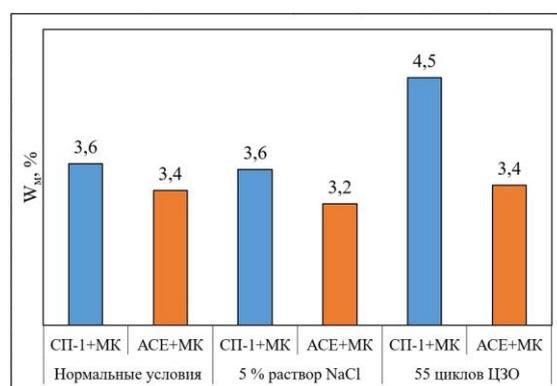


Рисунок 15 – Величина поглощения влаги бетонными образцами в одинаковом возрасте

Величина открытой пористости бетона (рисунок 15) контрольных образцов, которые выдерживались все время проведения испытания в 5 % растворе NaCl, практически не изменилась по сравнению с образцами, хранившимися в нормальных условиях. У основных образцов бетона с АСЕ+МК после 55 циклов замораживания и оттаивания не установлено изменений открытой пористости, в то время как для образцов с СП-1+МК произошло увеличение объема открытых пор на 25 %, что свидетельствует о структурных изменениях в цементном камне. Таким образом, введение добавок АСЕ и МК обеспечивает бетону повышенную прочность, марку по морозостойкости и неизменную открытую пористость.

При насыщении образцов бетона в 5 % растворе NaCl в течение 4 суток по стандартной методике масса образцов с добавками увеличилась на 0,42–0,84 %, а масса образцов без добавок на 1,26–1,68 %. При дополнительном выдерживании образцов бетона с СП-1+МК в солевом растворе в течение 30 суток прирост насыщения составил 43,6 %, а с АСЕ+МК – 26,7 % (рисунок 16).

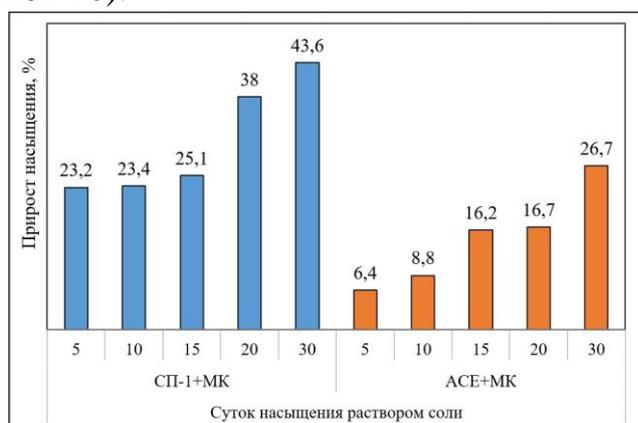


Рисунок 16 – Повышение массы контрольных образцов после длительной выдержки в растворе поваренной соли

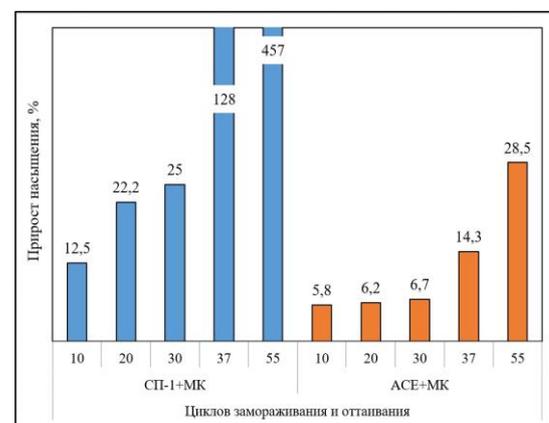


Рисунок 17 – Влияние циклического замораживания на величину насыщения модифицированных бетонов

Такое низкое насыщение образцов жидкой фазой является следствием формирования слабозакристаллизованных гидратных фаз с развитой гелевой пористостью, которая обеспечивает бетону диффузионную проницаемость.

Другой особенностью, выявленной при определении марки бетонов по морозостойкости, является увеличение массы основных образцов (по режиму два цикла замораживания и оттаивания в сутки) вследствие дополнительного их насыщения 5 % раствором NaCl (рисунок 17). Основные и контрольные образцы с СП-1+МК и АСЕ+МК насыщаются до 30 циклов практически одинаково, что свидетельствует о неизменности их структуры и свойств. После 37 циклов замораживания и оттаивания в образцах с СП-1+МК увеличивается поглощение 5 % раствора NaCl в пять раз, то есть возрастает открытая капиллярная пористость вследствие кристаллизации цементного геля. В образцах с АСЕ+МК не изменяется кинетика насыщения, что является признаком сохранения структуры гидратных фаз цементного камня при морозной агрессии.

Дополнительно, для полученных бетонов в процессе испытания на морозостойкость было отмечено явление самовысушивания (рисунок 18).



Рисунок 18 – Зоны самовысушивания бетона после 37 циклов замораживания

Высокая плотность и низкая величина насыщения образцов бетона 5 % раствором NaCl совместно с самовысушиванием позволяет предполагать, что механизм их разрушения при циклическом замораживании и оттаивании связан как с возникновением температурных перепадов, так и с несогласованностью коэффициентов термического расширения, а не с льдообразованием.

По данным РФА, ДТА и электронной микроскопии, с рентгеновским микроанализатором, в цементном камне бетона с АСЕ+МК в процессе циклических замораживаний и оттаиваний слабозакристаллизованная структура практически не изменяется, сохраняется С–S–Н(I) фаза с $C/S=1,1-1,3$ (рисунок 19). В структуре цементного камня бетона с СП-1+МК после 37 циклов наблюдаются признаки перекристаллизации, так количество свободного $Ca(OH)_2$ увеличивается на 0,5 %, а после 55 циклов более чем на 1 %, при этом основность гидросиликатов повышается до $C/S=1,7-2,1$ (рисунок 20).

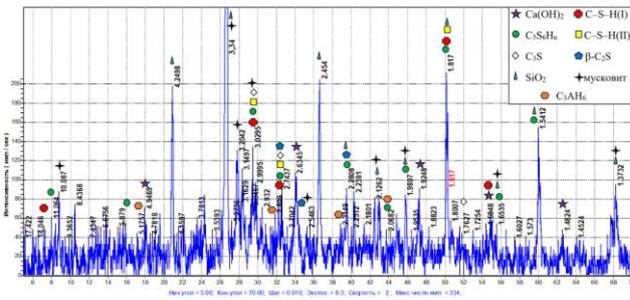


Рисунок 19 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня из бетона с АСЕ и МК после 55 циклов замораживания и оттаивания

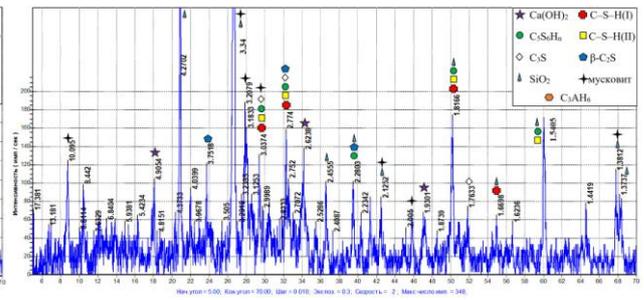


Рисунок 20 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня из бетона с СП-1 и МК после 55 циклов замораживания и оттаивания

На рентгенограммах цементного камня с СП-1+МК в процессе циклических воздействий отмечается увеличение интенсивности пиков гидратных фаз C–S–H(I) с $d/n=1,25; 0,307; 0,28; 0,183; 0,167$ нм. Таким образом, процесс разрушения бетона при циклическом замораживании и оттаивании начинается с перекристаллизации гидратных фаз цементного камня.

Для моделирования эксплуатационных воздействий на тяжелые бетоны, применяемые в транспортной, промышленной и энергетической инфраструктуре, были проведены циклические механические испытания на образцах призмах, при уровне напряжений 0,8 и 0,9 от $R_{пр}$ (рисунок 21).

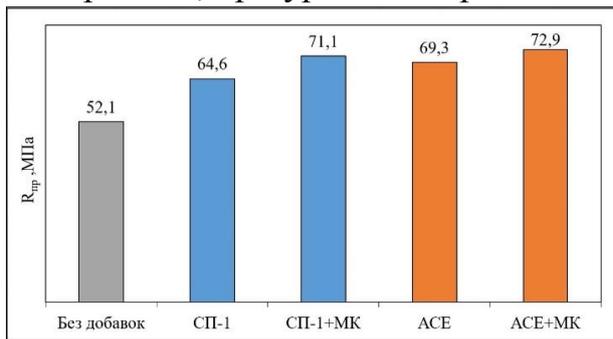


Рисунок 21 – Прочность образцов-призм на сжатие в 28 суток нормального твердения

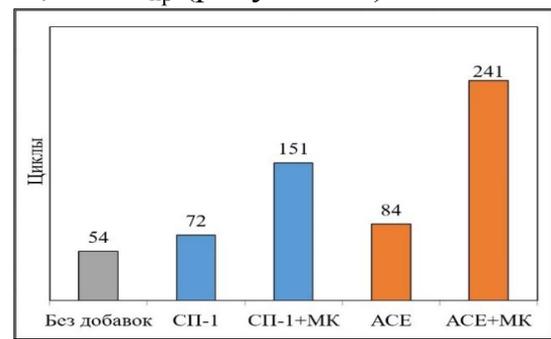


Рисунок 22 – Число циклических нагружений до 0,9 $R_{пр}$, вызывающих разрушение образцов-призм

Скорость нагружения – 1 цикл за ~50 секунд, принята для выявления изменения структуры гидратных фаз цементного камня в бетоне. Бетон, модифицированный добавками АСЕ и МК, выдерживает до разрушения на 37 % большее количество циклов нагружения, чем бетон с СП-1 и МК (рисунок 22), вследствие направленного формирования слабокристаллизованной структуры с $C/S < 1,5$ и низким содержанием портландита.

Циклическое механическое нагружение, как и замораживание, способствует перекристаллизации начальной структуры гидратных фаз цементного камня в бетоне. В поровом пространстве образцов, модифицированных АСЕ+МК, после 1000 циклов механических нагружений при 0,8 $R_{пр}$, наблюдается выделение субмикрочастиц портландита при сохранении первоначальной прочности и отсутствии признаков разрушения (рисунок 23). Аналогичные процессы наблюдаются при воздействии 0,9 $R_{пр}$ до начала разрушения образцов бетона с добавками СП-1 и СП-1+МК (рисунок 24). В бетонах с добавками АСЕ и АСЕ+МК эти явления менее выражены (рисунок 25).

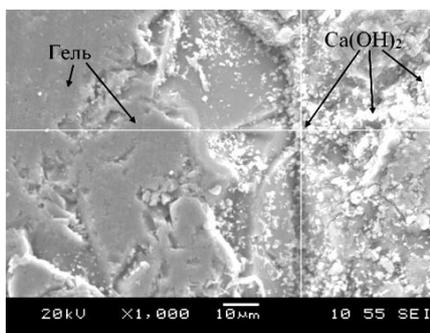


Рисунок 23 – Электронный снимок цементного камня бетона с АСЕ+МК после 1000 циклов нагружения до 0,8 R_{пр}

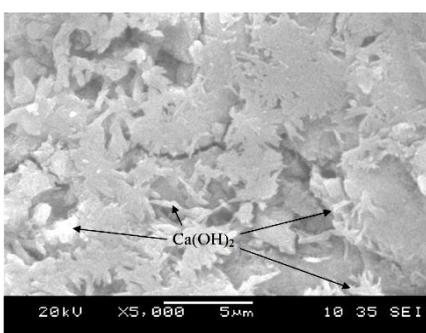


Рисунок 24 – Электронный снимок цементного камня бетона с СП-1+МК после 151 цикла нагружения до 0,9 R_{пр}

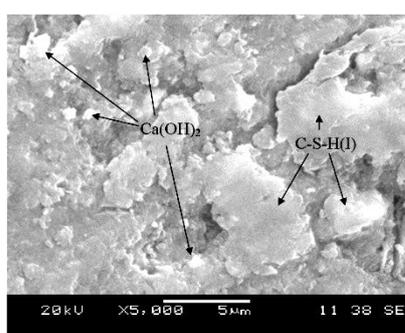


Рисунок 25 – Электронный снимок цементного камня бетона с АСЕ+МК после 241 цикла нагружения до 0,9 R_{пр}

Возможно, циклическое нагружение вызывает выдавливание части адсорбционной влаги в контракционные поры с формированием в последующем микрокристаллов Ca(OH)₂.

В пятой главе (*Технология и эффективность изделий из морозостойких бетонов*) предложены технологические схемы изготовления сборных и монолитных дорожных покрытий, а также рассчитан экономический эффект изготовления и применения разработанного бетона.

Для обеспечения требуемой отпускной прочности 0,7 и 0,9 R_{норм} в соответствии с ГОСТ 56600-2015 подобраны энергоэффективные режимы тепло-влажностной обработки бетонов с 10 % МК и 0,9–1 % АСЕ (таблица 4).

Таблица 4 – Оптимальные режимы для достижения требуемой отпускной прочности

Максимальная температура, °С	Дозировка АСЕ, %	Режим ТВО, ч	Требуемая отпускная прочность, %	Прочность в % от нормируемой
50	0,9	3+4+6+4	70	73,7
60	1	3+3+5+4	90	95,2

Технология предусматривает тщательный контроль над выполняемыми операциями и применение исходных материалов стабильного качества, что в совокупности гарантирует достижение требуемых характеристик бетона.

Было проведено сравнение стоимости материалов для бетонов класса по прочности В60 и марки по морозостойкости F₂₅₀₀. Получен экономический эффект 785 рублей на 1 м³ бетона по сравнению с аналогом – тяжелым бетоном модифицированным добавкой МК+СП-1.

Научные результаты и практические рекомендации по разработанным составам и технологии бетонов подтвердились опытно-промышленными испытаниями. Совместно с фирмами ООО «Инновационные технологии в строительстве» и ООО «Опытный завод «УралНИИСтром» проведены опытно-промышленные изготовления и внедрения сборных железобетонных дорожных плит при строительстве дорожного полотна. По решению рабочей группы Министерства Транспорта Российской Федерации, под руководством заместителя министра, железобетонные плиты включены в Перечень иннова-

ционной продукции гражданского назначения и рекомендованы к государственным закупкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Направленное формирование слабозакристаллизованной структуры гидросиликатов кальция цементного камня при введении добавок MasterGlenium ACE 430 и микрокремнезема позволяет получать тяжелый бетон с эксплуатационными характеристиками не менее прочности на сжатие в суточном возрасте 38,2 МПа, в 28 суток 90 МПа, при изгибе 8 МПа, при расколе 5,5 МПа, с маркой по морозостойкости F₂₅₀₀, водонепроницаемости W16 и с водопоглощением по массе W_м не более 3,2 %.

2. Модификация цементного камня добавками ACE и МК способствует образованию структуры, представленной в основном слабозакристаллизованной C–S–H(I) фазой с C/S=1,1–1,3, и снижению количества свободного Ca(OH)₂ с 9 % до 5 %.

3. При сохранении постоянного В/Ц=0,31 и подвижности П1 введение в бетонную смесь водоредуцирующих добавок не обеспечивает марку по морозостойкости тяжелого бетона свыше F₂₁₅₀, при совместном введении СП-1 и МК – F₂₃₀₀, в то время как с добавками ACE и МК бетон не разрушается и сохраняет первоначальную структуру даже после 80 циклов замораживания и оттаивания, соответствующих марке F₂₅₀₀.

4. При циклическом замораживании и оттаивании разрушение тяжелого бетона с добавками СП-1 и микрокремнеземом вызывается перекристаллизацией гидросиликатных фаз в цементном камне.

5. Установленные особенности насыщения тяжелых бетонов в процессе испытания морозостойкости по 3-ему ускоренному стандартному методу могут использоваться при разработке способа оценки морозостойкости, а одинаковая кинетика насыщения контрольных и основных образцов характеризует стабильность гидратных фаз цементного камня при циклических воздействиях.

6. При циклических механических нагружениях и высоком уровне напряжений, не менее 0,8 от R_{пр}, наибольшей стойкостью обладают тяжелые бетоны с добавками ACE и МК, в которых структура цементного камня формируется из слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция пластинчатого строения и сохраняется при циклических воздействиях.

7. Микроструктура цементного камня тяжелого бетона после циклических механических нагружений, при уровне напряжений не менее 0,8 R_{пр}, характеризуется выделением микрокристаллов Ca(OH)₂, что вызвано её перекристаллизацией, но для бетонов, модифицированных ACE и МК, этот процесс начинается после количества циклов на 37 % большего, чем с СП-1 и МК.

8. Внедрение разработанной технологии цементобетонного покрытия автомобильных дорог в строительную практику доказало её экономическую эффективность и перспективность применения.

Рекомендации. Железобетонные плиты, соответствующие СТО 68632639-001-2013 «Система плит сборного дорожного покрытия. Технические условия», разработанные с учетом изложенных в диссертации принципов направленного формирования структуры гидратных фаз цементного камня, включены в Перечень инновационной продукции гражданского назначения Российской Федерации и рекомендованы к государственным закупкам. Строительство опытного участка дороги в Челябинской области совместно с ООО «Опытный завод «УралНИИСтром», экспериментально подтвердило заявляемые характеристики бетона. Модифицированные бетоны рекомендованы к внедрению при строительстве зданий и сооружений в суровых климатических условиях Арктики, Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока.

Теоретические положения диссертационной работы и полученные экспериментальные результаты рекомендуются для внедрения в учебный процесс по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и 08.06.01 «Техника и технология строительства».

Перспективы дальнейшей разработки темы. В дальнейшем предполагается провести исследование влияния видов цемента на морозостойкость тяжелого бетона и выявить связь между маркой по морозостойкости бетона, стойкостью при циклическом нагружении и его долговечностью. Также планируется доработать методику ускоренного определения марки бетона по морозостойкости в зависимости от кинетики растворонасыщения.

Основные положения и результаты диссертации изложены в публикациях:

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России:

1. **Шулдяков, К.В.** Влияние добавки «микрокремнезем – поликарбонатный суперпластификатор» на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня / К.В. Шульдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Н.А. Мамаев // Цемент и его применение. – 2013. – №2. – С.114–118 (ИФ РИНЦ – 0,108; 0,3125 печ.л. / 0,14 печ.л.).

2. Крамар, Л.Я. Современные суперпластификаторы для бетонов, особенности их применения и эффективность / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Т.Н. Черных, А.А. Орлов, **К.В. Шульдяков** // Строительные материалы. – 2016. – №11. – С.21–25 (ИФ РИНЦ – 0,768; 0,3125 печ.л. / 0,16 печ.л.).

3. Крамар, Л.Я. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог / Л.Я. Крамар, А.И. Кудряков, Б.Я. Трофимов, **К.В. Шульдяков** // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – №4 (63). – С.147–157 (ИФ РИНЦ – 0,409; 0,75 печ.л. / 0,3 печ.л.).

4. **Шулдяков, К.В.** Структурный фактор долговечности бетона / К.В. Шульдяков, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 46–51 (ИФ РИНЦ – 0,225; 0,375 печ. л. / 0,25 печ.л.).

5. **Шулдяков, К.В.** Структура и свойства цементного камня с модификаторами / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, А.М. Махмудов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 54–64 (ИФ РИНЦ – 0,225; 0,6875 печ. л. / 0,37 печ.л.).

6. **Шулдяков, К.В.** Высокоморозостойкий бетон без воздухововлечения / К.В. Шулдяков, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Строительные материалы. – 2020. – №6 (781). – С. 18–26 (ИФ РИНЦ – 0,768; 0,5625 печ.л. / 0,34 печ.л.).

В изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

7. **Shuldyakov, K. V.** Superplasticizer Effect on Cement Paste Structure and Concrete Freeze-Thaw Resistance / K.V. Shuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov, I.M. Ivanov // Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015). – AIP Conference Proceedings, 2016. – 1698. – pp. 070011-1-070011-6.

8. **Schuldyakov, K.V.** Interconnection between Concrete Structure and Properties and Various Modifications / K.V. Schuldyakov, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017). – Procedia Engineering, 2017. – vol. 206. – pp. 863–868.

9. Trofimov, B.Ya. On Deterioration Mechanism of Concrete Exposed to Freeze-Thaw Cycles / B.Ya. Trofimov, L.Ya. Kramar, **K.V. Schuldyakov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – vol. 262. – conference 1. – 012019.

10. **Shuldyakov, K.V.** Hardened cement paste microstructure as the main factor of concrete durability / K.V. Shuldyakov, A.A. Kirsanova, L.Ya. Kramar, B.Ya. Trofimov // IV International Young Researchers Conference «Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects» (YSSIP-2017). – MATEC Web Conferences, 2018. – vol. 143. – 02011.

11. Kramar, L.Ya. Introducing pozzolanic admixture to improve frost resistance of pavement concrete / L.Ya. Kramar, A.I. Kudyakov, **K.V. Shuldyakov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – vol.451. – conference 1. – 012009. – pp. 1–5.

12. **Shuldyakov, K.V.** Cement stone modified with complex of polycarboxylate superplasticizer and silica fume / K.V. Shuldyakov, B.Ya. Trofimov, L.Ya. Kramar // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. – vol.451. – conference 1. – 012010.

13. Shuldyakov, K. Stable microstructure of hardened cement paste – A guarantee of the durability of concrete / K. Shuldyakov, B. Trofimov, L. Kramar // Case Studies in Construction Materials. – 2020. – vol. 12. – e00351

Статьи в других печатных изданиях

14. **Шулдяков К.В.** Способы модифицирования цементного камня дорожных бетонов / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар // Перспективы развития строительного материаловедения: сборник статей международной научно-технической конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 24 сентября 2013 г. – С. 22–24.

15. **Шулдяков, К.В.** Исследование влияния тепло-влажностной обработки на свойства высокопрочного дорожного бетона с добавкой поликарбоксилатного пластификатора / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар // Наука. Южно-Уральский государственный университет, материалы 65-ой Научной конференции. – 23–25 апреля 2013 г. – С. 138–141.

16. Трофимов, Б.Я. Технология высокофункциональных дорожных бетонов / Б.Я. Трофимов, **К.В. Шулдяков** // Бетон и железобетон – взгляд в будущее. Научные труды III Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону. – Изд-во: М., МГСУ, 12–16 мая 2014. – т.5. – С. 124–138.

17. **Шулдяков, К.В.** Морозостойкость дорожного бетона / К.В. Шулдяков, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // *Фундаментальные и прикладные науки – основа современной инновационной системы: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.* – Омск, 01–13 февраля 2015 г. – С. 209–216.

18. Крамар, Л.Я. Структурообразование гидратных фаз цемента при циклическом замораживании / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, **К.В. Шулдяков** // *Строительство и экология: теория, практика, инновации: сборник докладов I Международной научно-практической конференции.* – Челябинск: Издательство «Пирс», 09–10 марта 2015 г. – С. 168–175.

19. **Шулдяков, К.В.** Особенности влияния пластификатора на структуру цементного камня и свойства бетона / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, И.М. Иванов // *Перспективные материалы в технике и строительстве: ПМТС 2015. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием.* – Томск, 06–09 октября 2015 г. – С.423-426.

20. **Шулдяков, К.В.** Возможность регулирования морозостойкости бетона с помощью пластификаторов / К.В. Шулдяков, И.М. Иванов, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // *Проблемы строительного комплекса России. Материалы XX Международной научно-технической конференции.* – Уфа, 23–25 марта 2016 г. – С.3–6.

21. Трофимов, Б.Я. Бетон для современных автомагистралей / Б.Я. Трофимов, **К.В. Шулдяков** // *Материалы 68-ой научной конференции «Наука ЮУрГУ».* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – С.199–206.

22. **Шулдяков, К.В.** Влияние добавок поликарбоксилатов на структуру и свойства цементного камня в бетоне / К.В. Шулдяков, Л.Я. Крамар // *Материалы VIII научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2016. – С.52–57.

Шулдяков Кирилл Владимирович

ТЯЖЕЛЫЕ БЕТОНЫ, СТОЙКИЕ К ЦИКЛИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 13.01.2021

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать лазерная. Тираж 100 экз. Заказ № 32.

Отпечатано в типографии «Активист».

Адрес: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 74Б.
