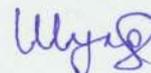


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Шулдяков Кирилл Владимирович

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

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Крамар Людмила Яковлевна

ЧЕЛЯБИНСК 2020

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1 Бетоны для суровых условий эксплуатации. Состояние вопроса.....	14
1.1 Суровые условия эксплуатации бетонов	15
1.2 Нормируемые требования к бетонам	18
1.3 Способы повышения стойкости бетона.....	20
1.3.1 Формирование структуры гидратных фаз.....	22
1.3.2 Пластифицирующие добавки и их роль в формировании структуры цементного камня в бетоне	27
1.3.3 Модифицирующее воздействие пуццолановых добавок на свойства бетона	29
1.3.4 Совместное применение суперпластификаторов и активных минеральных добавок	32
1.4 Факторы, влияющие на долговечность железобетонных конструкций	33
1.4.1 Влияние на морозостойкость бетона структуры гидратных фаз цементного камня.....	34
1.4.2 Структурные изменения цементного камня бетона при циклических механических нагружениях.....	37
Выводы по главе 1	39
Глава 2 Используемые материалы и методы исследования	41
2.1 Методология исследования.....	41
2.2 Характеристика сырьевых компонентов	42
2.3 Методы испытаний и исследований.....	48
2.4 Организация экспериментов	54
2.5 Подбор состава тяжелого бетона.....	54
Выводы по главе 2.....	55
Глава 3 Структура и свойства цементного камня с добавками модификаторами .	57

3.1 Цементный камень с добавками микрокремнезема и поликарбоксилата.....	57
3.2 Структура цементного камня с добавками СП-1 и МК	70
3.3 Влияние модификаторов на экзотермию гидратации цемента	73
3.4 Стойкость модифицированного цементного камня к циклическим воздействиям.....	75
Выводы по главе 3.....	86
Глава 4 Модифицированные бетоны и их свойства	88
4.1 Подбор и корректировка состава бетона	88
4.2 Прочностные характеристики бетона	90
4.3 Стойкость бетонов с модифицирующими добавками к циклическому замораживанию и оттаиванию.....	96
4.4 Исследование микроструктуры продуктов гидратации после циклического замораживания и оттаивания	104
4.5 Влияние механических циклических нагрузжений на стойкость бетона.....	110
Выводы по главе 4.....	113
Глава 5 Технология и эффективность изделий из морозостойких бетонов.....	116
5.1 Ускорение твердения бетона.....	116
5.2 Монолитные дорожные покрытия.....	120
5.3 Сборные дорожные покрытия.....	124
5.4 Техничко-экономическая эффективность	126
5.5 Опытно-промышленное внедрение	129
Выводы по главе 5.....	132
Заключение	133
Список сокращений	136
Список литературы	137

Приложение А. Статистический анализ результатов испытаний бетона	166
Приложение Б. Результаты внедрения.....	174

Введение

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

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

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».

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 строительной-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 пуццолой 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 призменной 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 F_{2300} до F_{2500} 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 призмочной прочности, снижается 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 техносферная 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 систем 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.

Глава 1 Бетоны для суровых условий эксплуатации. Состояние вопроса

В зависимости от температурно-влажностных условий эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, по ГОСТ 31384-2017, нормируется марка по морозостойкости, которая при температуре ниже минус 40 °С и насыщении минерализованной водой должна быть не ниже F₂450 [235, 260]. При более высоких температурах эксплуатации и различной степени минерализации влаги, насыщающей бетон, марка по морозостойкости должна быть в пределах от F₂100 до F₂300. Таким образом, основным критерием долговечности бетона в любых условиях эксплуатации является морозостойкость бетона. Основными параметрами регулирования морозостойкости в национальных стандартах приняты расход цемента, В/Ц, класс бетона по прочности при сжатии и воздухововлечение, то есть, в основном, косвенные характеристики пористости и плотности бетона [112, 130, 160]. Для суровых условий эксплуатации железобетонных конструкций и сооружений требуются бетоны высокой морозостойкости, которые, по нашим данным, обеспечиваются только с учетом особенностей формирующейся структуры гидратных фаз [135, 136, 137]. Бетоны железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера, по климатическим критериям должны иметь высокую морозостойкость [101, 250, 270]. Помимо циклического замораживания в этих условиях возможны и другие воздействия на бетон железобетонных конструкций – механические, химические и температурно-влажностные [270]. Наиболее часто такие воздействия отмечаются для бетона объектов дорожной инфраструктуры, где, из-за постоянно увеличивающихся нагрузок, традиционные материалы быстро выходят из строя [42, 116, 140, 143, 146]. Существенно продлить период безремонтной эксплуатации таких объектов возможно за счет применения цементобетонных покрытий [1, 42, 87, 95, 105, 144, 146, 169].

В настоящее время бетон и железобетон являются основными конструкционными материалами во всем мире – их мировое потребление превышает 8 млрд. кубометров. По экспертным оценкам, альтернативы этим материалам в ближайшем будущем не предвидится [6, 9, 33, 54, 147, 156, 179, 182, 185, 186, 193, 195, 271].

1.1 Суровые условия эксплуатации бетонов

Северная строительно-климатическая зона Российской Федерации по температурным характеристикам наиболее холодных суток и наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,98 и 0,92, а также сумме средних суточных температур за отопительный период, территориально разделена на районы с суровым, наименее суровым и наиболее суровым климатом [267]. Для таких агрессивных условий окружающей среды стойкость и надежность строительного материала, в частности бетона железобетонных конструкций, определяется сроком эксплуатации, в течение которого его фактические свойства не менее проектных [2, 30, 39, 41, 42, 43, 47, 57, 87, 95, 117, 148, 169, 183, 196, 208, 273]. В национальных стандартах гарантируется срок эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций 50 лет в случае их соответствия требованиям ГОСТ 31384-2017 и СП 28.13330.2017 [235, 260]. В любой климатической зоне состав бетона ограничивается в зависимости от сред эксплуатации, например, для инфраструктурных сооружений в северных регионах характерны следующие среды эксплуатации:

- XD3 – хлоридное воздействие;
- XF4 – циклическое замораживание и оттаивание;
- XS3 – воздействие морской воды;
- WS – механические нагрузки и щелочная коррозия.

Кроме этих воздействий, на бетон зданий и сооружений действуют физические и физико-химические факторы (циклическое нагревание и охлаждение, ультрафиолетовые лучи и другие), а также химические воздействия (вещества антиобледенители, выхлопы автомобильных газов) и силовые нагрузки от транспортных средств, см. рисунок 1 [131, 151, 169].



Рисунок 1 – Агрессивные внешние воздействия на бетон в суровых условиях эксплуатации

Наибольшее деструктивное воздействие на бетон и железобетон оказывает низкотемпературное замораживание и его насыщение минерализованной водой, особенно раствором поваренной соли, который часто используется как антиобледенитель, вызывающий термоудар при таянии льда [7, 157, 187, 192, 208]. Различают также особенности эксплуатации бетона железобетонных конструкций, находящихся под водой или в зоне переменного уровня воды и обрызгивания [3, 262].

Отмечаются также следующие нормируемые факторы стойкости бетона: водопоглощение, предел прочности при сжатии и изгибе и другие [82, 85, 90, 129]. Особое внимание уделяется этим характеристикам для бетонов транспортного строительства [38, 73, 112, 139, 144, 188, 252, 272]. Так, согласно стратегии модернизации строительной индустрии Российской Федерации, планируется ежегодно увеличивать объём строительства новых дорог с

использованием цементобетонного покрытия, а к 2030 году этот показатель должен составить 50 % [271]. В связи с этими планами на конференции «Цементобетонные покрытия автомобильных дорог России: тенденции и точки роста» 21 ноября 2017 года было объявлено о создании Ассоциации бетонных дорог.

Из зарубежного опыта можно сделать выводы о перспективности использования бетона в дорожных покрытиях и других сооружениях, в том числе в суровых условиях эксплуатации [42, 95, 138]. Для дорожных покрытий из цементобетона характерны следующие преимущества:

- повышение срока службы до 50 лет [87, 119, 255];
- незначительное удорожание стоимости строительства одного километра дороги, по сравнению с асфальтобетоном, компенсируется увеличением сроков безремонтной эксплуатации (по данным Европейской ассоциации дорожных бетонных покрытий экономия составляет 25 %) [47, 140];
- снижение стоимости ремонта с 2276 руб./м² для асфальтобетонного покрытия, до 1973 руб./м² для цементобетонного [110];
- улучшение износостойкости дорожного покрытия и коэффициента сцепления колес с ним [144];
- применение цементобетонных покрытий практически полностью исключает образование колеи и их деформативность в меньшей степени зависит от температуры и влажности окружающей среды [95, 143, 144].

Для повышения эксплуатационных свойств объектов транспортного строительства рекомендуются бетоны с прочностью при сжатии В60 и особое внимание уделяется повышению прочности при изгибе (R_{tb}) – так увеличение этой характеристики с 4...5 МПа до 6...6,5 МПа повышает срок службы с 20 до 50 лет [6, 9, 38, 42, 47, 53, 62, 75, 100, 107, 138, 145, 147, 148, 183, 200]. Для повышения R_{tb} рекомендуются различные схемы армирования, в том числе дисперсной арматурой [69, 70, 74, 93, 170, 172, 198]. Значительное влияние на прочностные свойства бетона оказывает микроструктура гидратных фаз цемента – цементный гель является наиболее плотным и прочным компонентом цементного

камня и бетона [34, 72, 102, 103, 108, 109, 112, 118]. Из литературных источников известно, что увеличение содержания гелевидной фазы в цементном камне повышает водонепроницаемость бетона [122].

В национальных стандартах не предусмотрена оценка структурных особенностей цементного камня, а, в основном, стойкость бетона связывается с характеристиками его пористости и плотности. Такой подход не гарантирует безотказной работы бетонных и железобетонных конструкций и сооружений в суровых условиях эксплуатации, поэтому необходимо провести специальные исследования [82, 147, 160].

Термодинамическая нестабильность цементного геля особенно проявляется при циклических воздействиях и приводит к увеличению степени закристаллизованности цементного камня, что повышает его уровень дефектности, концентрацию напряжений и снижает прочность и стойкость бетона [23, 65]. Скорость структурных превращений гидратных фаз является одним из основных параметров стойкости и долговечности бетонов железобетонных конструкций. Установление особенностей сохраняемости структуры цементного камня бетона при внешних циклических воздействиях является актуальной проблемой бетоноведения [112, 130].

1.2 Нормируемые требования к бетонам

В зависимости от среды эксплуатации при наибольшей её агрессивности, нормируемыми показателями состава бетона является величина $V/C \leq 0,45$, класс по прочности при сжатии не менее В35 или В45, расход цемента не менее 320 или 340 кг/м³ [235, 260]. Для бетонов, подвергающихся циклическому замораживанию и оттаиванию, обязательно применение воздухововлекающих добавок, обеспечивающих объём воздушных пор не менее 4 % [229]. В суровых и

наиболее суровых климатических условиях марка бетона по морозостойкости должна быть не менее F_2450 [267].

При одновременном действии агрессивных сред различных классов требования к бетону и железобетону назначают с учетом всех воздействий [235]. Помимо этого, национальный стандарт предусматривает увеличение степени агрессивности окружающей среды на одну ступень, при наличии истирающих воздействий, как, например, на бетоны транспортной инфраструктуры [235, 260].

Тяжелые и мелкозернистые бетоны монолитных дорожных покрытий по ГОСТ 25192-2012 и ГОСТ 26633-2015 применяются с показателями класса по прочности при сжатии не ниже В30 и класса по прочности при изгибе B_{fb} 4, а для дорожных плит В25 и B_{fb} 3,6 [227, 229, 261]. Для сборных и монолитных покрытий марка по морозостойкости в наиболее суровых климатических условиях эксплуатации должна быть не менее F_2200 [252, 261].

Дорожные бетонные плиты должны изготавливаться в соответствии с требованиями ГОСТ 21924.0-84 из тяжелого бетона со средней плотностью от 2200 до 2500 кг/м³ [221]. Для плит дорожных покрытий с предварительным напряжением арматуры и без него регламентируется класс по прочности при сжатии не менее В22,5, а марка по морозостойкости для наиболее суровых условий эксплуатации не менее F_2200 [222, 223].

По ГОСТ 33320-2015 железобетонные шпалы изготавливаются из тяжелого бетона с повышенной прочностью – класс не ниже В40 и величина $B/C \leq 0,35$, а марка по морозостойкости нормируется не ниже F_1200 , поскольку при эксплуатации шпал не применяют антиобледенители, как для дорожных покрытий [239]. В 2017 году реализовано строительство высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань. В качестве конструкционного материала использовался тяжелый бетон класса по прочности при сжатии не менее В40, марка по водонепроницаемости, обеспечивающая плотность защитного слоя бетона по отношению к стальной арматуре, не ниже W8, а марка по морозостойкости F_2300 , при этом диапазон эксплуатационных температур (от минус 48 до плюс 67 °С) входит в зону суровых климатических условий [268].

Плиты аэродромных покрытий толщиной 14, 18 и 20 сантиметров изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 25912-2015 из тяжелого бетона класса по прочности на сжатие не ниже В30, на растяжение при изгибе не ниже $B_{тб}4,0$ и маркой по морозостойкости не ниже F₂200, в том числе и для Дальнего Востока и Сибири [228]. Для монолитных покрытий, в соответствии с СП 121.13330.2019, применяется также тяжелый бетон с аналогичными требованиями по прочности для верхнего слоя, а марка бетона по морозостойкости варьируется в зависимости от района строительства в пределах от F₂50 до F₂200 [265].

Следовательно, марки по морозостойкости и классы по прочности тяжелого бетона регламентируются как стандартами, так и сводами правил на конкретные виды изделий, причем, как правило, наиболее жесткие требования предъявляются в нормативных документах по защите бетона и железобетона от коррозии в зависимости от температурно-влажностных условий эксплуатации. Таким образом, для дальнейших исследований будем принимать наиболее жесткие требования по ГОСТ 31384-2017 и СП 28.13330.2017, а именно: класс по прочности на сжатие не менее В45, марка по морозостойкости не менее F₂450 и величина водоцементного отношения менее 0,35 [235, 260].

1.3 Способы повышения стойкости бетона

Тяжелые бетоны для конструкций, эксплуатируемых в условиях Сибири и Дальнего Востока, должны отвечать специальным требованиям, обеспечивающим их длительную стойкость при действии минерализованной воды и низких отрицательных температур. Основные технологические приемы, обеспечивающие высокую стойкость тяжелого бетона, включают в себя следующие технические мероприятия [6, 22, 38, 40, 43, 44, 47, 50, 54, 57, 72, 78, 121, 133, 147, 149, 169]:

– сырьевые материалы должны не вызывать самопроизвольную деструкцию бетона, быть стойкими к механическим и климатическим воздействиям, а также не содержать загрязняющих примесей и иметь постоянную гранулометрию;

– проектирование состава бетона осуществляется с учетом ограничений по средам эксплуатации и обеспечением стойкости в суровых климатических условиях;

– соблюдение технических параметров всех технологических операций, особый контроль качества формования и уплотнения бетонной смеси, а также надлежащий уход, исключающий удаление воды после формования изделий или конструкций.

Отдельно нужно отметить влияние качества заполнителей на свойства бетонной смеси и бетона [6, 33, 66, 79, 147]. Загрязняющие тонкодисперсные примеси увеличивают пористость и водопотребность бетонной смеси, в том числе за счет снижения эффективности пластифицирующей добавки, кроме того, могут быть причиной повышенной усадки и ползучести бетона, что отрицательно влияет на его стойкость [112, 167, 168]. Необходимо оценивать морозостойкость заполнителей и обращать внимание на количество слюдистых включений [76].

Для бетонов с требованиями по морозостойкости рекомендуются цементы ЦЕМ I и ЦЕМ I СС, а также допускается применение ЦЕМ II/A-МК, тогда как остальные разновидности цемента могут быть допущены только после проведения специальных исследований [235, 260]. Применение добавок, а также любые изменения технологии, допускаются только в том случае, если эти мероприятия не ухудшают морозостойкость и защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре.

При неизменной технологии и материалах существенное влияние на морозостойкость бетона оказывают режимы тепловой обработки и последующий уход за бетоном, как правило, бетоны, прошедшие тепловлажностную обработку, характеризуются пониженной морозостойкостью [6, 38, 43, 87, 112].

1.3.1 Формирование структуры гидратных фаз

Взаимодействие цемента с водой приводит к протеканию гидролиза и гидратации цемента, с образованием гидратных соединений, что предопределяет свойства цементного камня. Наибольший вклад в изучение этих процессов внесли следующие ученые: Ю.М. Баженов, М.И. Бруссер, Ю.М. Бутт, А.Ю. Волженский, Г.И. Горчаков, Г. Добролюбов, Ф.М. Иванов, П.Г. Комохов, Т.В. Кузнецова, А.А. Пащенко, Ю.В. Пухаренко, В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг, М.М. Сычѳв, В.В. Тимашев, Ю.В. Чеховской, А.Е. Шейкин и др. Среди зарубежных ученых широко известны С. Брунауэр, Т.К. Пауэрс, В.С. Рамачандран, Х. Тейлор, Р.Ф. Фельдман и др. [6, 16, 22, 33, 34, 35, 43, 60, 61, 71, 72, 89, 96, 97, 108, 106, 127, 130, 177, 178, 181].

В результате гидратационных процессов формируется структура цементного камня, которую можно представить в виде продуктов гидратации, негидратированных частиц и пор разных размеров и генезиса [24, 130]. По мнению В.Н. Юнга, такую систему можно сравнить с бетоном и назвать «микробетоном» [141].

В результате большого количества теоретических и экспериментальных исследований была сформирована обобщенная концепция гидратации основных силикатных минералов портландцемента. Так, процесс взаимодействия C_3S с водой условно разделили на пять этапов [16, 89, 177].

Отсчет первого этапа начинается от затворения C_3S водой и длится до 20 минут, в течение которых начинается адсорбция полярных молекул воды и происходит частичная гидратация атомов поверхности зерна вяжущего. Эти процессы характеризуются экзотермией – в результате разложения на ионы и адсорбции молекул воды. В результате адсорбции ионов водорода на поверхности вяжущего формируются положительно заряженные участки, из которых впоследствии выделяются ионы кальция. Одновременно с этим процессом происходит формирование гидросиликатных групп $H_nSiO_4^{n+4}$, которое вызывает

формирование мембран из гидросиликатов кальция на поверхности цементного зерна без увеличения их объёма [63]. Теоретически этот процесс был обоснован академиком А.А. Байковым, а его экспериментальное подтверждение получил Ю.С. Малинин [81].

На втором этапе гидратационные процессы продолжают без выделения тепла на время от двух до шести часов – этот промежуток называется «индукционным периодом». Окончание индукционного периода связано с противодиффузией и накоплением ионов кальция в жидкой фазе. В результате этих процессов образуются зародыши портландита и низкоосновной C–S–H фазы [6, 109].

Третий этап сопровождается формированием гидросиликатов кальция и ростом щелочности среды до pH 12,5. Это вызывает изменение первоначальной гидросиликатной фазы вследствие сорбции Ca^{2+} активным гидроксильным слоем SiO_2 и образованием гелеобразной C–S–H(I) фазы.

На четвертом и пятом этапах происходит частичное укрупнение гелевидной фазы, сопровождающееся формированием внутреннего и внешнего слоев гидросиликатов кальция. Происходит также изменение pH среды и концентрации катионов кальция, что влияет на отношение CaO к SiO_2 в гидратных фазах и увеличивается содержание кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Таким образом, на последних этапах устанавливается структура гидратных фаз цементного камня, которые взаимодействуют между собой через тонкие слои адсорбционно связанной воды. Кристаллические фазы (портландит, эттрингит, гидроалюминаты и другие) образуют «войлочную» структуру, характеризующуюся повышенной концентрацией напряжений и низкой прочностью.

Особенности структуры гидратных новообразований обычно связывают:

- 1) с содержанием химических элементов и минералов;
- 2) с наличием коагуляционных и кристаллизационных контактов;
- 3) с гелевой, микро- и макрокапиллярной пористостью, а также контракционной.

Установлены следующие основные структурные компоненты цементного камня [130]:

- кристаллические продукты гидратации, представленные портландитом, гидросульфоалюминатом и другими алюминатными и алюмоферритными фазами;
- слабозакристаллизованный низкоосновный гидросиликат кальция;
- реликтовые клинкерные остатки и тонкодисперсные примеси.

Структурные составляющие и их соотношение влияет на механические и деформативные свойства цементного камня, независимо от степени гидратации вяжущего [15].

Во многих публикациях отмечается, что наиболее плотным и прочным компонентом цементных композитов, как при твердении в нормальных температурно-влажностных условиях, так и при тепловлажностной обработке до 60 °С, является тоберморитоподобный низкоосновный гелевидный гидросиликат кальция [16, 20, 55, 72]. Цементный гель условно обозначается как С–S–Н фаза и может иметь различную основность – низкоосновная разновидность отмечается как С–S–Н(I) и характеризуется отношением $C/S=0,8-1,5$, а у высокоосновного геля С–S–Н(II) основность $C/S=1,5-2$ [35, 36, 72, 96, 180]. Особенность высокоосновного гидросиликатного геля заключается в его способности к кристаллизации с образованием кристаллов различной сингонии [35].

В экспериментах В.С. Горшкова и В.В. Тимашева с соавторами выявлено, что наибольшей прочностью, от 1300 до 2000 МПа, в цементном камне характеризуются С–S–Н(I) фазы [36, 109]. По сравнению с ними гидросиликаты типа С–S–Н(II), характеризуются значительно меньшей прочностью [88, 108]. В работе С.В. Федосова и др. установлено, что повышение дисперсности гидратных фаз цементного камня уменьшает скорость массопереноса, что способствует увеличению стойкости железобетонных конструкций [123]. Повышение содержания количества в цементном камне слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция, при В/Ц менее 0,35, приводит к росту прочности, плотности и адгезии к заполнителям [72].

Следовательно, продукты гидратации цементного камня представлены преимущественно гидросиликатными фазами различной основности и степени закристаллизованности, а также алюминатными, алюмоферритными, сульфо- и карбоалюминатными гидратными соединениями. Свойства и стойкость цементного камня зависят не только от пористости, на которую влияет В/Ц и степень гидратации цемента, но и от сохраняемости во времени тонкодисперсных гидросиликатных фаз [112].

А.В. Волженским установлен эффект «старения цементного геля», в результате которого в образцах цементного камня, даже после однократного высушивания, наблюдается снижение усадочных деформаций вследствие укрупнения гидратных фаз [23, 65, 96, 80, 112]. Такой же процесс отмечается и при длительном твердении образцов в нормальных условиях, без сушки. Этот эффект наблюдается при изменении содержания в цементном камне количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и протекает особенно интенсивно в условиях пропаривания и циклических воздействий [113]. Увеличение размеров низкоосновных гидросиликатов кальция приводит к увеличению деформативности и трещиностойкости бетона, что снижает его долговечность при различных внешних механических и температурно-влажностных воздействиях. Однако, при благоприятных условиях твердения, могут наблюдаться и конструктивные процессы, связанные с продолжающейся гидратацией цемента и формированием гелеобразных продуктов гидратации [78, 80]. Введение в цементные композиции пуццолановых добавок, типа микрокремнезема, способствует формированию низкоосновных гидросиликатных фаз [53, 112].

Кроме состава гидратных фаз, формирующих цементный камень, принято считать, что значительное влияние на его стойкость оказывает величина пористости, которую А.Е. Шейкин определяет как «все несплошности, не занятые твердой фазой исходных материалов и гидратных новообразований» [130].

Условно, по размеру, все поры и несплошности цементного камня делятся на следующие группы:

– гелевые или ультрамикropоры с диаметром менее 5 нм;

- микрокапиллярные или переходные поры с диаметром 5...100 нм;
- макропоры делятся: капиллярные с диаметром от 100 до 1000 нм и макрокапиллярные с диаметром свыше 1000 нм.

При контакте с водой макропоры цементного камня легко заполняются ею, которая замерзает в них при температуре минус 3...5 °С, кроме того, при фильтрации через них воды, могут происходить процессы выщелачивания [5]. Кроме этого, замкнутые капиллярные поры могут заполняться водой вследствие конденсации водяного пара.

Микрокапиллярные поры насыщаются за счет капиллярного подсоса, вода в них замерзает при температуре минус 20...40 °С, и через микрокапилляры может происходить, при циклическом замораживании, перемещение влаги в резервные полости. При диаметре пор менее 100 нм формируются сначала мениски влаги, которые смыкаются и вызывают насыщение пор водой через капиллярную конденсацию.

Гелевые поры – это тончайшие промежутки между гелеобразными гидросиликатами, которые под действием молекулярных сил ориентируют диполи воды и создают диффузный слой адсорбционной влаги [96]. Плотность такой воды в полтора раза выше плотности обычной воды, и она приобретает способность сопротивляться напряжениям, возникающим при сдвиге, что позволяет ей выступать как элемент коагуляционной структуры цементного камня. При охлаждении, даже до температуры жидкого азота (минус 196 °С), эта вода не переходит в лед [159].

Основным дефектом цементного камня являются открытые капиллярные поры, которые способствуют его насыщению водой и агрессивными растворами, что снижает показатели стойкости цементного камня [130]. Вода в таких порах при отрицательных температурах замерзает с увеличением объёма на 9,07 %, что вызывает возникновение напряжений, которые приводят к деструкции при циклическом замораживании. При циклическом замораживании цементного камня вода в гелевых порах не замерзает, но может переходить из

адсорбционного состояния в ньютоновское, что будет увеличивать количество льда в порах и степень деструкции [96].

Таким образом, стандартный подход к обеспечению долговечности бетона через показатели плотности и организацию порового пространства не учитывает роль особенностей структуры гидратных фаз и их сохраняемость при различных внешних воздействиях. Следовательно, этот вопрос требует дополнительных исследований для бетонов с высокими требованиями по морозостойкости, особенно для суровых условий эксплуатации железобетонных конструкций.

1.3.2 Пластифицирующие добавки и их роль в формировании структуры цементного камня в бетоне

Пластифицирующие добавки в основном используются для водоредуцирования, что позволяет снизить величину В/Ц – основной фактор прочности бетона, и повысить его плотность и стойкость [6, 41, 147]. В настоящее время появился новый класс бетонов – высокофункциональных, которые невозможно получать без современных пластифицирующих добавок, такие бетоны позволяют существенно повысить эффективность строительства за счет применения различных минеральных добавок [8, 51, 64, 117, 120, 156].

По степени пластификации бетонных смесей добавки можно классифицировать следующим образом [66, 225]:

- суперпластифицирующие, от П1 до П5;
- пластифицирующие, от П1 до П2–П4.

Суперпластифицирующие добавки получают на основе нафталин- и меламинформальдегидов, а также поликарбоксилатов, акрилатов и алилов. Пластифицирующие добавки на основе лигносульфоната натрия технического (ЛСТ), несмотря на низкий водоредуцирующий эффект, могут способствовать формированию тонкодисперсной структуры гидратных фаз [13].

Также, исходя из экспериментальных данных ряда авторов, добавки пластификаторы можно разделить по степени их влияния на структуру гидратных фаз [13, 19, 48, 166, 175, 194, 203, 207]:

- пластификаторы-модификаторы;
- пластификаторы, не влияющие на структурные параметры.

Вследствие адсорбционной активности, большинство водоредуцирующих добавок покрывают цементные частицы, создавая оболочку различной проницаемости, поэтому, как правило, введение водоредуцирующей добавки замедляет схватывание и твердение бетонной смеси [19, 51, 64, 142, 175].

Пластификаторы в бетонной смеси проявляют свойства поверхностно-активных веществ (ПАВ), что способствует улучшению смачиваемости частиц цемента и гидратных фаз [43, 97]. В результате адсорбции молекул суперпластификаторов на поверхности клинкерных частиц происходит снижение трения между ними, то есть проявляются свойства смазки. Это уменьшает сцепление твердых частиц и снижает трение между ними, что и вызывает повышение подвижности – разжижение бетонной смеси. Чем более жирные бетонные смеси, тем выше эффект от действия пластификатора, но необходимо учитывать минералогический состав цемента, также влияющий на эффективность пластифицирующих добавок [203, 204]. Гидроалюминатные фазы цементного камня могут поглощать поликарбоксилатные добавки, снижая их эффективность, поэтому желательно применение низкоалюминатных цементов [19, 175, 203].

Механизм действия современных поликарбоксилатных суперпластификаторов, молекулы которых представляют собой длинную основную цепь с различным числом боковых ветвей, основывается на стерическом эффекте. Его суть заключается в точечной адсорбции молекулы пластификатора на поверхности цементных зерен и физическом отталкивании их друг от друга [8, 54]. Можно обеспечивать различную величину водоредуцирования, в зависимости от конкретных свойств бетонной смеси, за счет варьирования размера основной и боковых цепей поликарбоксилатного суперпластификатора. Современная строительная химия позволяет получать

узкоспециализированные суперпластификаторы для получения нерасслаивающихся, легко формуемых бетонных смесей для высококачественных бетонов [8, 19, 25, 26, 27, 66, 162, 167, 168, 175, 202]. Положительная роль поликарбоксилатных суперпластификаторов, отмеченная А.И. Вовком, заключается в увеличении степени аморфизации гидратных фаз цементного камня [19]. Также в литературе имеются предположения о том, что поликарбоксилатные суперпластификаторы могут образовывать метастабильные комплексы с ионами кальция [166, 194, 207].

Современные отечественные суперпластификаторы на основе нафталинов и меламинов, такие как СП-1, практически не оказывают влияния на структурные характеристики цементного камня и степень его аморфизации [48, 152]. Поликарбоксилатные суперпластификаторы, модифицируя гидратные фазы цементного камня, оказывают существенное влияние на свойства бетона, но изменение при этом стойкости железобетонных конструкций в суровых условиях эксплуатации необходимо исследовать дополнительно.

1.3.3 Модифицирующее воздействие пуццолановых добавок на свойства бетона

Применение минеральных добавок в технологии бетона решает несколько проблем – снижает экзотермию бетона и выбросы парникового углекислого газа, за счет замены части цемента, а также повышает характеристики стойкости бетона [6, 9, 147]. Активные минеральные добавки (АМД) подразделяются на гидравлические и пуццолановые, чаще всего используют доменный гранулированный шлак и золы-уноса тепловых электростанций [153, 225, 245, 246]. Для бетонов повышенной прочности и стойкости, как правило, применяется микрокремнезем, отход производства ферросплавов или металлического кремния [6, 45, 49, 53, 54, 63, 99, 100, 147, 161, 171, 183, 184, 205, 245]. В Европейских

нормах, количество вводимого в качестве добавки микрокремнезема ограничивается 11 % от массы цемента, в случае превышения этого значения, микрокремнезем считается микронаполнителем [153]. Практически дозировку микрокремнезема определяют с учетом содержания алита в цементе, так для ЦЕМ I 42,5 Н его дозировка составляет порядка 10–12 % по массе цемента, а для менее активных цементов порядка 8–10 % [25].

Контроль качества микрокремнезёма осуществляется по следующим параметрам [6, 147, 153, 245]:

- химический состав – содержание кремния (кремнезёма), щелочей и углерода;

- вещественный состав, по данным рентгенофазового анализа – определение количества аморфных и кристаллических веществ без прокаливания и после прокаливания до 1100 °С, при котором аморфный кремнезём переходит в кристобалит;

- удельная поверхность по низкотемпературной адсорбции азота;

- пуццолановая активность;

- свойства бетона без добавок и при введении 11 % микрокремнезема и 0,8 % суперпластификатора при постоянном В/Ц – оценивается прочность через 1, 3, 7, 28, 90 и 180 суток, водонепроницаемость, сульфатостойкость, морозостойкость и стойкость к щелочной коррозии.

Микрокремнезем представляет собой тонкодисперсную пыль серовато-белого цвета из частиц SiO_2 сферической формы, с размерами от 1 до 0,01 мкм и удельной поверхностью более 12000 м²/кг. На представленном, на рисунке 2, снимке микрокремнезема показано, что отдельные частицы SiO_2 , вследствие избыточной поверхностной энергии и высокой активности, объединяются в тороиды.

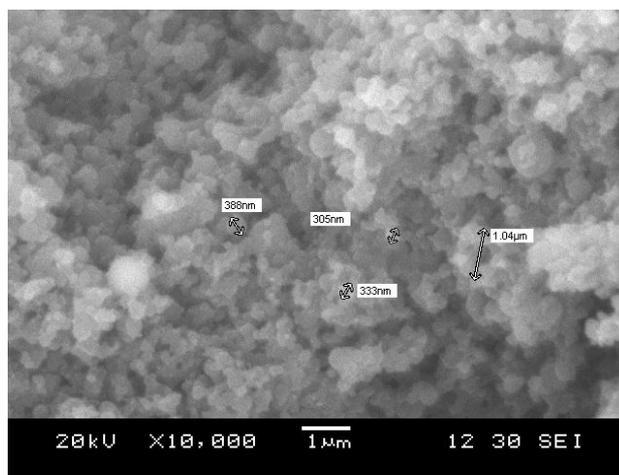


Рисунок 2 – Электронно-микроскопическое изображение микрокремнезема

Насыпная плотность микрокремнезема не превышает 300 кг/м^3 и он не слеживается, вследствие поверхностного электростатического заряда [6]. Для предотвращения пыления микрокремнезема при транспортировке на дальние расстояния и уменьшения объёма его гранулируют, увеличивая насыпную плотность до $310\text{--}600 \text{ кг/м}^3$.

В процессе гидролиза и гидратации основных клинкерных минералов формируется портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$, который активно взаимодействует с микрокремнеземом с образованием низкоосновных гелеобразных гидросиликатов типа C–S–H(I) [6, 25]. Связывание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ упрочняет контактную зону цементного камня с заполнителем и способствует повышению его адгезионной прочности, а также повышает однородность цементного камня, благодаря аморфизации гидратных фаз, и увеличивает содержание гелевых пор [49, 65, 99, 112, 183, 184, 201, 205]. При дозировках микрокремнезема 8–12 % по массе цемента остаточное содержание портландита в цементном камне бетона составляет 3–5 %, что не ухудшает пассивацию арматуры в бетоне [147].

Высокая дисперсность микрокремнезема приводит, при введении его в бетонную смесь, к повышению водопотребности, поэтому обычно он применяется совместно с водоредуцирующей добавкой [53, 54, 63, 64].

1.3.4 Совместное применение суперпластификаторов и активных минеральных добавок

Получение бетонов с повышенными характеристиками стойкости и надежности, в большинстве случаев, связано с совместным введением в бетонную смесь суперпластифицирующей и активной минеральной добавок [6, 9, 40, 43, 45, 53, 66, 147, 196, 200]. Комплексное модифицирование позволяет получать высокопрочные бетоны, эффективность которых связана с понижением материалоемкости изделий и конструкций и с повышением стойкости бетона [116, 132, 171, 181, 196, 202].

Для создания комплексных добавок, требуемых технических характеристик, структурным подразделением НИИЖБ им. А.А. Гвоздева ОАО «НИЦ Строительство» введен национальный стандарт ГОСТ Р 56178-2014 [245]. Этот норматив регламентирует требования к модификаторам бетона (МБ) с различной минеральной (метакаолин, гипс, зола-уноса и микрокремнезем) и органической частями, которые применяются для регулирования свойств бетонных, растворных и сухих смесей. Применение МБ повышает прочность, стойкость и плотность бетона.

Кроме добавок серии модификатор бетона, на строительном рынке предлагается большое количество других органо-минеральных добавок [150]. При использовании этих добавок получают бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками, но сведения о стабильности структурных характеристик цементного камня во времени при внешних агрессивных воздействиях весьма ограничены.

Применение в строительной практике добавок микрокремнезема совместно с суперпластификаторами обусловлено высокими прочностными и эксплуатационными свойствами бетона строительных конструкций, в том числе и в суровых климатических условиях [25, 96]. Прочность при сжатии бетона с такими добавками на природных заполнителях ограничивается 150 МПа из-за

прочности заполнителей. Крупные заполнители являются концентраторами напряжений в бетоне и снижают его прочность, поэтому разработаны порошково-реакционные бетоны (reactive powder concrete), которые получают помолотом всех компонентов с последующим прессованием при низких значениях В/Ц. Прочность таких бетонов достигает более 300 МПа, а дозировка микрокремнезема увеличивается до 25 %. [6, 52]. Комплексы модификаторов бетона предусматривают применение нафталинформальдегидных суперпластификаторов, взаимодействие которых с микрокремнеземом и их дальнейшее влияние на структуру цементного камня описано в технической литературе достаточно широко [6, 8, 40, 54, 55, 112]. Влияние длительных циклических воздействий на структуру гидратных фаз цементного камня образцов бетона, в том числе с комплексными модификаторами, изучено недостаточно [19, 25, 66, 142, 147].

1.4 Факторы, влияющие на долговечность железобетонных конструкций

Долговечность характеризуется интервалом времени эксплуатации железобетонных конструкций, в течение которого бетон сохраняет свойства, заложенные при проектировании [231]. По ГОСТ 31384-2017 долговечность оценивается по показателям морозостойкости бетона и по скорости нейтрализации защитного слоя бетона под действием углекислого газа [235]. Если технические требования этого национального стандарта, в зависимости от агрессивных воздействий среды эксплуатации, выполняются, то долговечность конструкций будет не менее 50 лет [235, 260]. Такой срок эксплуатации предусмотрен ГОСТ 27751-2014 для зданий и сооружений массового строительства в обычных условиях эксплуатации [128, 231]. Для увеличения эксплуатационного срока службы уникальных зданий и сооружений до 100 и более лет необходимо ужесточить требования по степени агрессивности, в соответствии с ГОСТ 31384-2017, на одну ступень [2, 121].

Для климатических условий Российской Федерации основными внешними агрессивными воздействиями, как правило, являются циклические замораживания и оттаивания, в том числе в сочетании с другими воздействиями, поэтому параметр долговечности связывают с маркой бетона по морозостойкости и водонепроницаемости [86, 98, 164, 192]. Так в работах Г.В. Несветаева и других авторов предлагаются методики пересчета характеристик стойкости материалов в годы, например, от 8 до 15 циклов замораживания и оттаивания, в зависимости от агрессивности среды эксплуатации, соответствуют одному году долговечности конструкций [12, 86, 135, 139]. Но, тем не менее, в научных публикациях отмечается, что необходимы дальнейшие исследования взаимосвязи между структурными особенностями цементного камня бетона, при воздействии определенных эксплуатационных сред, и количеством безаварийных лет эксплуатации [160].

1.4.1 Влияние на морозостойкость бетона структуры гидратных фаз цементного камня

Морозостойкость бетона – это его способность в водонасыщенном или насыщенном раствором соли состоянии выдерживать многократное замораживание и оттаивание без внешних признаков разрушения (трещин, сколов, шелушения ребер образцов), снижения прочности, изменения массы и других технических характеристик [213].

С увеличением требований по морозостойкости бетона проектирование состава, помимо применения воздухововлекающих добавок, должно учитывать ограничения по величине максимально допустимого В/Ц, минимально допустимого расхода цемента и класса бетона по прочности при сжатии [133, 137, 154, 206, 229, 237, 248, 251, 252].

Введение воздухововлекающих добавок при разработке состава бетона с маркой по морозостойкости F_{1200} (F_{2100}) и выше обязательно, в соответствии с национальным стандартом ГОСТ 26633-2015 [229]. Подобный подход закреплен в нормативных документах почти во всех странах мира [147, 155, 164]. Необходимость воздухововлечения была предложена американскими учеными в 50-ых годах 20-ого века в связи с гипотезой разрушения под действием гидравлического давления при послойном замораживании бетонного сооружения [176, 177]. Благодаря воздухововлечению в бетоне создаются резервные полости, куда выдавливается часть незамерзшей воды и снижается гидравлическое давление. Чтобы давление воды не вызывало деструкцию бетона, нужно располагать резервную пору на определенном расстоянии (не менее 0,254 мм), что обеспечивается при уровне воздухововлечения не менее 4 % [155].

Российские ученые, помимо гидравлического давления, считают необходимым учитывать и перемещение влаги при циклическом замораживании, которое движется навстречу фронту промерзания [29, 31, 83, 111]. В результате создаются условия критического водонасыщения поверхностных слоев и их шелушение при замораживании и оттаивании.

Эти представления были расширены гипотезой об образовании заземленной воды, которая при переходе в лед, с увеличением объема, внутри уже сформировавшегося ледяного слоя, вызывает взрывное воздействие с локальным разрушением бетона [18].

Все предлагаемые механизмы разрушения при циклическом замораживании бетона связывают возникновение напряжений с образованием льда в его порах, поэтому большинство исследователей по морозной деструкции занимаются изучением и организацией порового пространства. Ряд авторов, помимо пористости, считает необходимым для повышения морозостойкости учитывать показатели структуры гидратных фаз цементного камня [137, 147].

Из экспериментальных данных следует, что в образцах бетона, с водоцементным отношением менее 0,35, при замораживании до минус 30 °С льдообразования не происходит, а следовательно отсутствует и деструкция [112,

177]. При более высоком водоцементном отношении до 0,5, поровое пространство состоит в основном из гелевых и переходных пор, в которых льдообразование отсутствует или присутствует в незначительном количестве. Тем не менее, при испытании образцов бетона без льдообразования при первом замораживании, в процессе циклических испытаний наблюдается изменение характера порового пространства с увеличением размера капилляров и образованием льда. Из этих данных следует, что повышение размеров пор связано как с протеканием коррозии первого вида, так и вследствие кристаллизации первоначально образовавшихся структурных элементов [112, 135]. Для повышения морозостойкости бетона, необходимо, помимо организации порового пространства и формирования слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция, обеспечение неизменности и стойкости структуры при циклических воздействиях.

Повышение стабильности микроструктуры цементного камня отмечается при введении в бетонную смесь пуццолановой добавки микрокремнезема [17, 21, 55, 65, 113], которая, вследствие высокой водопотребности, должна вводиться вместе с водоредуцирующей добавкой [232], иначе произойдет снижение марки бетона по морозостойкости [94, 197]. В литературе имеются данные о том, что для обеспечения высокой марки бетонов по морозостойкости необязательно применение воздухововлекающих добавок, при условии, что водовяжущее отношение (В/В) в бетоне менее 0,25, а в некоторых случаях и менее 0,3 [174]. Также в литературе имеются сведения о получении морозостойкого бетона без специального воздухововлечения при водовяжущем отношении 0,27 и расходе цемента 600 кг/м³. В случае введения воздухововлекающей добавки в этот состав, количество вовлеченного воздуха увеличивается с 0,9 % до 4,8 %, а прочность в возрасте 28 суток снижается с 69 МПа до 59,3 МПа [197].

Национальные стандарты разрешают применение микрокремнезема в бетоне, но не дают рекомендаций для его применения в высокоморозостойких бетонах. Также, в нормативных документах нет указаний по применению конкретного вида пластифицирующих добавок, хотя С.Ф. Бугрим в своих опытах

открыл явление адсорбционного модифицирования гидратов – поверхностно-активный пластификатор, типа ЛСТ, который адсорбируется на продуктах гидратации и способствует их сохранению в аморфизированном состоянии [13]. Так, бетоны, модифицированные ЛСТ, несмотря на меньшую водоредуцирующую способность, по сравнению с нафталинформальдегидами, обладают более высокой маркой по морозостойкости [112]. Также в литературе имеются сведения о том, что изменение вида пластификатора с нафталинформальдегидного на поликарбоксилатный, не оказывает влияния на марку бетона по морозостойкости [82].

В виду большой номенклатуры предлагаемых поликарбоксилатных суперпластификаторов разного назначения необходимо дополнительно исследовать их влияние на морозостойкость бетона.

1.4.2 Структурные изменения цементного камня бетона при циклических механических нагрузениях

На бетоны железобетонных конструкций инфраструктурных объектов, помимо агрессивных климатических факторов, воздействуют различные циклические механические напряжения. Усталостные явления в бетоне при циклических механических напряжениях изучались в работах опубликованных Ю.М. Баженовым, И.К. Белоборовым, О.Я. Бергом, А.А. Гвоздевым, Т.С. Каранфиловым, Н.И. Карпенко, А.М. Кокаревым, К.В. Михайловым, В.В. Москвиным, А.Е. Шейкиным, А.В. Яшиным и другими [6, 11, 28, 30, 57, 58, 59, 85, 129].

Испытания выносливости бетона регламентируются ГОСТ 24545-81, согласно которому для построения линий регрессии необходимо проводить циклические механические нагружения образцов призм с уровнем напряжений от 0,6 до 0,9 от разрушающей нагрузки с количеством циклов не менее двух

миллионов [226]. Результаты таких экспериментов получены при большой скорости нагружения и разгружения образцов, что исключает возможность выявления структурных особенностей бетона на усталостную прочность. Было установлено, что при многократно повторных циклических воздействиях, предел выносливости составляет около 0,5 от призмной прочности испытываемых образцов [39, 90]. При циклических механических испытаниях бетонных призм происходит хрупкое разрушение, которое напоминает разрушение образцов кубов, вследствие нормального отрыва и поперечного сдвига, но из-за соотношения высоты к размеру поперечного сечения больше трех (обычно принимают четыре), устраняется эффект обоймы, то есть роль трения между опорными поверхностями образцов и плитами пресса [46]. Для оценки влияния структуры цементного камня на характер разрушения бетонных образцов при циклических механических воздействиях, необходимо проведение дополнительных исследований.

В немногочисленных публикациях по малоцикловому сжимающему нагружению бетона отмечается увеличение прочностных свойств и снижение деформативности бетона [4, 77, 125]. Выявлено, что большое влияние на изменение свойств бетона оказывает его возраст, прочность к началу повторных нагружений, количество циклов, величины максимального напряжения и асимметрии цикла. Наибольшие изменения отмечаются при увеличении нагрузки от 0,5 до 0,7 от разрушающей и после сравнительно небольшого количества циклов. При увеличении числа циклов процесс изменения механических характеристик бетона сначала стабилизируется, а затем прочность снижается. В большинстве работ эти процессы связывают с микротрещинообразованием, но влияние структурных особенностей цементного камня на этот процесс практически не рассматривается [46, 85, 129].

В некоторых публикациях отмечается рассеивание – диссипация механической энергии в теле бетона при циклических механических воздействиях [45, 126]. При испытании бетонов модифицированных пластифицирующими

добавками отмечается увеличение коэффициента поглощения энергии, это явление связывают с повышением однородности и деформативности бетона [104].

Таким образом, необходимо расширить представления о взаимосвязи между структурой гидратных фаз цементного камня, модифицированного различными добавками, и стойкостью бетона к циклическим механическим воздействиям, при разном уровне напряжений.

Выводы по главе 1

1. Представления о механизме разрушения бетона при различных внешних циклических воздействиях не учитывают влияние на его стойкость структуры гидратных фаз цементного камня, сформированной с использованием добавок модификаторов.

2. Для реализации государственной политики по развитию и реконструкции транспортной, промышленной и энергетической инфраструктуры в Арктике и на Дальнем Востоке необходимы тяжелые бетоны с маркой по морозостойкости выше F₂₄₅₀, что будет способствовать созданию условий для повышения надежности и долговечности железобетона в суровых природно-климатических условиях.

3. Известно, что нафталинформальдегидные суперпластификаторы не влияют на фазовый состав и степень закристаллизованности цементного камня, тогда как поликарбоксилатные суперпластификаторы способны взаимодействовать с Ca(OH)₂ с образованием комплексных соединений, что необходимо учитывать для обеспечения морозостойкости бетонов с этими модификаторами.

4. В нормативных документах не приводятся критерии и методы оценки структуры цементного камня, которые бы позволили прогнозировать стойкость и долговечность железобетонных конструкций в суровых условиях эксплуатации.

5. Тяжелые бетоны с В/Ц менее 0,35 не содержат макрокапиллярных пор и характеризуются сравнительно высокой морозостойкостью без применения воздухововлекающих добавок.

6. Изменения микроструктуры цементного камня в бетоне при циклических воздействиях в суровых климатических условиях при применении пуццоланового и водоредуцирующего модификаторов изучены недостаточно.

Глава 2 Используемые материалы и методы исследования

2.1 Методология исследования

Методологической основой исследований являются общенаучные подходы, основанные на анализе, сравнении и обобщении экспериментальных данных, дополненные методами математического планирования и применения принципов системного подхода.

Из работ П.Г. Комохова и Т.В. Кузнецовой известно, что формирование структуры цементного камня только из кристаллической фазы резко снижает деформации ползучести, но придает ей низкую прочность даже при высокой степени гидратации цемента вследствие возникновения структурных напряжений при образовании кристаллического каркаса [60, 61, 71, 72]. Наличие гелевидной структурной составляющей позволяет релаксировать структурные напряжения цементного камня и повышает количество препятствий для роста трещин. М.М. Сычев рекомендует для повышения прочности и стойкости цементного камня формировать структуру высокодисперсного гидросиликатного геля с меньшим соотношением C/S , что обеспечивает развитие большого количества межкристаллитных связей [106]. А.Ф. Полак и В.В. Бабков также считают, что повышение прочности цементного камня достигается при большей дисперсности гидратных новообразований, при этом уменьшается и дефектность кристаллитов [92].

Таким образом, для получения бетона, стойкого к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации, необходимо исследовать закономерности направленного формирования гелеобразной структуры цементного камня.

2.2 Характеристика сырьевых компонентов

Применяемые в работе материалы по всем нормируемым параметрам соответствуют требованиям национальных стандартов.

Портландцемент

В исследованиях использовались портландцементы ЦЕМ I 42,5 четырех разных производителей, но, несмотря на некоторые различия в их свойствах и минералогическом составе, роль модифицирующих добавок в формировании микроструктуры и стойкости бетона осталась определяющей.

Применение Топкинского быстротвердеющего цемента, с повышенным содержанием алита, при исследовании свойств цементного камня, позволило определить роль портландита в формирующейся структуре цементного камня. Дальнейшие лабораторные исследования свойств тяжелого бетона проводились на ЦЕМ I 42,5Н производства «Дюккерхофф Коркино цемент», с содержанием С₃А около 7 %. При опытно-промышленных внедрениях применялись цементы производства «Горнозаводскцемент» и «Якутцемент». Нормируемые свойства цементов указаны в таблице 1, а содержание химических элементов приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Нормируемые свойства используемых цементов

Значение	Дюккерхофф Коркино цемент	Горнозав одскце мент	Топкинский цемент	Якутцемент
Насыпная плотность, кг/м ³	1300	1300	1300	1320
Истинная плотность, кг/м ³	3100	3100	3100	3100
Тонкость помола (остаток на сите №008), %	4,6	4,6	4,6	3,5
Удельная поверхность, м ² /кг	342	348	350	336
Предел прочности на сжатие в 2 сут., МПа	23,7	17	19,4	21,2

Продолжение таблицы 1

Значение	Дюккерхофф Коркино цемент	Горнозав одскце мент	Топкинский цемент	Якутцемент
Предел прочности на изгиб в 28 сут., МПа	6,2	6,4	7,6	7,2
Предел прочности на сжатие в 28 сут., МПа	61,6	53,3	52,5	51,7
Активность при пропаривании, МПа	41,1	31,2	39,7	36,8
Группа по эффективности при пропаривании	1	2	1	1
Нормальная плотность цементного теста, %	27,7	25,2	25,1	25,6
Начало схватывания, мин.	190	150	50	170
Конец схватывания, мин.	300	190	120	250
Равномерность изменения объема по ГОСТ 30744-2001 [233], мм	10	10	10	10
Радиоактивность $A_{эфф}$, БК/кг	менее 370			

Таблица 2 – Содержание химических элементов, %

Показатель	Дюккерхофф Коркино цемент	Горнозаводскцемент	Топкинский цемент	Якутцемент
п.п.п.	0,7	1,21	1,28	0,11
Al_2O_3	5,34	5,28	6,92	4,52
SiO_2	20,2	20,34	20,34	21,21
CaO	64,18	64,29	64,18	64,27
Fe_2O_3	4,7	2,84	2,22	4,28
MgO	1,4	1,53	1,35	1,57
R_2O [214, 244]	0,4	0,8	0,4	0,7
SO_3	2,6	2,71	2,96	2,7
Cl^-	0,006	0,012	0,018	0,011
Нераст. остаток	0,45	0,59	0,26	0,36

Требования ГОСТ 31108-2016 выполняются для всех цементов [234].

Крупный заполнитель

В исследованиях применялся гранодиоритовый щебень Новосмолинского карьера наибольшей крупности (НК) 20 мм и 10 мм, их свойства представлены в таблице 3, а содержание вредных примесей в таблице 4.

Таблица 3 – Свойства щебня

Показатель	Полученное значение				Соответствие ГОСТ 8267-93
	10 мм		20 мм		
Влажность, %	1,0		0,8		–
Истинная плотность, кг/м ³	2740		2740		–
Насыпная плотность, кг/м ³	1560		1540		–
Средняя плотность, кг/м ³	2695		2691		–
Гранулометрический состав	Размер сит, мм	Полный остаток, %	Размер сит, мм	Полный остаток, %	Соответствует
	>20	0,4	>10	3,4	
	10...20	64,0	5...10	54,2	
	5...10	95,2	2,5...5	97,6	
	<5	100	<2,5	100	
Количество глинистых и пылеватых примесей, %	0,9		0,6		Соответствует
Пустотность, %	44,2		45,9		–
Дробимость	Др12		Др12		–
Прочность при сжатии (МПа)	140		140		–
Морозостойкость	F300		F400		–

Требования для крупного заполнителя по ГОСТ 26633-2015 и ГОСТ 8267-93 выполняются [210, 229].

Таблица 4 – Содержание вредных примесей

Вид примесей	Содержание, %, для щебня с НК		Допускается по ГОСТ 8267-93
	20	10	
Аморфные разновидности диоксида кремния, растворимого в щелочах, ммоль/л	33,15	28,4	Не более 50
Сера, сульфиды и сульфаты в пересчете на SO ₃	0,06	0,05	Не более 1,5
Слоистые силикаты	8	0	Не более 15
Магнетит, гидроксиды железа, апатит, нефелин, фосфорит, являющиеся породообразующими минералами	0	0	Не более 15
Галоидные соединения в пересчете на ион хлора	0,03	0,03	Не более 0,1
Свободное волокно асбеста	0	0	Не более 0,25
Уголь и древесные остатки	0	0	Не более 1,0

Мелкий заполнитель

В исследованиях применялся кварцевый песок месторождения «Хлебороб»: с модулем крупности 2,4; содержанием пылевидных и глинистых частиц не более 1,9 % по массе и содержанием растворимого в щелочах кремнезема 10 ммоль/л. Данные гранулометрического состава представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Гранулометрический состав песка

Сито	Остаток, г	Частные остатки, %	Полные остатки, %
5	13	1,3	1,3
2,5	86	8,6	9,9
1,25	134	13,4	23,3
0,63	223	22,3	45,6
0,315	232	23,2	68,8
0,16	236	23,6	92,4
0	76	7,6	100
Итого:	1000	100	—

Истинная плотность песка $\rho_{и}=2710$ кг/м³, насыпная плотность песка $\rho_{нас}=1530$ кг/м³, пустотность 43,5 %, влажность 2 %.

Песок удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-2014 и соответствует I классу и средней группе [211]. По ГОСТ 26633-2015 такой песок может использоваться в качестве мелкого заполнителя для бетона [229].

Для получения высококачественного бетона с гарантированными свойствами осуществлялась подготовка заполнителей – удаление пылеватых, илистых и глинистых примесей до содержания не более 0,1 % по массе, с последующей сушкой при температуре 100 ± 5 °С до остаточной влажности не более 0,1 % по массе.

Добавки пластификаторы

В работе оценивалось влияние на структуру цементного камня двух пластификаторов различного принципа действия – поликарбоксилатного MasterGlenium ACE 430 (ACE) и нафталинформальдегидного СП-1.

Для равномерного распределения поликарбоксилатного пластификатора в бетонной смеси, его раствор вводился совместно с водой затворения. Производитель этой добавки, компания BASF (Германия), рекомендует её применение для высокопрочных бетонов с качеством поверхности не хуже А3 по ГОСТ 13015-2012 [218]. Кроме того, применение добавки ACE позволяет получать бетонные смеси с маркой по удобоукладываемости от П1 до П5. Технические характеристики пластификатора приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики пластификатора MasterGlenium ACE 430

Технический параметр	Значение
Форма	Жидкость
Цвет	Светло-коричневый или коричневый
Плотность (при 20 °С)	(1060 ± 20) кг/м ³
Сухой остаток	(29 ± 2) %
Водородный показатель (при 20 °С), рН	$6 \pm 0,5$
Содержание Cl-иона, в масс. %	<0,1 %
Гарантийный срок хранения	1 год с даты изготовления

Используемая в работе добавка удовлетворяет требованиям СТО 70386662-310-2014.

Модифицирующее действие поликарбоксилатного пластификатора сравнивалось с нафталинформальдегидным пластификатором СП-1. Данная добавка перед введением в бетонную смесь растворялась в части воды затворения. В работе использовалась СП-1 производства компании ООО «Полипласт УралСиб», г. Первоуральск. Производитель рекомендует этот пластификатор как водоредуцирующую добавку для производства тяжелого бетона класса по прочности при сжатии В45 и выше. Технические показатели СП-1 приведены в таблице 7 и соответствуют требованиям ТУ 5870-005-58042865-05.

Таблица 7 – Технические характеристики пластификатора СП-1

Наименование характеристик	В форме порошка с ненормируемым воздухововлечением
Внешний вид	Порошок коричневого цвета
Массовая доля воды, %, не более	10
Показатель активности водородных ионов (рН) водного раствора пластификатора с массовой долей 2,5 %	8,5±0,57
Насыпная плотность, кг/м ³	450±10
Массовая доля ионов хлора, %, не более	0,1
Повышение марки бетонной смеси по удобоукладываемости без снижения прочности во все сроки твердения	От П1 до П5
Гарантийный срок хранения	1 год с даты изготовления

Активная минеральная добавка

В качестве высокоактивной пуццоланы применялся Новокузнецкий гранулированный микрокремнезем. Насыпная плотность в уплотнённом состоянии (420±20) кг/м³; активность по гидроксиду кальция 1,4 г/г; удельная поверхность 15 000 м²/кг. Химический состав приведен в таблице 8 и соответствует ТУ 5743-048-02495332-96.

Таблица 8 – Химический состав микрокремнезема, % по массе

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	C	SO ₃	H ₂ O
96,4	0,17	0,19	0,5	0,5	0,43	0,6	0,08	0,55	0,42	0,31

Вода затворения

Применяемая для приготовления цементного теста и бетонной смеси водопроводная вода соответствует требованиям ГОСТ 23732-2011 [224].

2.3 Методы испытаний и исследований

Используемые в работе испытания, соответствующие национальным стандартам, перечислены в таблице 9.

Таблица 9 – Используемые в работе стандартные методики

№ п/п	Исследуемая характеристика	Нормативный документ	Количество повторов	Внутрисерийный коэффициент вариации, %
1	Песок. Зерновой состав. Загрязняющие примеси.	ГОСТ 8735-88 (с изм. 2000)	3	Не более 5
2	Щебень. Методы испытаний.	ГОСТ 8269-97 (с изм. 2000)	3	Не более 5
3	Цемент. Методы испытаний нормальной густоты, сроков схватывания, тонкости помола, прочности.	ГОСТ 310.2.3.4-88 (с изм. 2003)	3	Не более 5
4	Бетоны. Методы определения морозостойкости.	По третьему ускоренному методу, ГОСТ 10060-2012	3	Не более 8
5	Бетоны. Метод определения прочности по контрольным образцам.	ГОСТ 10180-2012	2	Не более 5
6	Бетоны. Метод определения водопоглощения	ГОСТ 12730.3-78	6	Не более 5
7	Бетоны. Методы определения водонепроницаемости	ГОСТ 12730.5-84	6	–
8	Смеси бетонные. Методы испытаний	ГОСТ 10181-2014	–	–
9	Бетоны. Методы определения истираемости	На установке типа «круг истирания» по ГОСТ 13087-2018	6	Не более 5

Применение изложенных в стандартах процедур позволяет получать экспериментальные данные, которые могут быть проверены в любой аттестованной лаборатории. Погрешности испытания оценивались по относительной величине – среднеквадратичной погрешности по отношению к среднеарифметическому значению. Количество повторов обеспечивало относительную погрешность не более 5 %, а величина среднеарифметического значения характеризовалась как среднеквадратичная погрешность, деленная на корень квадратный из числа повторных опытов.

Принятые в работе режимы циклических испытаний образцов цементного камня

Для проведения испытаний изготавливались серии образцов кубов из цементного теста нормальной плотности с ребром 20 мм при введении различных модификаторов. Стойкость образцов к циклическим воздействиям оценивалась через 50 циклов по изменению массы, прочности и появлению внешних дефектов. Испытания основных образцов, подвергавшихся циклическим воздействиям, проводились в один день с испытанием контрольных образцов, твердевших в нормальных условиях. В работе были приняты следующие режимы испытания:

1. Один цикл увлажнения и высушивания состоит из двух часов насыщения в водопроводной воде при температуре плюс 20 °С и 22 часов высушивания на воздухе при температуре плюс 50 °С.

2. Один цикл замораживания и оттаивания состоит из четырех часов замораживания на воздухе при температуре минус 20 °С и 20 часов оттаивания в водопроводной воде при плюс 20 °С.

Определение удельной поверхности цементного камня

В работе использовался метод БЭТ, предложенный С. Брунауэром, П. Х. Эмметом и Э. Теллером, и изложенный в книге С. Грега и К. Синга [37]. Для проведения испытаний из цементного теста нормальной плотности формовались кубы с ребром 20 мм, модифицированные различными добавками, которые твердели в нормальных условиях 28 суток. Насыщенные в течение четырех суток водой образцы помещались в эксикатор с относительной влажностью воздуха

$\varphi=0,4$ над раствором H_2SO_4 с плотностью $1,375 \text{ г/см}^3$. Периодически, раз в сутки, образцы взвешивали, пока разность масс между двумя последовательными результатами не становилась менее $0,1 \%$, затем проводилась сушка образцов до постоянной массы при температуре $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ [124].

Дисперсность гидратных фаз цементного камня оценивалась по величине удельной поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$, которая возрастает с уменьшением закристаллизованности продуктов гидратации:

$$S_{\text{уд}} = \frac{X_m \cdot N \cdot A_m \cdot 10^{-20}}{M}, \quad (1)$$

где X_m – емкость адсорбированного монослоя ($X_m = [m_{\text{насыщ.}} - m_{\text{сух.}}] / m_{\text{сух.}}$), г/г ;

N – число Авогадро ($6,023 \cdot 10^{23}$ молекул на моль вещества);

A_m – площадь, занимаемая молекулой воды на поверхности твердого тела ($A_m = 0,114 \text{ нм}^2$);

M – молекулярная масса воды ($M=18$).

Термический анализ цементного камня

Этот метод оценивает температуры фазовых превращений в цементном камне и позволяет количественно оценить потерю массы при разных температурах, а также произвести спектральный анализ отходящих газов.

Приборы, сочетающие дифференциальной термический анализ с термогравиметрическим, называются дериватографы. В работе использовался дериватограф немецкой фирмы «Netzsch» марки «LuxxSTA 409 PC». Нагрев платиновых тиглей с навеской от 15 до 30 мг производился со скоростью подъема температуры $10 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

При исследовании цементных систем наблюдаются эффекты с поглощением тепла (эндоэффекты), вызванные разрушением материала и удалением химически связанной воды, и с выделением тепла (экзоэффекты), которые являются признаком полиморфных превращений, реакций окисления и образования новых соединений.

Расшифровка полученной в результате испытания кривой с пиками эндо- и экзоэффектов производится по данным В.С. Горшоква и В.В. Тимашева [35].

Рентгеновский анализ

Данный метод анализа основан на принципе дифракции рентгеновского излучения от кристаллической решетки анализируемого образца. В методе используется CuK_α -излучение, что обеспечивается применением медного электрода в рентгеновской трубке. Расчет параметров дифрактограмм производился по формуле Вульфа-Брэгга. Для идентификации рентгенограмм использовали данные по цементным системам Х. Тейлора, В.С. Горшкова и В.В. Тимашева [35, 108]. Исследуемые в этих работах образцы получены из химически чистых материалов, реальные цементы содержат до 5 % примесных соединений, которые при клинкерообразовании могут внедряться в кристаллические решетки цементных минералов, вызывая смещение аналитических линий дифракционного отражения. Поэтому при расшифровке рентгенограмм нужно это учитывать путем определения как можно большего количества отражений, характерных для данного кристаллического соединения. Количественное определение негидратированного алита проводили с использованием метода внутреннего стандарта, предложенного Ю.С. Малининым [81].

Рентгеновский анализ проводился на аппарате ДРОН-3М с приставкой PDWin. Интервал углов при анализе находился в диапазоне от 6 до 70°, рабочее напряжение составило 30 кВт, а сила тока 10 мА, при ширине выходной щели 1 мм.

Сканирующая электронная микроскопия

В основе электронной микроскопии лежит преобразование отраженного потока электронов в более мощный поток заряженных частиц, которые улавливаются детектором, формирующим изображение. Полученные данные позволяют характеризовать микроструктурные преобразования, проходящие с продуктами гидратации цементного камня. Результаты структурных исследований получены на электронном микроскопе японской фирмы Jeol Interactive Corporation, под маркой JSM-6460LA с рентгеновским микроанализатором Oxford, с погрешностью определения фаз не более 0,5 %.

Данный микроскоп имеет величину гарантированного пространственного разрешения не более 1,5 нм, при степени увеличения до 1 000 000 крат, с максимальным током луча 200 нА.

Для проведения исследования сколы и шлифы образцов цементного камня подвергались металлизации на специальном вакуумном посту с напылением 10–20 нм платины.

Циклические нагрузки

Для некоторых строительных сооружений из бетона и железобетона характерным являются циклические воздействия механических нагрузок (мосты, балки, шпалы и другие). Особенности структурных преобразований гидратных фаз цементного камня при таких условиях эксплуатации практически не исследовались. Для проведения таких испытаний использовалась установка WAW-600kN, с программным обеспечением MAXTEST, позволяющим проводить циклические нагрузки с различной скоростью в диапазоне нагрузок от 1 до 600 кН, с погрешностью менее 0,5 %. В процессе нагружения автоматически ведется запись диаграмм усилия и линейной деформации.

Испытываемые образцы с различными модификаторами (призмы 40×40×160 мм) нагружались до 0,8–0,9 от призмной прочности, которая предварительно определялась как среднее арифметическое значение испытания шести призм данного состава. При этом коэффициент вариации призмной прочности не превышал 6,35 %, статистические данные приведены в таблице А.15. При скорости нагружения 5–10 циклов в секунду по ГОСТ 24545-81 бетон проявляет свойства упругого материала, и особенности структуры гидратных фаз цементного камня не успевают проявляться [226]. Поэтому при циклическом нагружении была принята длительность цикла от 47 до 66 секунд, так как скорость нагружения всех образцов была постоянная и равнялась 2 кН/с, а разгрузка производилась до 10 % от разрушающей нагрузки со скоростью 5 кН/с.

Калориметрический метод определения выделяемого тепла при гидратации и твердении цемента

Экзотермия цемента зависит от минералогического состава и вводимых добавок, поэтому применение данного метода исследования позволяет оценить влияние применяемых модификаторов на интенсивность тепловыделения на начальных стадиях твердения. Регистрация тепловых эффектов проводилась с помощью изотермического калориметра «ТАМ Air» (США, TA Instrumentals). Калориметр позволяет регистрировать тепловой поток и тепловую энергию процессов взаимодействия вяжущего с водой с интервалом в десять секунд, в том числе с различными добавками и модификаторами, одновременно анализируя до восьми проб.

Для проведения исследования используется проба цементного теста объёмом не более 20 см³. Полученные значения автоматически регистрируются в милливаттном диапазоне, до 600 мВт, с погрешностью менее 20 мкВт. Прибор позволяет проводить эксперименты при температуре от 5 до 90 °С, а в наших испытаниях поддерживалась температура 20 °С, при этом погрешность стабильности термостата составляла менее 0,02 °С.

Циклические испытания бетона на замораживание и оттаивание

Марка бетона по морозостойкости устанавливалась в соответствии с ГОСТ 10060-2012, по третьему методу [213]. Установка АУМ-12-3, изготовленная ООО «Маяк», позволяет проводить циклы замораживания и оттаивания в автоматическом режиме и гарантирует температуру воздуха в морозильной камере минус 50 °С с погрешностью не более 2 °С и изменением температуры по объёму камеры менее 3 °С.

2.4 Организация экспериментов

По данным математического планирования эксперимента строится модель в виде полинома, позволяющая оптимизировать различные переменные параметры в экспериментах типа состав-свойства и другие. Этапы математического планирования включают выбор переменных и интервалов их варьирования; проведение экспериментов по плану с необходимым числом повторов и установление регрессионных зависимостей, а также их оптимизацию.

Регрессионные зависимости планов второго порядка имеют следующий вид:

$$M(x,y)=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2+b_{12}x_1x_2. \quad (2)$$

Результаты эксперимента обрабатываются с помощью компьютерных программ, которые дают возможность получить числовые значения коэффициентов регрессионной зависимости и построить изолинии свойств материалов при изменении переменных в заданном интервале. Адекватность полученных моделей оценивается по критерию Фишера, а равноточность по критерию Кохрена.

После математической обработки результатов эксперимента, необходим научный и технологический анализ полученных данных.

2.5 Подбор состава тяжелого бетона

Подбор осуществлялся в соответствии с национальными стандартами и рекомендациями к ним, по методу абсолютных объёмов [220, 230, 236, 249, 254, 257]. В качестве исходных данных, для суровых климатических условий, были приняты требуемый класс по прочности при сжатии не ниже В45 и марка по морозостойкости выше F₂₄₅₀ [235]. Национальные стандарты для расчета состава бетона предполагают наибольший класс по прочности при сжатии В40, а для

обеспечения марки по морозостойкости F₂₄₅₀ требуется низкое В/Ц, что приводит к еще большему увеличению класса по прочности при сжатии.

После теоретического расчета состава тяжелого бетона, на марку по удобоукладываемости П1 и класс бетона по прочности В60, были проведены процедуры его корректировки, как для состава без добавок так и с используемыми модификаторами [230]. Величина В/Ц=0,31 была постоянной для всех рабочих составов модифицированных бетонов.

Однородность и нераслаиваемость при перемешивании бетонной смеси обеспечивались с помощью применения эффективного бетоносмесителя принудительного действия марки LC-Technic (Россия) при скорости вращения барабана 60 оборотов в минуту. Коэффициент уплотнения бетонной смеси при формовании образцов составлял не менее 0,98, что обеспечивалось применением виброплощадки со стандартными вертикально направленными колебаниями и магнитным креплением форм [216]. Однородность бетонной смеси оценивалась по прочности бетона, таблицы А.2–А.4.

Статистический расчет полученных экспериментально данных при различных испытаниях образцов бетона приведен в приложении А, таблицы А.1–А.15.

Выводы по главе 2

1. Все используемые материалы удовлетворяют требованиям национальных стандартов, а эксперименты проводятся с использованием стандартных методик, на аттестованном оборудовании, что гарантирует воспроизводимость полученных данных.

2. Применяемые в исследовании заполнители характеризуются постоянной гранулометрией и содержанием загрязняющих примесей для снижения их влияния на свойства бетона.

3. В проведенных исследованиях достоверность оценивалась по величине коэффициента вариации менее 5 %, а математические модели оценивались по критериям Фишера и Кохрена.

4. Составы бетона проектировались по методу абсолютных объёмов и корректировались в соответствии с национальными стандартами и рекомендациями к ним.

5. Математическое планирование экспериментов и получаемые математические модели выявляют изменения свойств цементного камня в широком интервале варьируемых факторов.

Глава 3 Структура и свойства цементного камня с добавками модификаторами

Как правило, для получения современного тяжелого бетона применяют модифицирующие добавки, включающие, в том числе, эффективную пуццолану и суперпластификатор, хотя в национальных стандартах нет рекомендаций по применению пуццоланы для бетонов высокой морозостойкости [53, 66, 147, 235]. Необходимо исследовать влияние модифицирующих добавок, как в комплексе, так и по отдельности, на структуру цементного камня, особенно на её стойкость при различных циклических воздействиях. Исследования проводились на образцах цементного камня из теста нормальной плотности.

3.1 Цементный камень с добавками микрокремнезема и поликарбоксилата

Образцы цементного камня, без заполнителей, изготавливались для последующего исследования их структуры с помощью физико-химических методов анализа. Для проведения исследований влияния модификаторов был реализован двухфакторный план эксперимента, в котором значимыми факторами приняты: X_1 – дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора, варьируемая в количестве от 0 до 1 %, и X_2 – дозировка микрокремнезема, в количестве от 0 до 12 %, в расчете на массу цемента.

При проведении эксперимента оценивались следующие характеристики цементного теста: В/В (отношение массы воды к массе цемента с микрокремнеземом) и сроки схватывания. Образцы цементного камня испытывались на прочность при сжатии и водопоглощение. Из этих образцов отбирались фрагменты на физико-химические исследования структуры гидратных фаз. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 10 [134].

Таблица 10 – Варьируемые факторы и свойства цементного теста и камня

№	АСЕ Код x ₁	Содержани е АСЕ, %	МК код x ₂	Содержан ие МК, %	В/В	Сроки схватывания, мин.		Прочность при сжатии, R _{сж} , МПа					Содержание по массе, %		Макро- и микропор истость, %
						Нач.	Кон.	1	3	7	28	56	Ca(OH) ₂	Хим. связ. вода	
1	-1	0	-1	0	0,25	50	120	23,4	49,5	55,1	72,2	111,8	9,13	15,5	16,6
2	-1	0	0	6	0,28	65	150	32,0	50,3	59,4	63,8	65,6	7,02	16,4	24,8
3	-1	0	+1	12	0,3	70	180	24,5	36,0	50,4	63,6	66,9	6,37	16,1	28,5
4	0	0,5	+1	12	0,269	65	171	19,5	49,7	58,6	74,1	80,2	4,93	15,2	19,9
5	+1	1	+1	12	0,243	106	178	34,4	59,9	65,9	88,0	91,5	4,8	13,7	15,9
6	+1	1	0	6	0,215	94	167	28,9	66,0	76,6	87,6	94,0	5,42	14,6	16,1
7	+1	1	-1	0	0,207	80	195	24,8	90,0	109,7	112,5	142,7	7,37	14,1	11,8
8	0	0,5	-1	0	0,214	67	176	40,5	93,5	100,9	107,9	127,4	7,51	15,1	12,0
9	0	0,5	0	6	0,27	83	188	29,8	65,2	65,3	83,4	84,3	5,6	15,9	18,2

Параметры уравнения регрессии, адекватность и равноточность полученной математической модели, при уровне значимости 0,05, для исследованных откликов приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Параметры и критерии уравнений регрессии

Функция математической модели	Коэффициенты уравнений регрессии						Критерий	
	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}	Кохрена	Фишера
Прочность в 1 сут.	34,62	1,42	-2,04	-3,57	-3,63	1,85	0,32	3,68
Прочность в 3 сут.	73,46	13,28	-14,62	-12,57	0,017	-3,76	0,19	1,82
Прочность в 7 сут.	79,6	11,2	-19,6	-7,29	3,36	-4,37	0,27	0,56
Прочность в 28 сут.	78,99	14,75	-9,92	-3,26	8,36	-3,99	0,21	1,08
Прочность в 56 сут.	82,2	13,9	-23,92	-1,55	22,34	-1,66	0,35	0,06
Табличное значение							0,4027	3,86
Водовязущее отношение	0,239	-0,028	0,0235	0,0085	0,0025	-0,0035	0,36	0,157
Начало схватывания	69,5	16,2	7,7	10	-3,5	1	0,41	3,96
Конец схватывания	164	14,5	5,8	-4,5	10,5	-18,5	0,32	0,678
Ca(OH) ₂	15,67	-0,83	0,133	-0,3	-0,25	-0,6	0,24	1,79
Химически связанная вода	15,85	-0,93	0,05	-0,33	-0,68	-0,25	0,18	2,22
Водопоглощение	18,2	-4,53	3,98	2,25	-2,25	-1,95	0,33	0,95
Табличное значение							0,4775	4,26

Так как МК обладает пуццолановыми свойствами и взаимодействует с вторичным гидроксидом кальция, выделяющимся при гидратации C_3S , то его приняли компонентом вяжущего и оценивали водопотребность не по водоцементному, а по водовязущему отношению (см. рисунок 3).

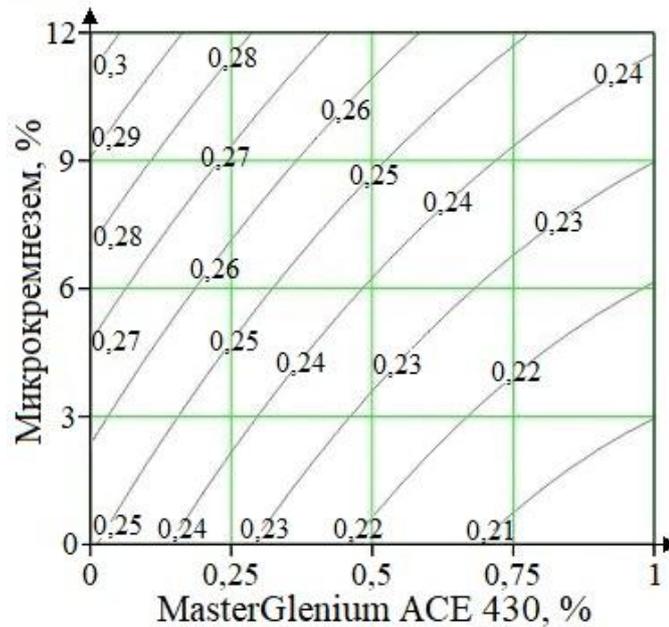


Рисунок 3 – Влияние добавок на величину водовяжущего отношения

Начальная водопотребность бездобавочного цементного теста не изменяется или понижается при пропорциональном введении добавок модификаторов, которое уравнивает разнонаправленное изменение водопотребности. Оптимальное содержание МК в дозировке 8–10 % от массы цемента повышает величину W/B , что компенсируется введением поликарбоксилата в количестве 0,5–0,75 % от массы цемента, а при большем содержании ACE водопотребность снижается с $W/B=0,25$ до $W/B=0,23$ [153].

Поликарбоксилатный суперпластификатор, обладая поверхностно-активными свойствами, замедляет начало схватывания цементного теста, тогда как микрокремнезем не влияет на эту характеристику, см. рисунок 4. Совместное введение добавок в оптимальных количествах вызывает более интенсивное замедление начала схватывания, по сравнению с отдельными модификаторами. Конец схватывания цементного теста, при совместном введении оптимального количества добавок, замедляется на 25–30 % от продолжительности конца схватывания состава без добавок. Этот показатель надо учитывать при тепловлажностной обработке (ТВО) модифицированного бетона, так как с увеличением сроков схватывания нужно удлинять предварительную выдержку железобетонных изделий.

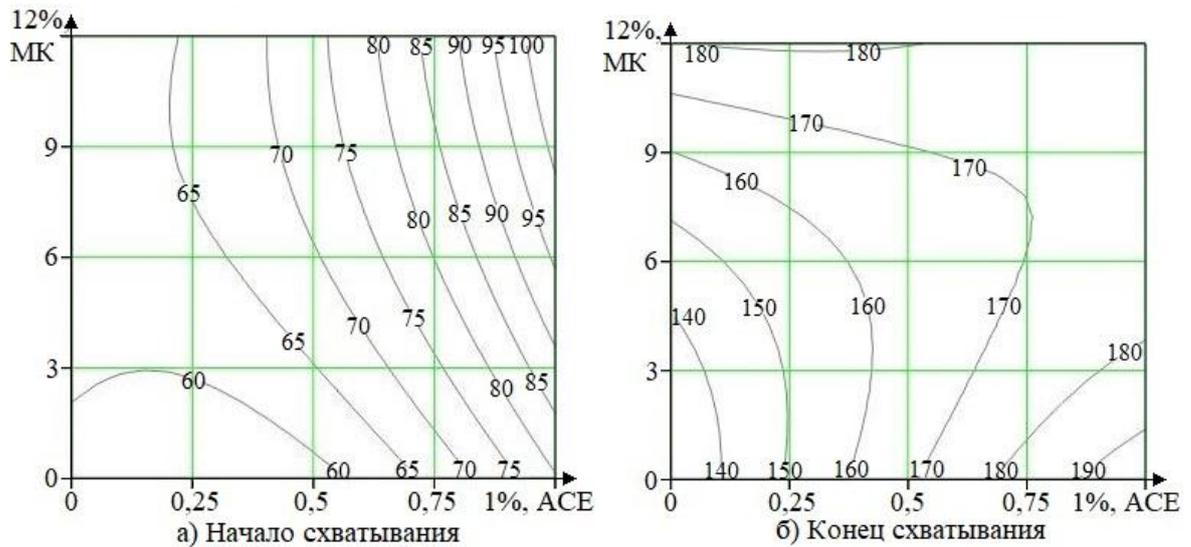


Рисунок 4 – Сроки схватывания цементного теста, минуты

Замедление начала схватывания цементного теста для бетонной смеси является положительным моментом – это повышает сохраняемость её удобоукладываемости и увеличивает дальность транспортировки.

Результаты испытания прочности при сжатии цементного камня, содержащего добавки модификаторы, иллюстрируются рисунком 5.

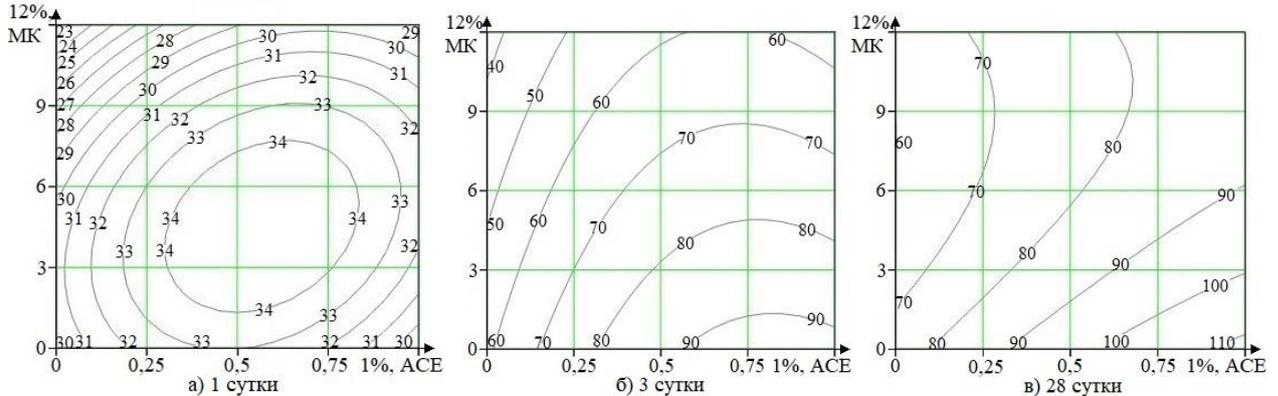


Рисунок 5 – Характер изменения прочности на сжатие образцов цементного камня в зависимости от вводимого количества добавок, МПа

Максимальное значение прочности при сжатии через сутки нормального твердения образцов кубов с ребром 20 мм установлено при содержании ACE в пределах 0,3–0,8 % и МК 1,5–7,5 %. Повышенное содержание добавок модификаторов замедляет набор суточной прочности, несмотря на водоредуцирование, то есть в суточном возрасте набор прочности тормозится

главным образом из-за наличия поверхностно-активной добавки в составе образцов.

В возрасте трех суток набор прочности определяется водоредуцированием – чем больше дозировка АСЕ, тем больше прочность при сжатии. Добавка микрокремнезема увеличивает водопотребность смеси, при изготовлении образцов, что вызывает снижение прочности при введении комплексной добавки.

В 28 суток нормального твердения пуццолановая добавка микрокремнезема более активно способствует повышению прочности, как за счет большей степени гидратации алита, так и вследствие формирования гелеобразных гидросиликатов, типа $C-S-H(I)$. Такое влияние микрокремнезема особенно характерно при оптимальном содержании добавок модификаторов, при котором введение МК в меньшей степени влияет на прочность цементного камня.

Содержание портландита, по данным дериватографического анализа, в цементном камне в возрасте 28 суток снижается каждой добавкой, причем в большей мере за счет пуццоланизации (см. рисунок 6).

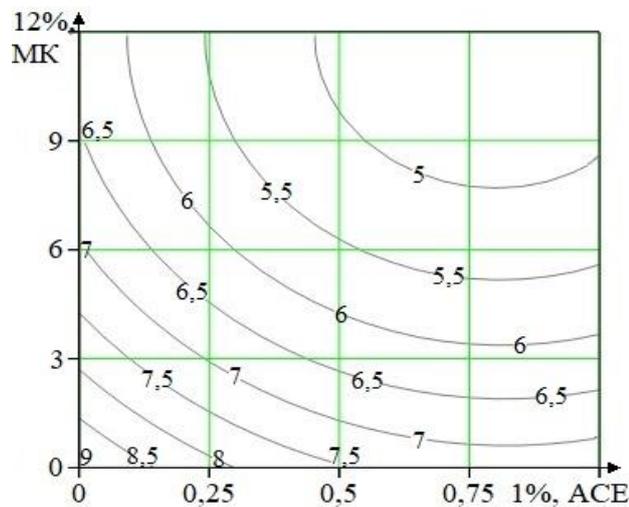


Рисунок 6 – Изменение содержания портландита в цементном камне, %

Добавка микрокремнезема взаимодействует в структуре цементного камня с портландитом, способствуя формированию $C-S-H(I)$ фазы, эта реакция протекает наиболее интенсивно без добавки АСЕ [246]. Поликарбоксилатная добавка также уменьшает содержание портландита в цементном камне, за счет комплексообразования с ионами кальция, но при этом снижает В/В и замедляет

степень гидратации цемента [136, 166, 194, 207]. Максимальное снижение портландита в цементном камне, при совместном введении оптимального количества АСЕ и МК, составляет 4,33 % – с 9,13 % до 4,8 %, такое снижение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не приводит к ухудшению защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре [191]. Из литературных источников известно, что до тех пор, пока не прореагировал весь портландит в цементном камне, бетон не теряет защитных свойств по отношению к стальной арматуре [1, 2]. Полученные данные по количеству $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне подтверждаются Х. Тейлором, который проводил исследования структуры цементного камня, модифицированного микрокремнеземом при низких значениях В/В, в разном возрасте [108].

Прочность цементного камня в возрасте до трёх суток зависит, главным образом, от степени гидратации алита [81]. Данные о степени гидратации алита в возрасте 28 суток нормального твердения цементного камня, полученные с использованием метода внутреннего стандарта, приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Степень гидратации C_3S в цементном камне с модифицирующими добавками

Модификаторы	Оценка степени гидратации C_3S в цементном камне (по дифракционному максимуму $d/n=1,77$)
Без добавок	67 %
1 % АСЕ	63 %
12 % МК	92 %
1 % АСЕ + 12 % МК	84 %
1 % АСЕ + 6 % МК	80 %

Микрокремнезем, взаимодействуя с портландитом, способствует гидратации алита, что приводит к повышению степени гидратации от 67 % до 92 %. При введении добавки суперпластификатора гидратация алита замедляется до 63 %, а совместное введение АСЕ с активной пуццолоной нивелирует этот

эффект и повышает степень гидратации до 84 %. То есть, этот комплекс добавок проявляет свойства ускорителя твердения цемента.

Кинетика прироста прочности цементного камня и прочность в определенном возрасте являются функцией фазового состава гидратных новообразований цемента. По данным РФА фазовый состав продуктов гидратации через 28 суток нормального твердения, в присутствии различных модификаторов, приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Фазовый состав продуктов гидратации цементного камня

Гидратная фаза Модификатор	Ca(OH) ₂	C-S-H(I)	C-S-H(II)	C ₃ S	β-C ₂ S	Гидрогранаты Ca ₃ [SiO ₄][Al(OH) _{6-2x}] ₂
Без добавок	+	+	+	+	+	–
АСЕ 1 %	+	+	++	+	+	–
МК 12 %	+	++	+	+	+	+
АСЕ 1 % + МК 12 %	+	++	+	+	+	+

Наиболее характерные отражения межплоскостных расстояний гидратных фаз цементного камня, по данным РФА, представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Дифракционные характеристики продуктов гидратации

Гидратная фаза	Межплоскостные расстояния, d/n, нм
Ca(OH) ₂	0,493; 0,263; 0,193; 0,179; 0,169; 0,1485
C-S-H(I)	1,25; 0,28; 0,183
C-S-H(II)	9,8; 0,307; 0,285; 0,28
C ₃ AH ₆	0,514; 0,282; 0,230; 0,223; 0,204; 0,141
C ₃ S	0,3034; 0,2776; 0,2608
β-C ₂ S	0,277; 0,2609; 0,2184

Рентгенограммы цементного камня, модифицированного различными добавками, в возрасте 28 суток представлены на рисунках 7–10.

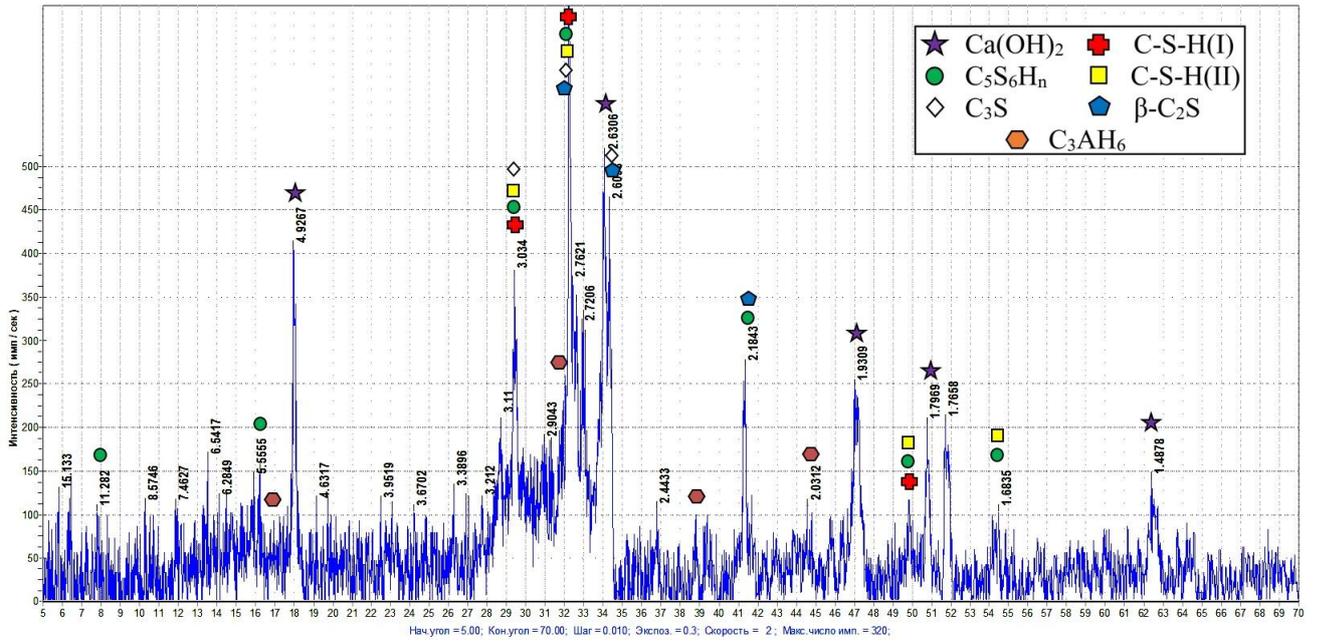


Рисунок 7 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня без добавок

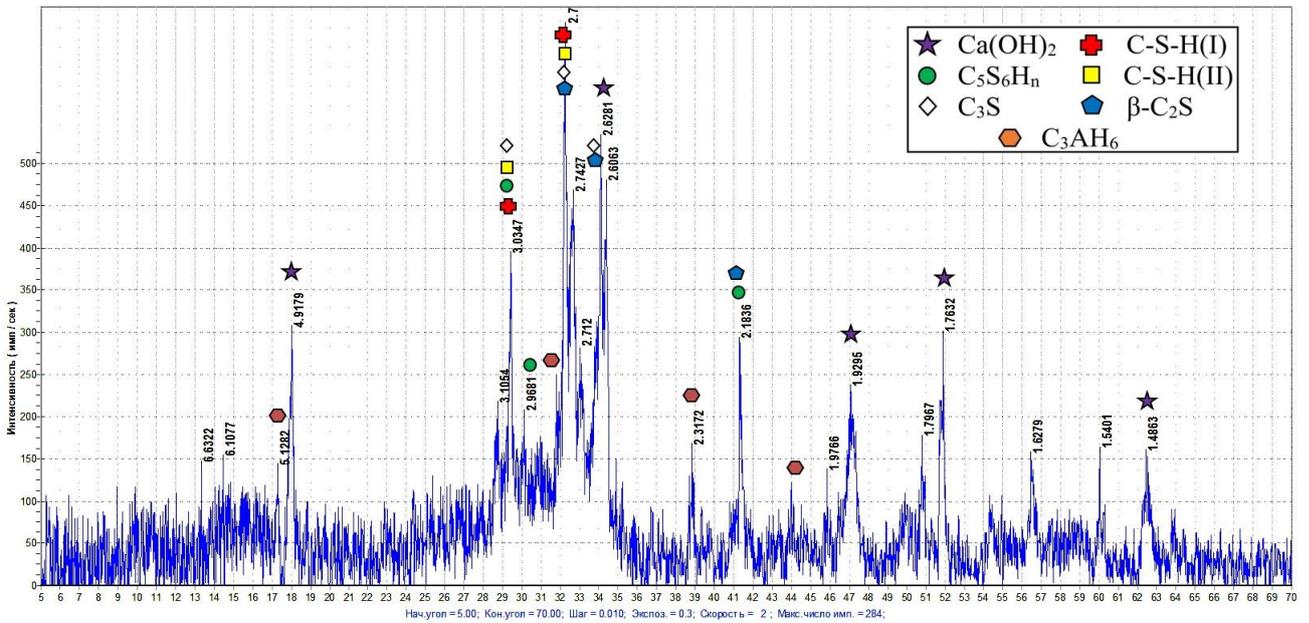


Рисунок 8 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня с 1 % добавки ACE

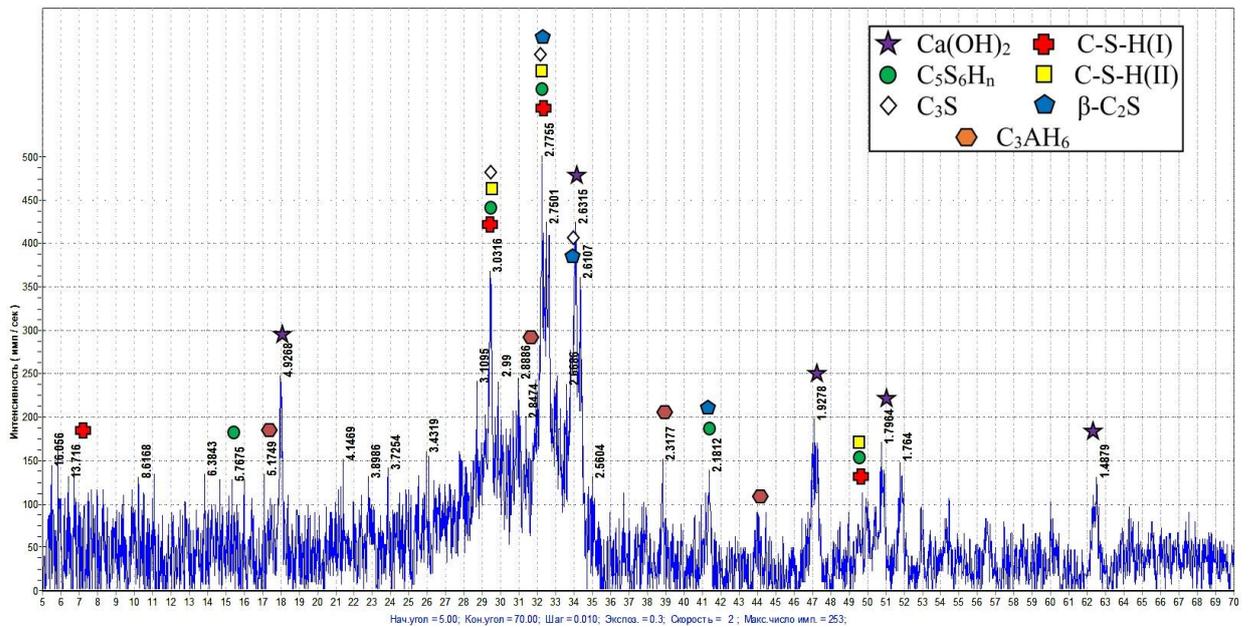


Рисунок 9 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня с 12 % добавки МК

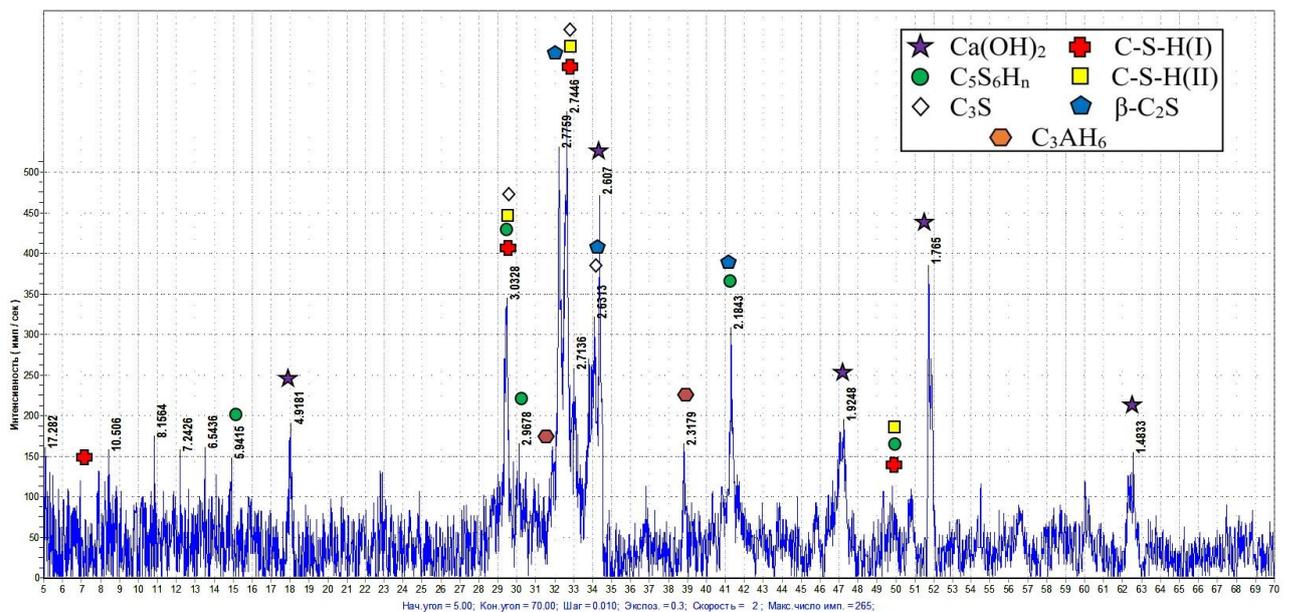


Рисунок 10 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня с 1 % добавки АСЕ и 12 % МК

Из рентгенофазового исследования следует, что введение добавки АСЕ снижает содержание портландита в цементном камне, что коррелирует с результатами термического анализа. Преобладающей гидросиликатной фазой цементного камня с АСЕ является высокоосновная слабоакристаллизованная фаза, типа С–S–Н(II). Остальные гидратные фазы аморфизированы.

Модифицированный добавкой микрокремнезема цементный камень формируется в основном из низкоосновных гидросиликатов. В небольшом количестве отмечаются отражения, характерные для гидрогранатов ($d/n=0,272$ и $0,28$ нм).

Совместное введение пластифицирующей и пуццолановой добавки – $0,8-1\%$ АСЕ и $8-12\%$ МК, способствуют формированию в цементном камне небольшого количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а гидросиликаты представлены в основном С–S–Н(І) фазой, фиксируются также отражения гидроалюминатов кальция, гидросульфалюминатов кальция и негидратированные остатки клинкерных минералов. Комплексная добавка АСЕ и МК способствует формированию гелеобразных гидросиликатных фаз, разной степени основности, причем степень их аморфизации выше, чем при раздельном применении добавок.

Для уточнения имеющихся данных, с помощью сканирующего электронного микроскопа с рентгеновским микроанализатором, были проведены исследования структуры цементного камня с различными добавками.

Фотография микроструктуры (увеличение в 2 000 раз) цементного камня без добавок, представлена на рисунке 11.

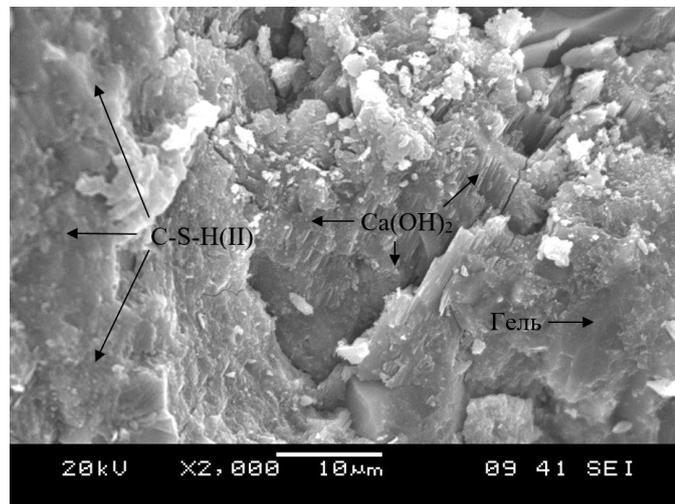


Рисунок 11 – Снимок поверхности скола цементного камня без добавок в возрасте 28 суток

На поверхности скола видны хорошо сформировавшиеся кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$, слабозакристаллизованные массы из гидросиликатов кальция, типа С–S–

H(II), которые по данным рентгеновского микроанализатора имеют повышенную основность – $C/S \geq 1,5$, и участки гелеподобной мелкокристаллической массы.

Цементный камень, модифицированный добавкой МК (см. рисунок 12), отличается плотной поверхностью с раковисто-заноцистым изломом, содержанием свободного гидроксида кальция – 6,5 % и состоит в основном из низкоосновных гидросиликатов кальция – C-S-H(I) фазы.

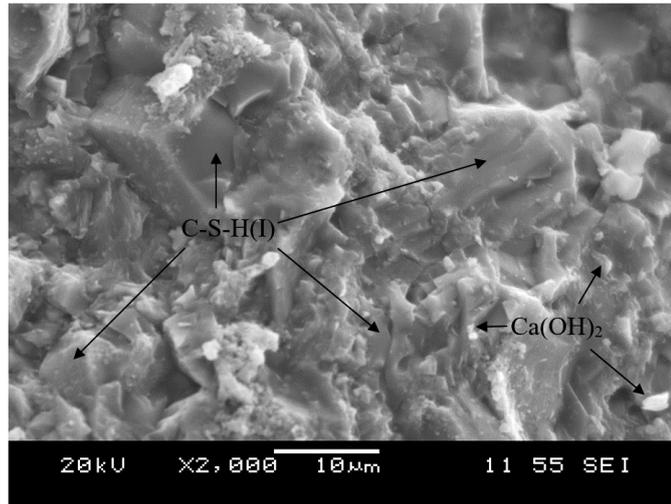


Рисунок 12 – Микрофотография цементного камня, модифицированного введением 12 % МК

Микроструктура цементного камня, модифицированного введением поликарбоксилатного суперпластификатора, представлена гелеобразными высокоосновными гидросиликатными фазами типа C-S-H(II) с $C/S \geq 1,5$ (см. рисунок 13), что подтверждается данными рентгеновского микроанализатора.

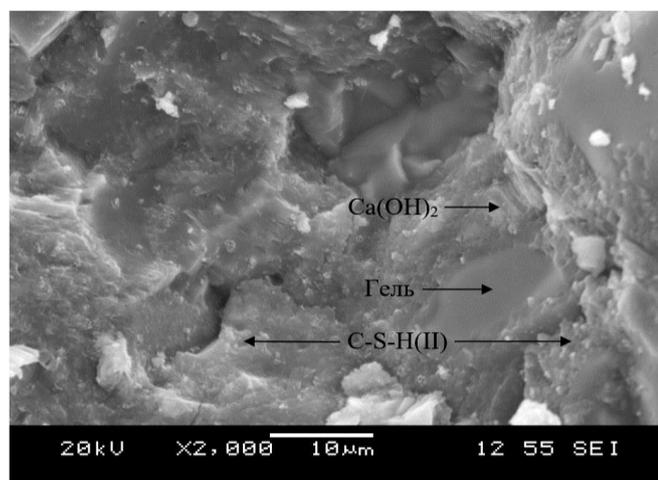


Рисунок 13 – Электронная микрофотография цементного камня с добавкой 1 % ACE

Гидроксид кальция распределяется в цементном камне в виде небольших участков, в большинстве случаев, расположенных между гидросиликатными составляющими.

На поверхности скола цементного камня (см. рисунок 14), модифицированного добавками АСЕ и МК, видны области слабозакристаллизованной гелеподобной С–S–Н(I) фазы с отношением $C/S=1,1-1,3$ и наблюдаются отдельные включения гидроксида кальция, при общем содержании его не более 5 %.

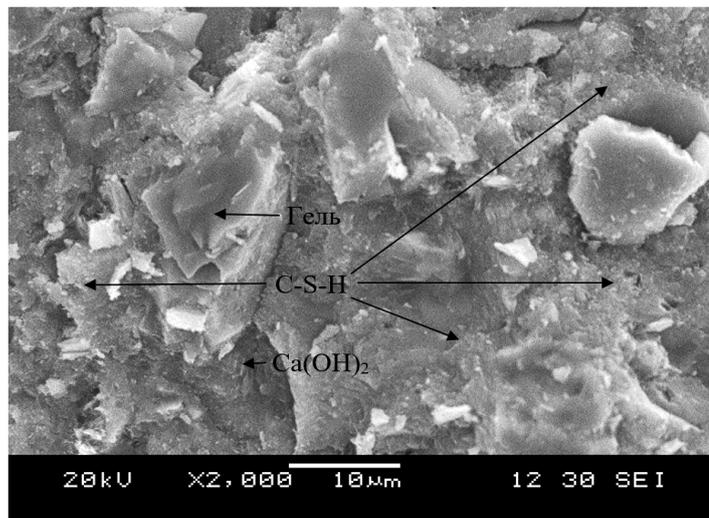


Рисунок 14 – Микрофотография структуры цементного камня при введении 1 % АСЕ и 12 % МК

При введении добавок АСЕ+МК структура цементного камня формируется преимущественно из слабозакристаллизованных гидратных фаз пластинчатой формы, типа С–S–Н(I), что приводит к повышению его плотности и прочности.

Удельная поверхность образцов цементного камня (см. рисунок 15) испытывалась в возрасте 28 суток по методу Брунауэра-Эммета-Теллера [37]. Установлено, что добавки АСЕ и МК способствуют увеличению удельной поверхности продуктов гидратации, соответственно, большей степени аморфизации структуры.

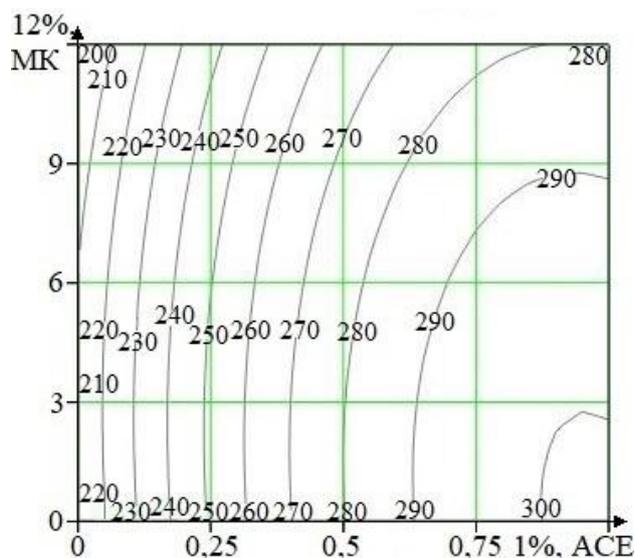


Рисунок 15 – Величина удельной
поверхности цементного камня, м²/г

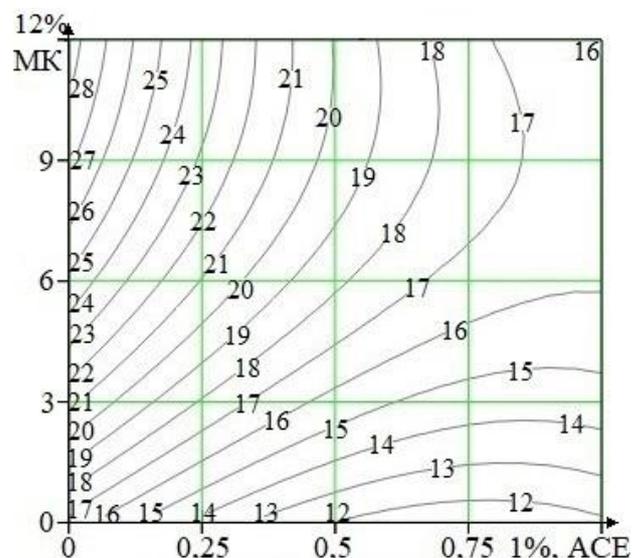


Рисунок 16 – Макро- и
микропористость цементного камня, %

Добавки модификаторы, при совместном введении в цементный камень, с увеличением дозировки снижают микро- и макропористость до 16–17 % (см. рисунок 16), причем ACE оказывает большее влияние за счет водоредуцирования.

Таким образом, по совокупности всех параметров, установлено, что модифицирующего эффекта каждой из добавок по отдельности недостаточно. Максимальный эффект, выражающийся в направленном формировании слабозакристаллизованных низкоосновных гидросиликатов кальция, с минимальным количеством портландита около 5 %, достигается при совместном использовании добавок в дозировке 1 % ACE и 8–12 % МК.

3.2 Структура цементного камня с добавками СП-1 и МК

Из научных публикаций известно, что применение нафталинформальдегидного модификатора обеспечивает пластифицирующий эффект, но не влияет на структуру гидратных фаз цементного камня [48, 152]. Для сравнительных испытаний с поликарбоксилатным суперпластификатором

были проведены исследования влияния добавки СП-1 и СП-1+МК на свойства и микроструктуру гидратных фаз цементного камня.

Наибольшая прочность образцов кубов цементного камня с ребром 20 мм в возрасте 28 суток нормального твердения достигается при использовании добавки АСЕ и АСЕ+МК, а при введении СП-1 и СП-1+МК прочность образцов на 18–20 % меньше, см. таблицу 15.

Таблица 15 – Прочностные характеристики образцов цементного камня

Модификаторы	В/Ц	Открытая пористость, %	Прочность при сжатии, МПа			
			1 сут.	2 сут.	7 сут.	28 сут.
1 % АСЕ 430	0,230	9,4	38,4	66,5	78,3	106
1 % СП-1	0,240	9,88	46,7	66,2	76,6	82,5
1 % АСЕ + 10 % МК	0,265	8,66	39,3	67,6	74,4	110
1 % СП-1 + 10 % МК	0,265	9,14	24,9	44,3	61,2	85

Открытая капиллярная пористость образцов цементного камня определялась по величине водопоглощения. Применение СП-1 вместо АСЕ приводит к повышению пористости как за счет меньшего водоредуцирования, так и при постоянном В/Ц. При совместном введении пластификаторов и микрокремнезема, несмотря на большую величину В/Ц, значение открытой пористости снижается, по-видимому, за счет формирования более плотных гидратных фаз.

Добавка СП-1 практически не влияет на состав гидратных фаз цементного камня (см. рисунок 17), а введение её совместно с микрокремнеземом способствует образованию слабозакристаллизованных гидросиликатных структур, преимущественно типа С–S–Н(І) (см. рисунок 18).

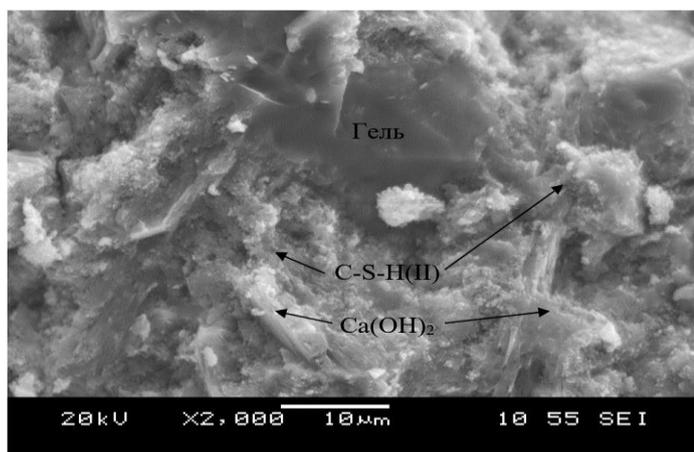


Рисунок 17 – Электронная микроскопия цементного камня при введении СП-1

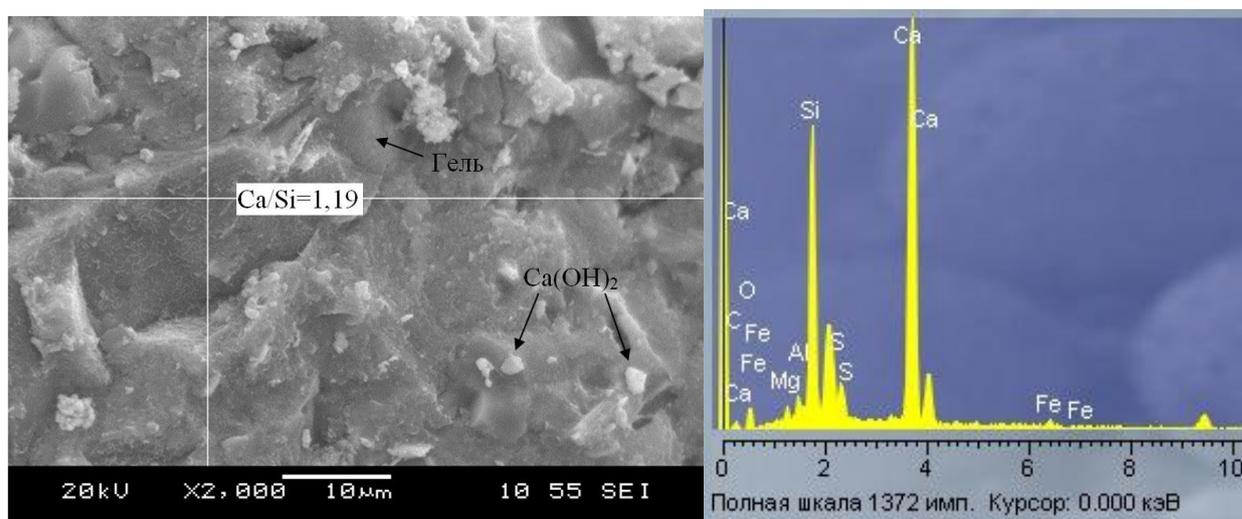


Рисунок 18 – Микроструктура цементного камня с добавками СП-1 и микрокремнезема, а также графическое отображение результатов рентгеновского анализа в области перекрестия

Прочностные характеристики цементного камня с СП-1 в 28 суток меньше, чем с добавкой АСЕ. СП-1 с микрокремнеземом способствуют формированию низкоосновных гидросиликатов кальция, которые характеризуются большей величиной открытой пористости и меньшей прочности, чем образцы с АСЕ и МК.

3.3 Влияние модификаторов на экзотермию гидратации цемента

Влияние добавок модификаторов на ранней стадии гидратации цемента характеризуется тепловыми эффектами, величина которых зависит от поверхностных явлений, влияющих на скорость смачивания. Поверхностно-активные добавки модификаторы замедляют процессы схватывания и тепловыделения. Для количественной оценки тепловых эффектов применялись пробы вяжущего, затворенные водой до $V/B=0,3$, массой 12 грамм. Продолжительность испытания составила семь суток, но интенсивное тепловыделение отмечалось до 12 часов, то есть в течение сроков схватывания вяжущих систем, полученные данные показаны на рисунке 19.

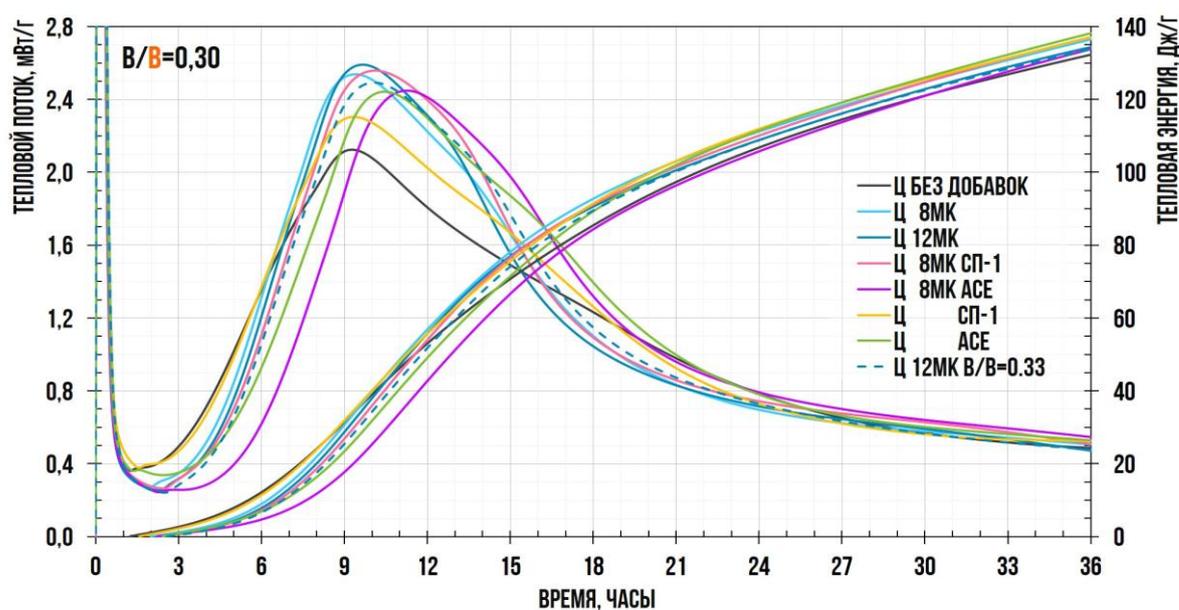


Рисунок 19 – Данные измерения теплового потока и тепловой энергии образцов цементного теста с добавками

В начальный период проведения испытания происходит термостатирование образцов в приборе до температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В дальнейшем начинаются процессы схватывания вяжущего, связанные с гидратацией цемента. Наибольшая экзотермия фиксируется для всех испытанных образцов через 8–10 часов после затворения вяжущего водой. Для образца без добавок характерно наименьшее значение величины теплового потока. Максимум тепловыделения отмечается для

образцов с добавкой микрокремнезема, причем при дозировке 12 % МК значение теплового эффекта больше, но наступает позднее, чем при дозировке 8 %. Введение добавки СП-1 в количестве 1 % совместно с 8 % МК не изменяет величину пика теплового потока, но замедляет его по времени наступления. Присутствие поликарбоксилатного пластификатора незначительно замедляет максимальное тепловыделение. Увеличение В/В с 0,3 до 0,33 в присутствии 12 % МК уменьшает величину теплового потока и замедляет наступление его максимума на один час.

Наибольшее накопление тепловой энергии за 36 часов отмечается при модифицировании поликарбоксилатным пластификатором и превышает этот показатель для образцов с минимальной экзотермией – без добавок, на 10 Дж/г. Эти данные могут свидетельствовать об увеличении степени гидратации цемента.

В таблице 16 приведено распределение образцов с различными модификаторами по времени появления пика теплового эффекта и количеству выделенного тепла.

Таблица 16 – Распределение калориметрических результатов от максимального к минимальному

№	По количеству выделяемого тепла	По времени появления пика теплового эффекта
1	Ц+12 %МК	Ц без добавок
2	Ц+8 %МК+1%СП-1	Ц+1 %СП-1
3	Ц+8 %МК	Ц+8 %МК
4	Ц+12 %МК В/В=0,33	Ц+12 %МК
5	Ц+8 %МК+АСЕ	Ц+8 %МК+1 %СП-1
6	Ц+1 %АСЕ	Ц+12 %МК В/В=0,33
7	Ц+1 %СП-1	Ц+1 %АСЕ
8	Ц без добавок	Ц+8 %МК+АСЕ

Таким образом, наибольшие явления тепловыделения происходят в период схватывания цементного теста. Введение добавок модификаторов способствует

увеличению пика тепловыделения, но замедляет его возникновение по времени, по сравнению с образцом без добавок. Поликарбоксилатный пластификатор значительно замедляет время достижения максимума экзотермического эффекта, чем введение микрокремнезема или нафталинформальдегидного пластификатора. Микрокремнезем в дозировках 8–10 % от массы цемента оказывает большее влияние, чем добавки пластификаторы, на величину теплового эффекта.

3.4 Стойкость модифицированного цементного камня к циклическим воздействиям

Для оценки стойкости цементного камня к циклическому замораживанию и оттаиванию, а также увлажнению и высушиванию, испытывались образцы цементного камня с добавками модификаторами из теста нормальной плотности в возрасте 28 суток. За характеристику стойкости цементного камня были приняты значения потери прочности после 50 циклов испытаний, а также изменение массы и степень разрушения образцов. Испытанию подвергались четыре серии из 30 образцов каждая, которые изготавливались при введении одних пластификаторов и в комплексе с микрокремнеземом, коэффициент вариации их прочности на сжатие был менее 11,4 %. Значения прочностных характеристик образцов цементного камня показаны в таблице 17.

Таблица 17 – Влияние модификаторов и циклических испытаний на прочность цементного камня

Модификатор	В/Ц	Контрольные значения		Циклическое замораживание		Циклическое увлажнение	
		МПа	%	МПа	%	МПа	%
1 % АСЕ	0,230	113,0	100	87,1	77	63,4	56
1 % СП-1	0,240	101		76,8	76	54,5	54
1 %АСЕ+10 %МК	0,265	93,3		86,6	92	80,5	86
1 %СП+10 %МК	0,265	89,5		74,5	83	74,1	83

Наименьшее падение прочности выявлено после циклических испытаний образцов модифицированных совместно АСЕ и МК, а наибольшее снижение прочности отмечено для образцов с добавкой СП-1. По интенсивности воздействия 50 циклов увлажнения и высушивания более агрессивны и снижают прочность на 46 %, а замораживание и оттаивание – на 24 %. При охлаждении образцов цементного камня до температуры минус 20 °С по данным ряда авторов льдообразования не происходит, а причинами их деструкции могут быть деформации при изменении температуры и влажности, а также растворение портландита (коррозия I вида) [112, 177, 199]. Добавка микрокремнезема уменьшает содержание портландита в цементном камне и увеличивает количество слабозакристаллизованных гидросиликатов, что, вероятно, повышает релаксацию напряжений и его плотность. Фотографии образцов цементного камня после 50 циклов увлажнения и высушивания, а также замораживания и оттаивания приведены на рисунках 20–23.



Рисунок 20 – Фотографии образцов цементного камня с добавками АСЕ и СП-1 после циклического увлажнения и высушивания



Рисунок 21 – Фотографии образцов цементного камня с добавками АСЕ+МК и СП-1+МК после циклического увлажнения и высушивания



Рисунок 22 – Фотографии образцов цементного камня с добавками АСЕ и СП-1 после циклического замораживания и оттаивания



Рисунок 23 – Фотографии образцов цементного камня с добавками АСЕ+МК и СП-1+МК после циклического замораживания и оттаивания

При проведении циклического увлажнения и высушивания образцы с добавкой СП-1 после 50 циклов полностью разрушились, а с добавкой АСЕ деструкция проявляется в виде полного или частичного разрушения (см. рисунок 20). Но только при совместном введении водоредуцирующих добавок с микрокремнеземом обеспечивается сохранность образцов при циклических воздействиях (см. рисунок 21 и 23).

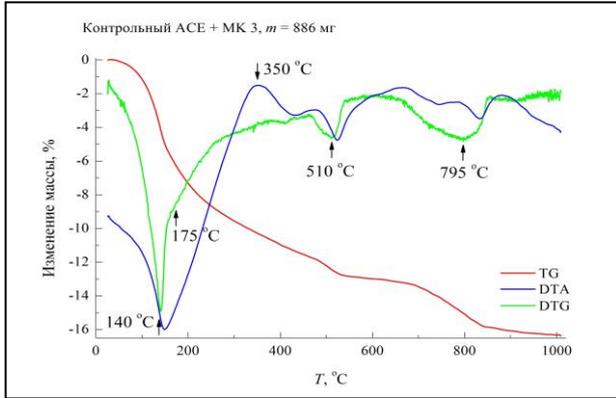
По данным дифференциально-термического анализа определили количество адсорбционной влаги и портландита образцов после циклических воздействий – результаты приведены в таблице 18 и на рисунке 24.

Таблица 18 – Данные термоанализа цементного камня после циклических воздействий

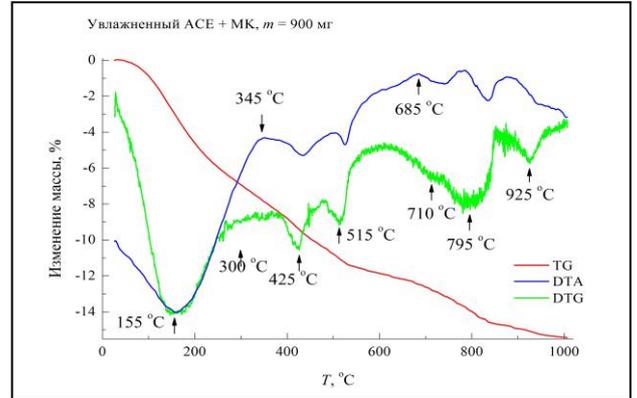
Модификатор	Потеря адсорбционной влаги после нагрева до 200 °С, %	Портландит, %
Цементный камень без циклических воздействий		
1 % АСЕ	6,5	7,2
1 % СП-1	6,3	9,1
1 % АСЕ+10 % МК	7,3	4,2
1 % СП-1+10 % МК	7,3	5,7
Цементный камень после увлажнения и высушивания		
1 % АСЕ	4,6	6,9
1 % СП-1	3,8	8,9
1 % АСЕ+10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

По данным о содержании адсорбционной влаги в цементном камне можно оценить степень закристаллизованности гидратных фаз – чем выше дисперсность гидратов, тем больше их удельная поверхность и содержание адсорбированных молекул воды [37]. По изменению при циклических воздействиях содержания в цементном камне адсорбционной влаги и портландита выявляется сохраняемость гидратных фаз. Таким образом, установлено, что циклическое увлажнение и высушивание оказывает более агрессивное воздействие, чем замораживание и оттаивание по принятым режимам. Формируемая при введении поликарбоксилатного пластификатора и микрокремнезема структура гидратных фаз цементного камня претерпевает минимальные изменения. Следовательно,

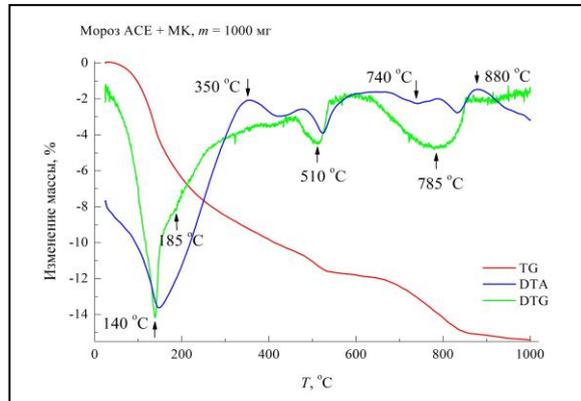
пуццоланизация является одним из надежных приёмов повышения стойкости при циклических воздействиях.



а) цементный камень без циклических воздействий



б) цементный камень после увлажнения и высушивания



в) цементный камень после замораживания и оттаивания

Рисунок 24 – Дериватография цементного камня с 1 %АСЕ+10 %МК

Рентгенограммы образцов цементного камня с различными модификаторами приведены на рисунках 25–36.

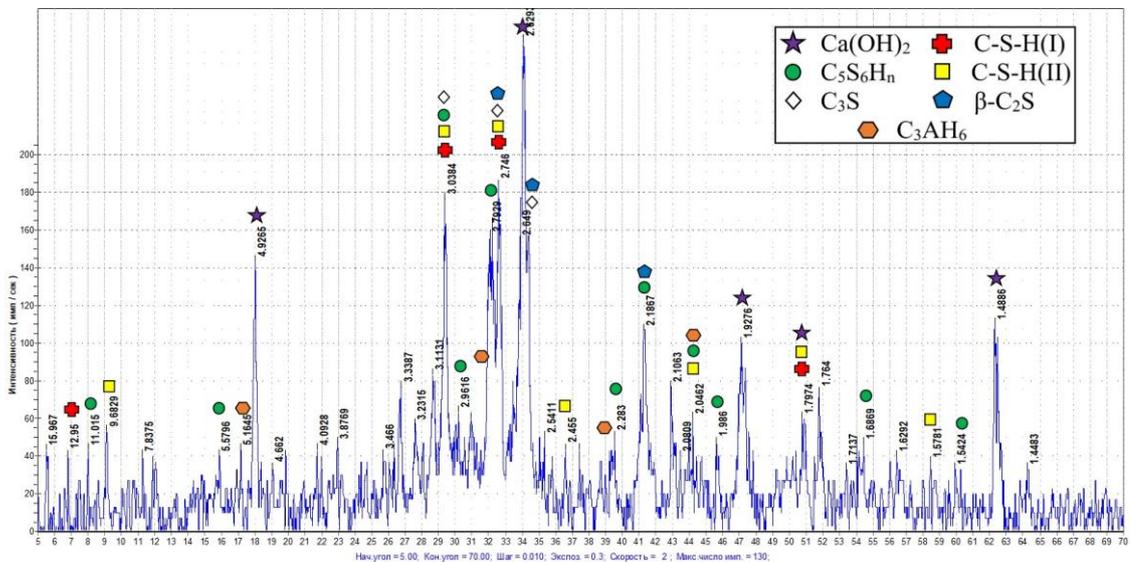


Рисунок 25 – РФА контрольного образца цементного камня с АСЕ

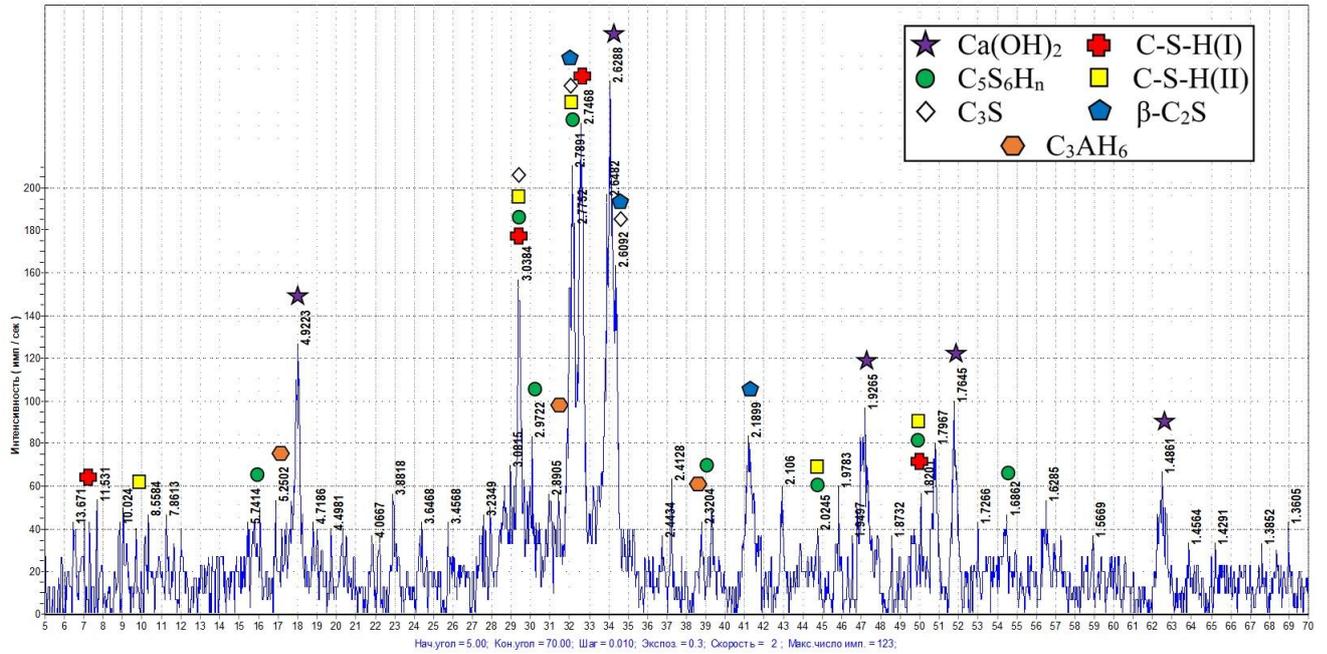


Рисунок 26 – РФА контрольного образца цементного камня с СП-1

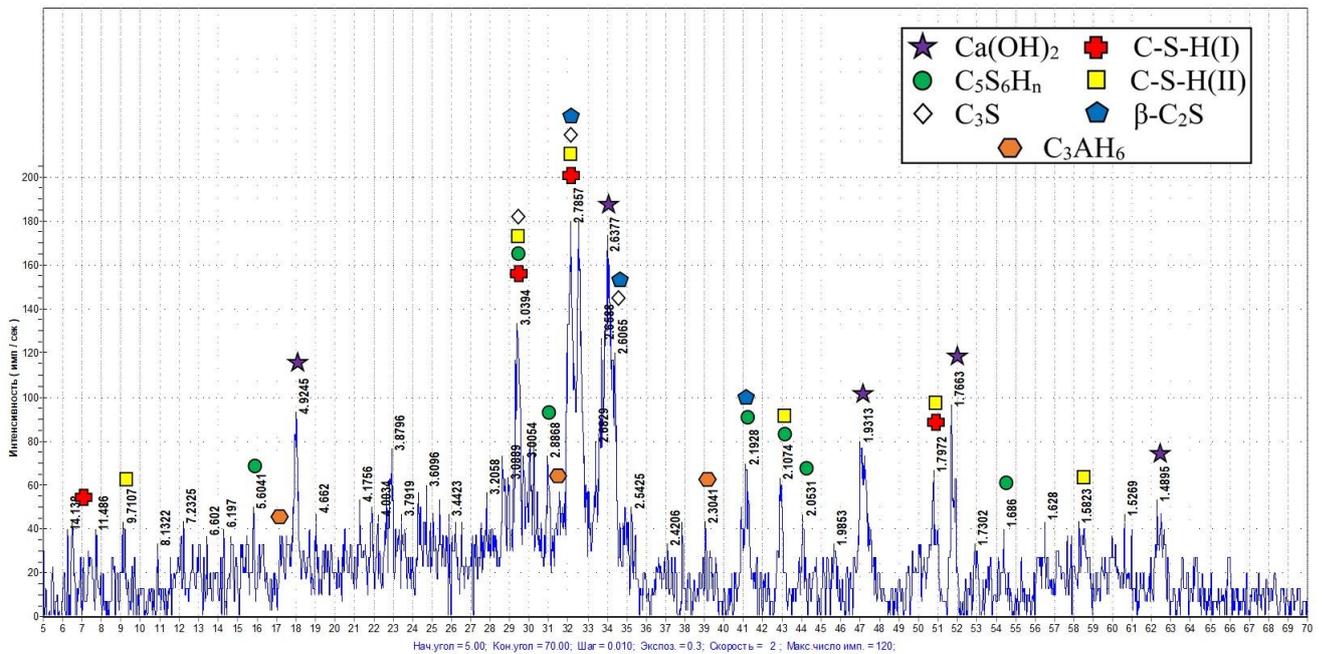


Рисунок 27 – РФА контрольного образца цементного камня с АСЕ и МК

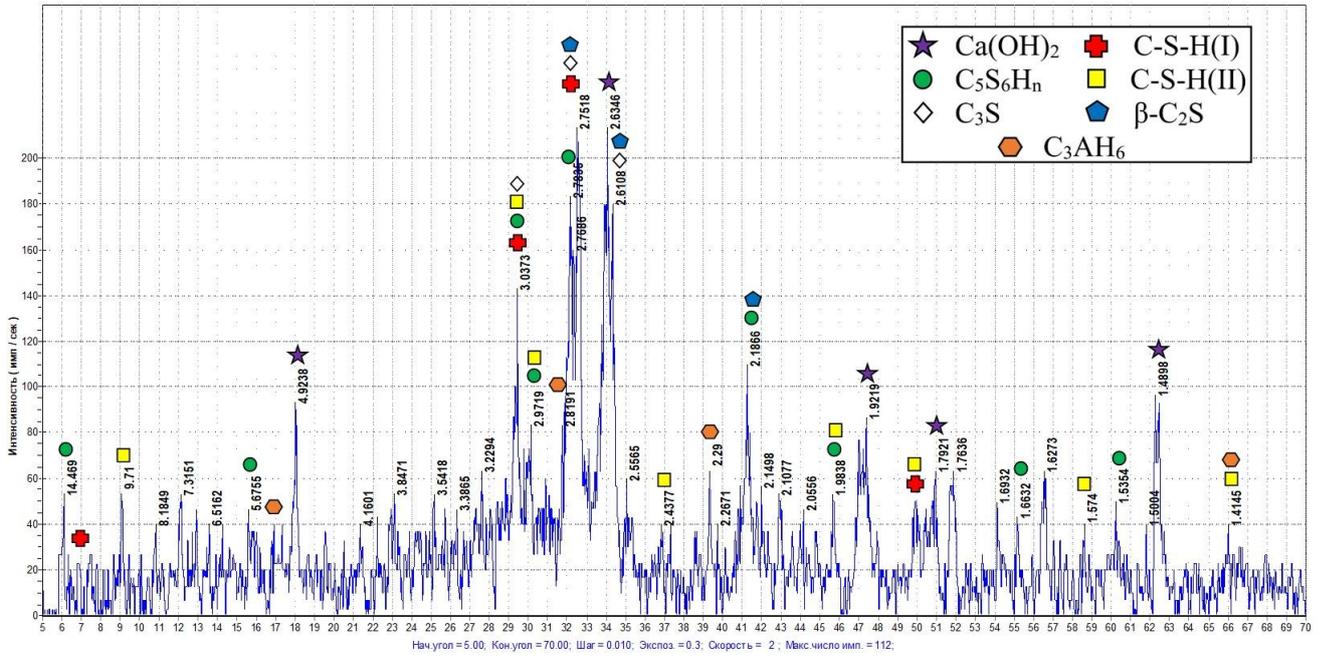


Рисунок 28 – РФА контрольного образца цементного камня с СП-1 и МК

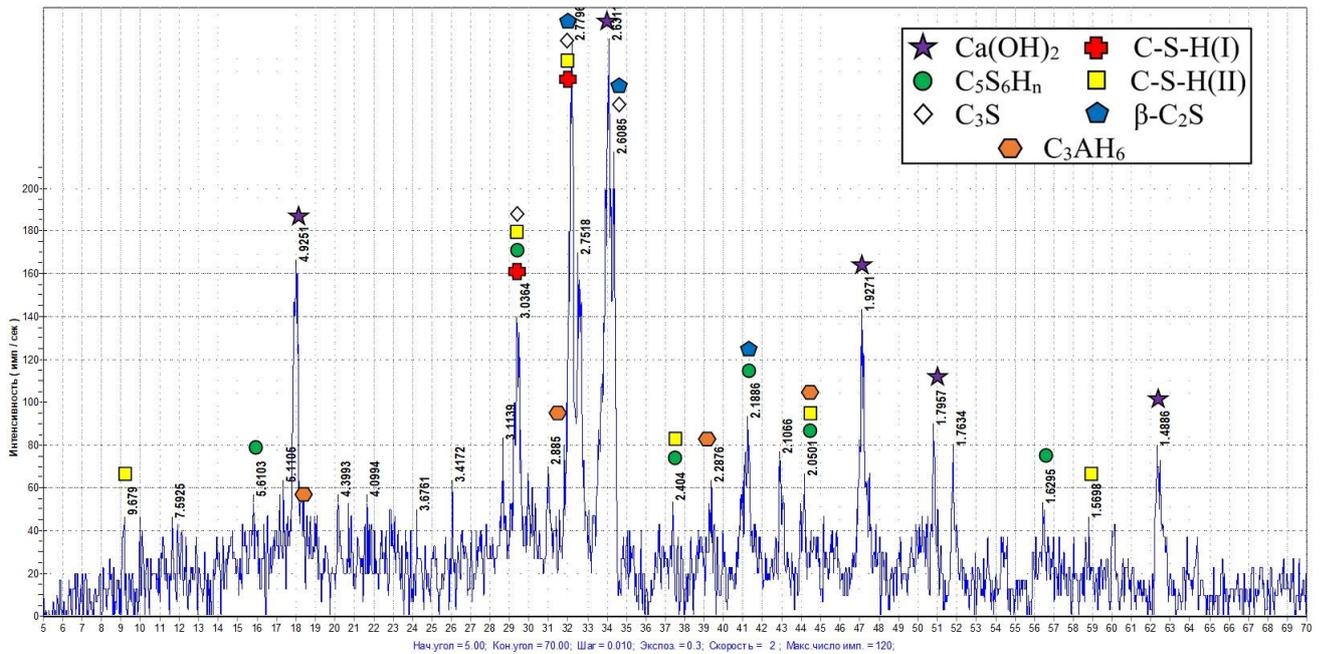


Рисунок 29 – РФА после 50 циклов замораживания образца цементного камня с ACE

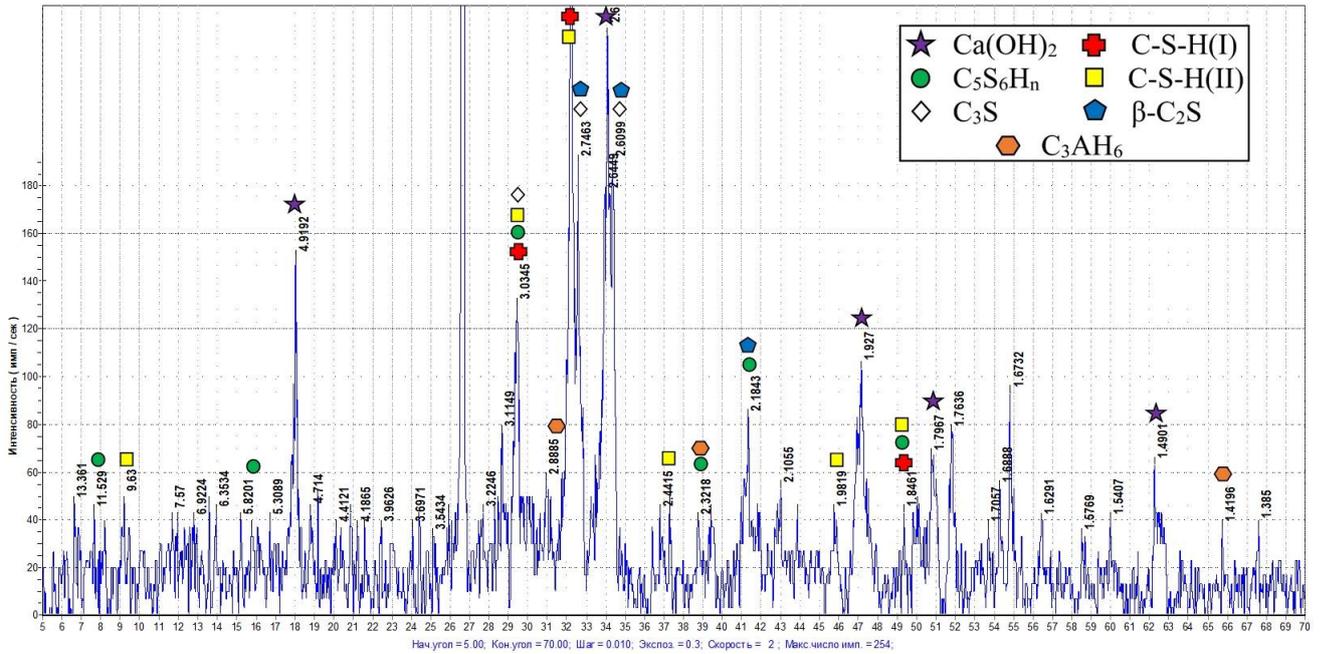


Рисунок 30 – РФА после 50 циклов замораживания образца цементного камня с СП-1

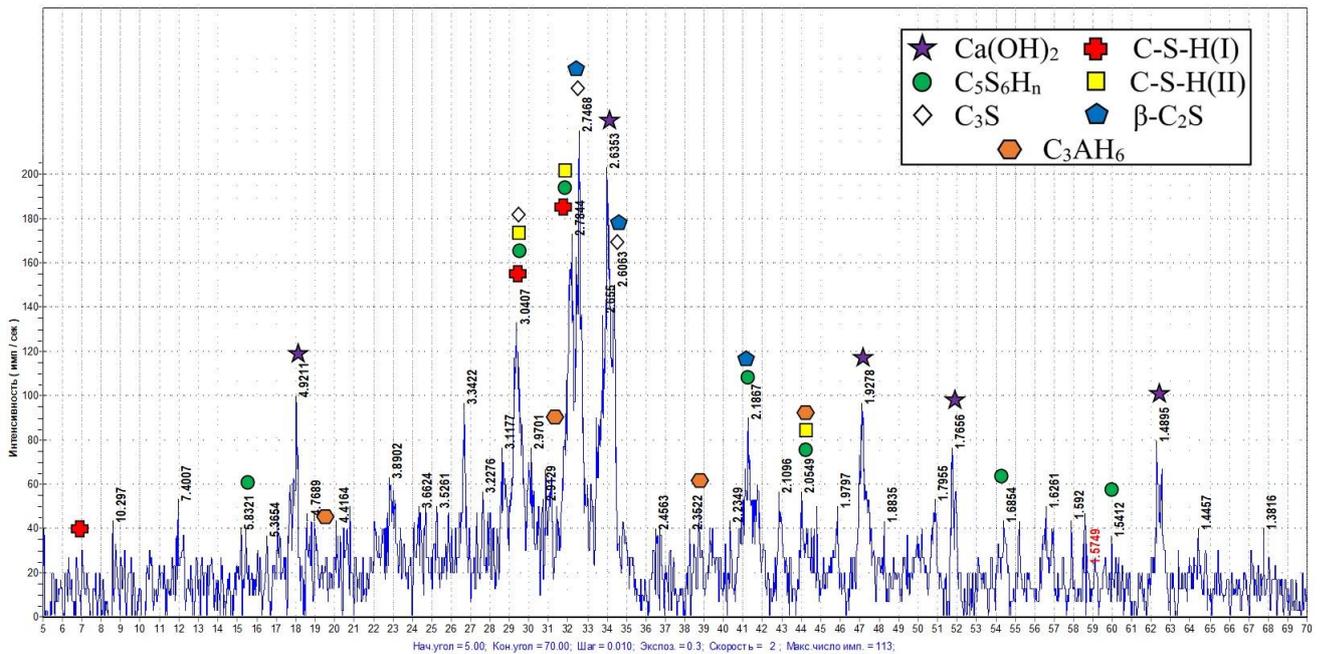


Рисунок 31 – РФА после 50 циклов замораживания образца цементного камня с АСЕ и МК

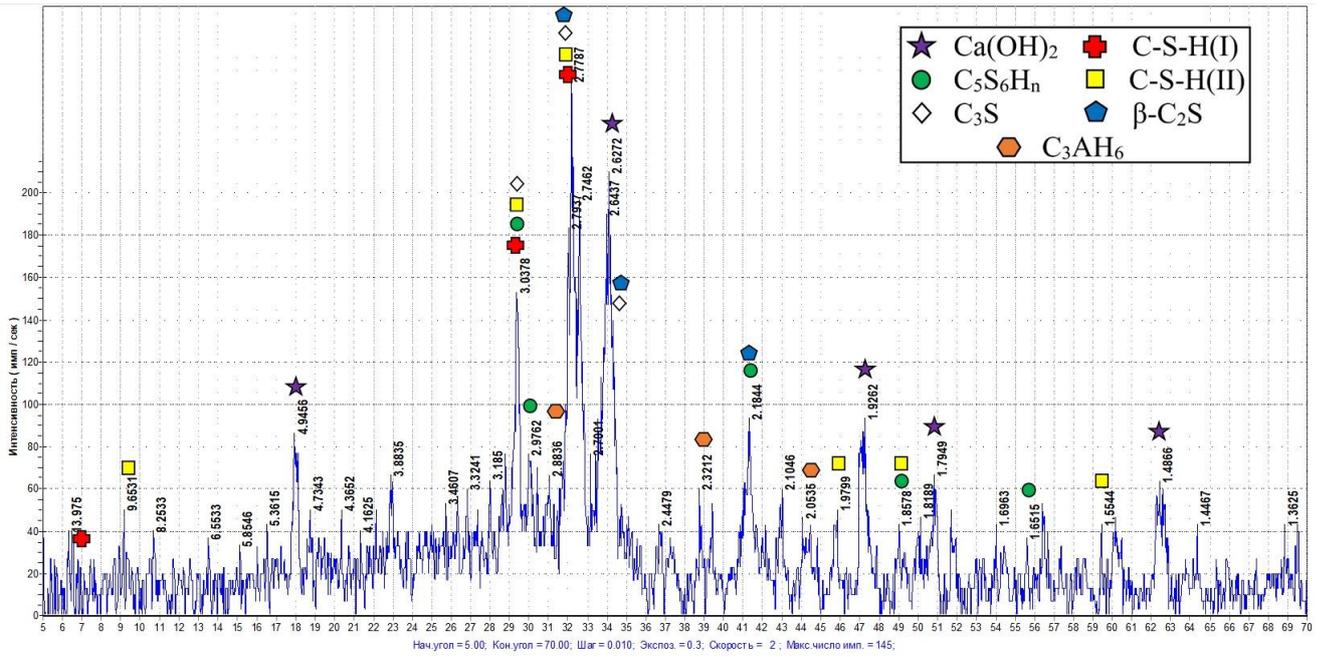


Рисунок 32 – РФА после 50 циклов замораживания образца цементного камня с СП-1 и МК

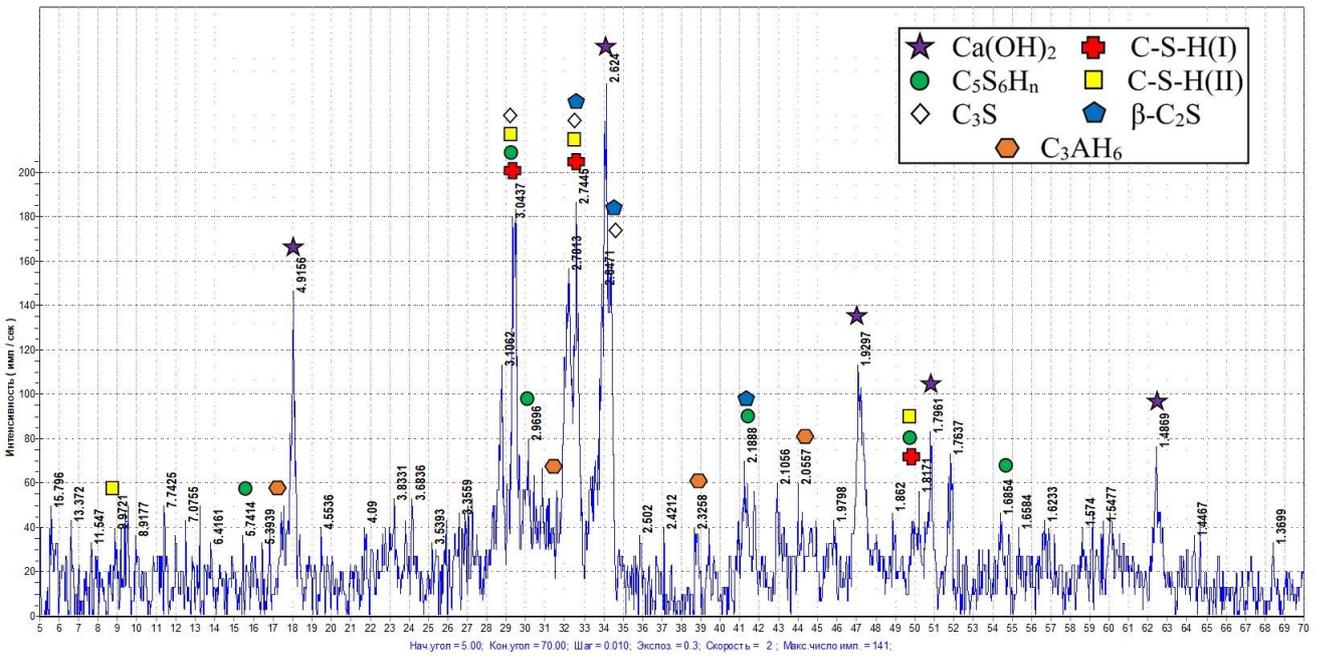


Рисунок 33 – РФА после 50 циклов увлажнения образца цементного камня с АСЕ

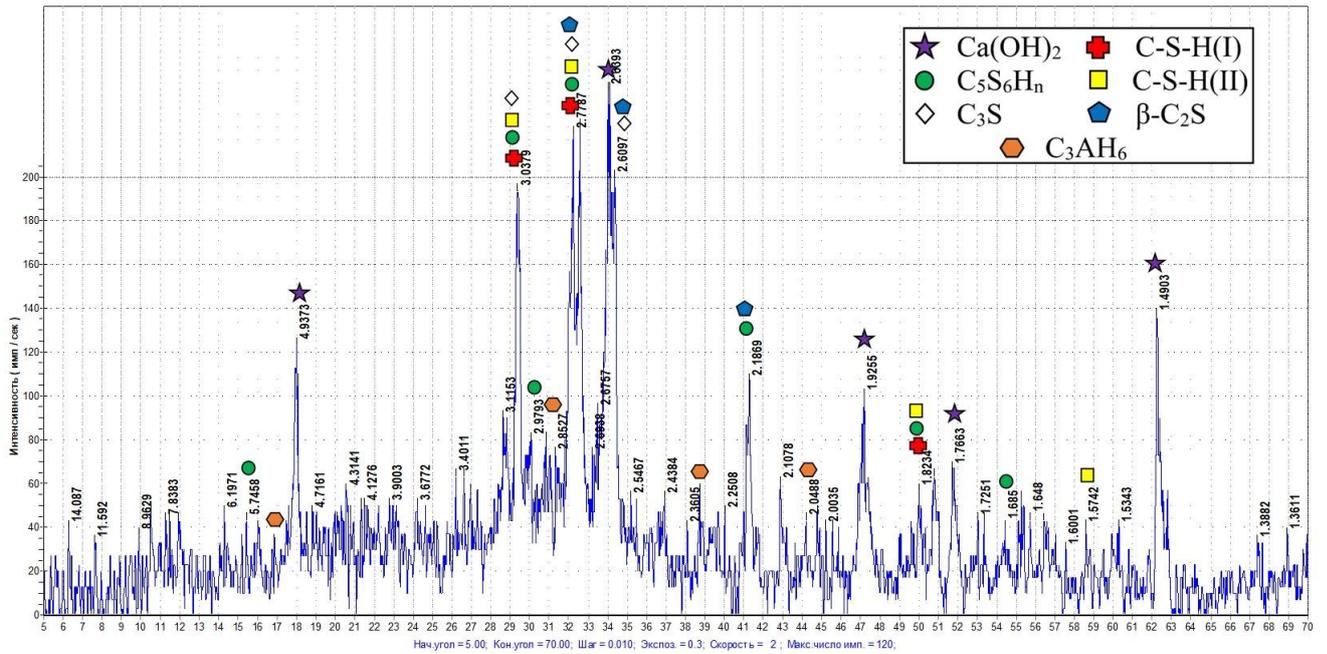


Рисунок 34 – РФА после 50 циклов увлажнения образца цементного камня с СП-1

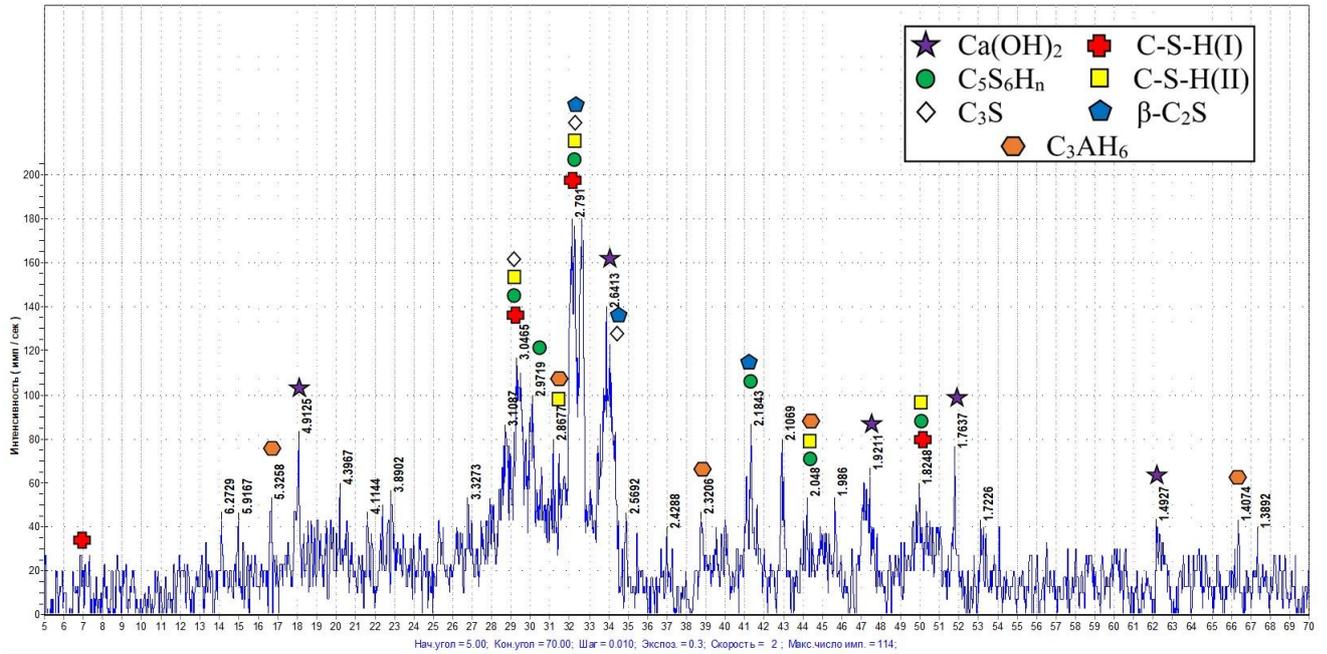


Рисунок 35 – РФА после 50 циклов увлажнения образца цементного камня с АСЕ и МК

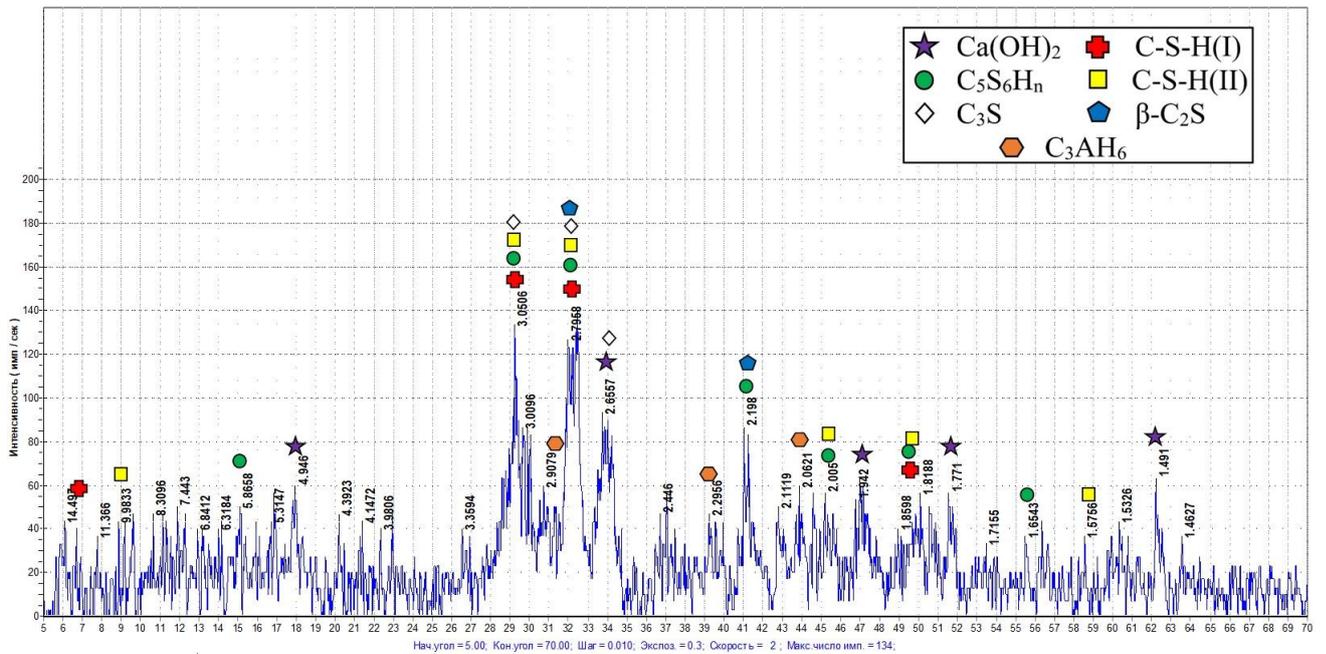


Рисунок 36 – РФА после 50 циклов увлажнения образца цементного камня с СП-1 и МК

По данным рентгенофазового анализа оценивалась интенсивность аналитических линий, соответствующих основным продуктам гидратации цемента при введении модификаторов. При расшифровке рентгенограмм фиксируются следующие гидратные фазы: портландит ($d/n=0,493; 0,263; 0,193; 0,179; 0,169; 0,1485$ нм), слабозакристаллизованные гидросиликаты с $C/S < 1,5$ ($d/n=1,25; 0,307; 0,28; 0,183$ нм), $C/S \geq 1,5$ ($d/n=0,98; 0,307; 0,285; 0,28; 0,183$ нм) и тоберморит $11,3 \text{ \AA}$ ($d/n=1,1; 0,307; 0,297; 0,2; 0,183$ нм), C_3AH_6 ($d/n=0,514; 0,282; 0,230; 0,223; 0,204; 0,141$ нм); C_3S ($d/n=0,3034; 0,2776; 0,2608$ нм) и $\beta\text{-}C_2S$ ($d/n=0,277; 0,2609; 0,2184$ нм).

По приведенным данным рентгенофазового анализа (см. рисунки 26–37) подтверждаются выявленные дифференциально-термическим анализом зависимости изменения структуры цементного камня при циклических воздействиях. Установлено, что слабозакристаллизованные гидросиликаты преобладают в структуре цементного камня, при введении поликарбоксилатного пластификатора и микрокремнезема, как контрольных, так и основных образцов. То есть структура сохраняется при циклических воздействиях. Это подтверждается повышенным фоном в области малых углов отражений на

рентгенограммах и малой интенсивностью пиков закристаллизованных фаз, по сравнению с цементным камнем модифицированным другими добавками, особенно СП-1. Структура гидратных фаз цементного камня с СП-1 существенно изменяется после циклических воздействий – её степень закристаллизованности повышается.

Выводы по главе 3

1. При модификации цементного камня поликарбоксилатным пластификатором достигается максимальная прочность на сжатие, которая к 28 суткам нормального твердения составляет 112 МПа, снижается содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с 9,1 % до 7,2 %, структура формируется в основном из слабозакристаллизованной C–S–H(II) фазы, с включениями тоберморита и C–S–H(I) фазы.

2. При использовании суперпластификатора СП-1 структура цементного камня не изменяется, по сравнению с бездобавочным цементом, и представлена C–S–H(I) и C–S–H(II) фазами с повышенным содержанием портландита 9,1 %, а прочность цементного камня на сжатие к 28 суткам не превышает 82,5 МПа.

3. Пуццоланизация цементного камня с поликарбоксилатным пластификатором снижает содержание портландита до 4,8 %, а гидросиликатные новообразования формируются из низкоосновных слабозакристаллизованных гидросиликатов кальция пластинчатого строения, типа C–S–H(I) и тоберморита.

4. Введение активной пуццоланы в цементный камень, совместно с поликарбоксилатным пластификатором, повышает стойкость и неизменность формируемых гидратных фаз как после циклического высушивания, так и после замораживания, тогда как введение только пластифицирующих добавок не обеспечивает стойкость к циклическим воздействиям.

5. Связывание портландита способствует преимущественному образованию низкоосновных слабозакристаллизованных гидросиликатов кальция пластинчатого строения, которые сохраняются после циклических температурно-влажностных воздействий, что обеспечивает цементному камню повышенную стойкость.

6. По данным калориметрии на ранней стадии гидратации максимальная экзотермия фиксируется при введении пуццолановой добавки в состав цементного камня, а введение добавок пластификаторов уменьшает термический эффект.

Глава 4 Модифицированные бетоны и их свойства

Надежность и долговечность железобетонных конструкций и сооружений нормируется по показателям морозостойкости и диффузионной проницаемости углекислого газа защитного слоя бетона [235]. Эти характеристики по отечественным и зарубежным нормативным документам зависят главным образом от показателей плотности. ГОСТ 31384-2017 для суровых условий эксплуатации нормирует морозостойкость не ниже марки F₂₄₅₀ и низкую диффузию кислых газов. Для получения морозостойких бетонов в основном применяется снижение водоцементного отношения ниже 0,35, что сопровождается и повышением прочностных характеристик. В литературе есть сведения, что бетоны с такими характеристиками, могут иметь высокую марку по морозостойкости даже без воздухововлечения за счет модифицирования структуры гидратных фаз цементного камня [137, 147, 160, 174]. Необходимо расширить представления о технологических параметрах изготовления железобетонных конструкций для суровых климатических условий эксплуатации.

4.1 Подбор и корректировка состава бетона

Подбор рецептуры бетонных смесей с модифицирующими добавками проводился по ГОСТ 27006-2019 и рекомендаций к нему [230, 248, 249, 257]. В основе подбора состава бетона применяется метод абсолютных объёмов, при котором расход материалов на 1 м³ бетонной смеси учитывается в абсолютно плотном состоянии. В результате получается суммарный расход материалов, который характеризует плотность бетонной смеси в уплотненном состоянии. Этот параметр, в сравнении с фактической средней плотностью бетонной смеси, дает нормируемый коэффициент уплотнения, который должен быть не менее 0,98. Таким образом, исключается повышенная пористость бетонных образцов, что

способствует повышению их стойкости в суровых климатических условиях. Составы модифицированного бетона, при постоянном В/Ц и марке по удобоукладываемости, приведены в таблице 19 [259].

Таблица 19 – Откорректированная рецептура бетонов с модификаторами на 1 м³ бетонной смеси, кг

Модифицирующая добавка	Цемент	Микрокремнезем	Пластификатор	Вода	Песок	Щебень	В/Ц	$\rho_{\text{теорет}}, \text{кг/м}^3$
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								

Морозостойкость и долговечность бетона, особенно в суровых условиях эксплуатации, в большей степени зависят от величины водоцементного отношения, чтобы устранить влияние этого фактора на свойства бетона, все предлагаемые рецептуры разработаны при постоянном В/Ц=0,31. Приготовление бетонных смесей с модифицирующими добавками и низкими В/Ц производилось в смесителе принудительного перемешивания, а однородность получаемых бетонных смесей характеризовалась коэффициентом вариации прочности бетона. Продолжительность перемешивания бетонной смеси составляла (300±10) секунд, изменение типа смесителя или продолжительности приготовления бетонной смеси могут влиять на реологию бетонных смесей. Приготовленные бетонные смеси анализировались не позднее чем через пять минут в помещении с температурой (22±2) °С и относительной влажностью воздуха 50–60 %. Полученные результаты свойств модифицированных бетонных смесей представлены в таблице 20, и каждый результат является среднеарифметическим значением трех испытаний.

Таблица 20 – Технологические и реологические характеристики бетонной смеси по ГОСТ 7474-2010 [209, 266]

Модифицирующая добавка	Плотность, кг/м ³	ОК, см	Коэффициент уплотнения [266]	Расслаиваемость, %		Сохраняемость, мин.	Коэффициент вариации, C _v , %
				Водоотделение	Растворотделение		
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

При этом объём вовлеченного воздуха в бетонных смесях не превышает 2 %, а объём контракционной пористости, которая увеличивает морозостойкость бетона, зависит от степени гидратации и расхода цемента и может составлять порядка 2–3 % [31].

Национальным стандартом допускается проводить испытание свойств бетона сериями от двух до шести образцов. Чтобы принять конкретное значение, необходимо провести испытание 30 серий образцов кубов 70×70×70 мм и испытать их на сжатие, определить среднеквадратичную погрешность и коэффициент вариации прочности бетона, результаты расчёта приведены в приложении А, таблица А.1 [215]. По полученным данным принято два образца в серии.

4.2 Прочностные характеристики бетона

Прочность бетонов при постоянном качестве исходных материалов зависит не только от величины В/Ц, но и от состава модифицирующих добавок. Увеличение содержания гелевидной фазы является одним из основных параметров прочности бетона, так как цементный гель характеризуется

наибольшей прочностью из всех структурных характеристик цементного камня [72].

Процедура изготовления и испытания образцов кубов с ребром 10 см осуществлялась в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [215]. Параллельно испытывались образцы без добавок и с добавками модификаторами. Так как В/Ц было постоянным, то изменение прочностных свойств является следствием модификации структурных элементов цементного камня. Средний арифметический результат испытания серии образцов умножался на масштабный коэффициент. При испытании прочностных характеристик модифицированного тяжелого бетона все статистические данные помещены в приложение А, в таблицах А.2–А5. Полученные значения прочности на сжатие для бетонов с добавками и без них показаны на рисунке 37.

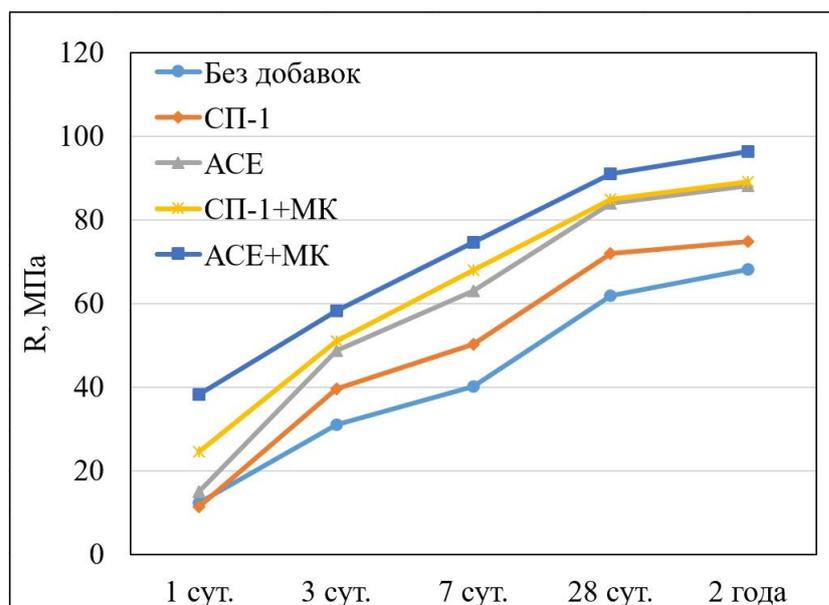


Рисунок 37 – Предел прочности на сжатие образцов модифицированного бетона

Модифицирование структуры бетона повышает прочностные свойства во все сроки твердения, за счет увеличения содержания слабозакристаллизованной гелевидной гидросиликатной фазы [189, 190]. Водоредуцирующие добавки в меньшей степени повышают прочность бетона после одних суток твердения, так как проявляют свойства поверхностно активных веществ. Введение активной пуццоланы, совместно с пластификатором, повышает суточную прочность в два раза с СП-1, до 24 МПа, и в три раза с АСЕ, до 38 МПа. То есть микрокремнезем

проявляет свойства ускорителя твердения уже на ранней стадии гидратации. Рост прочности бетона при сжатии продолжается с увеличением возраста, а при введении водоредуцирующих добавок обеспечивается повышение прочности до 72 МПа с СП-1 и 84 МПа с АСЕ. Максимальный рост прочности обеспечивает совместное введение водоредуцирующей и пуццолановой добавок, который достигает 85 МПа с СП-1 и 91 МПа с АСЕ. Нарастание прочности при сжатии продолжается и в более поздние сроки – так через два года она составляет, соответственно, 89 и 96 МПа. Наибольший прирост прочности при введении пластифицирующих добавок фиксируется после трёх суток твердения, тогда как применение комплексов с микрокремнеземом обеспечивает максимальный прирост прочности после первых суток.

Тяжелый бетон для дорожных и аэродромных покрытий, а также ряда других объектов транспортной инфраструктуры, применяется с регламентированным классом по прочности на растяжение при изгибе. Испытания прочности бетона на растяжение при изгибе проводили на образцах балках размером 100×100×400 мм, результаты испытаний приведены на рисунке 38.

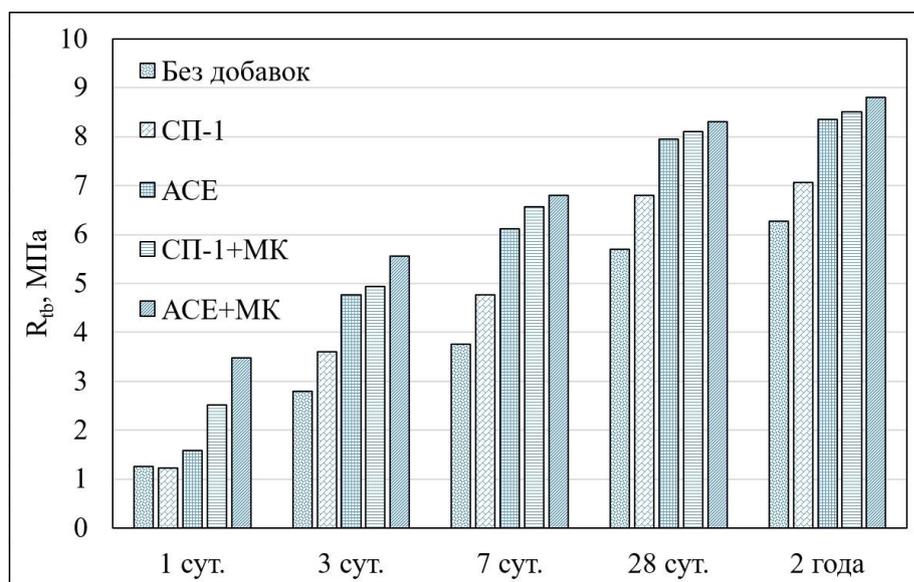


Рисунок 38 – Прочность модифицированных бетонов на изгиб

Действие модифицирующих добавок, направленное на увеличение содержания слабозакристаллизованного гидросиликатного геля, проявляется при

испытании образцов бетона на растяжение при изгибе, также как и на сжатие. Через 28 суток твердения в нормальных температурно-влажностных условиях предел прочности при изгибе, с учетом масштабного коэффициента, увеличивается с 5,7 МПа для бездобавочных образцов до 6,8 МПа при введении СП-1 и 7,95 МПа с АСЕ. Максимальный рост прочности при изгибе в этом возрасте наблюдался при введении органо-минерального комплекса – 8,1 МПа для СП-1+МК, а для АСЕ+МК 8,3 МПа. Повышение прочности при изгибе резко увеличивает стойкость и долговечность дорожных покрытий, а также продлевает срок безремонтной эксплуатации [38, 47, 53, 145, 148, 235].

Прочность на осевое растяжение бетона – наиболее чувствительная характеристика механических свойств и в значительной степени зависит от структурных особенностей гидратных фаз и наличия различных дефектов [46]. Поэтому необходимо оценить влияние структуры на стойкость к осевому растяжению бетона. Испытания на осевое растяжение образцов бетона проводились в соответствии с ГОСТ 10180-2012 на образцах кубиках с ребром 10 см, которые нагружались через стальные полуцилиндры, данные проведенных испытаний представлены на рисунке 39 и в таблице 21 [215].

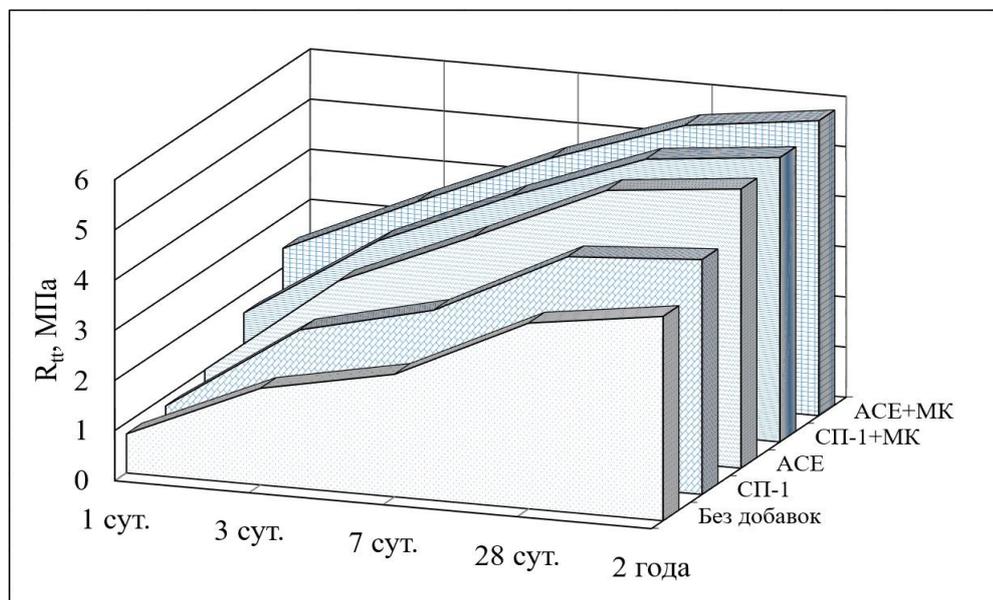


Рисунок 39 – Изменение прочности на растяжение при раскалывании во времени

Прочность бездобавочных образцов на осевое растяжение минимальна и в 28 суток составляет 3,7 МПа, а к двум годам увеличивается до 4,1 МПа. Добавки

пластификаторы слабее повышают прочность, как в раннем возрасте, так и в более позднем, чем комплексные добавки. Наибольшее увеличение прочности образцов с пластификаторами отмечается после трех суток твердения.

Таблица 21 – Влияние модификаторов на результаты испытаний образцов бетона на растяжение при расколе

Состав	1 сут.		3 сут.		7 сут.		28 сут.		2 года	
	МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%	МПа	%
Без добавок	0,8	100	1,9	100	2,4	100	3,7	100	4,1	100
СП-1	0,8	100	2,6	137	3,2	133	4,5	122	4,7	115
АСЕ	1	125	3	158	4,1	171	5,3	143	5,6	137
СП-1+МК	1,6	200	3,3	174	4,4	183	5,4	146	5,7	139
АСЕ+МК	2,4	300	3,5	184	4,7	196	5,6	151	5,9	144

Дополнительное введение микрокремнезема, в сочетании с пластификаторами, ускоряет набор прочности, а особенно в возрасте одних суток. Через два года прирост прочности, по сравнению с бездобавочными образцами, с добавками пластификаторами составил 15 % с СП-1 и 37 % с АСЕ, а с комплексными добавками, соответственно, 39 % и 44 %. Таким образом, поликарбоксилатный пластификатор оказывает большее влияние на структурообразующие процессы и прочностные характеристики, чем нафталинформальдегидный пластификатор, при сохранении постоянного В/Ц=0,31. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что структура гидратных фаз цементного камня бетона при введении добавок АСЕ и МК наиболее однородная и содержит наименьшее количество дефектов. Можно предположить, что с АСЕ и, особенно, с АСЕ и МК бетоны будут обладать наибольшей стойкостью к циклическим воздействиям.

Показатели микроструктуры гидратных фаз и их степень закристаллизованности оказывают влияние на пористость и водопоглощение бетона. На рисунке 40 показано изменение водопоглощения бетона без добавок и

с добавками модификаторами в разном возрасте, вплоть до четырех лет нормального твердения [217].

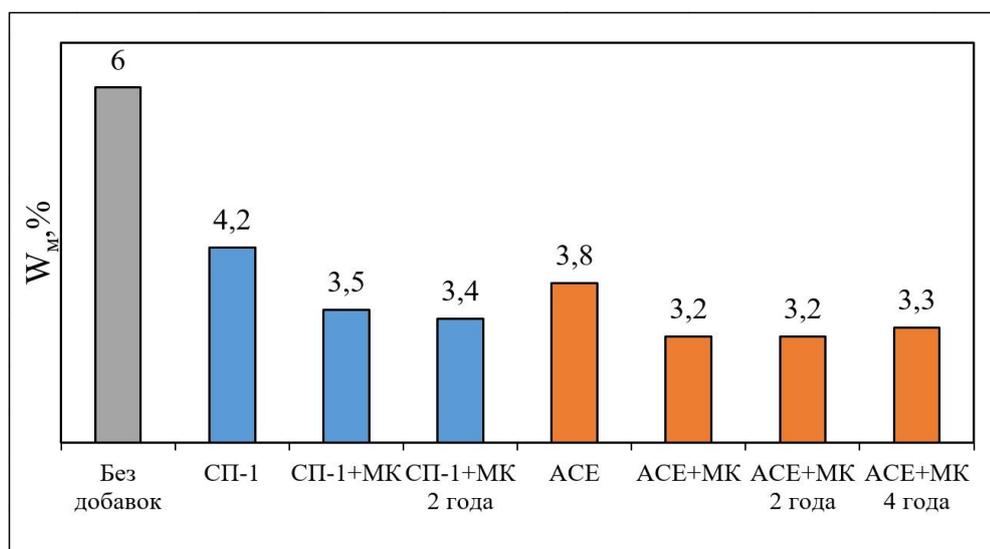


Рисунок 40 – Результаты испытания водопоглощения модифицированных бетонов в возрасте 28 суток, двух и четырех лет

Водопоглощение характеризует макрокапиллярную пористость бетона. Применение модифицирующих добавок снижает водопоглощение по массе, так как модификация изменяет характер пористости, особенно при введении микрокремнезема, который, за счет реакции пуццоланизации, способствует формированию преимущественно гелевой пористости. Размер гелевых пор не превышает 2 нанометра, и они непроницаемы для воды и других флюидов.

Пластифицирующие добавки снижают водопоглощение образцов бетона с 6,0 до 4,2 и 3,8 % при введении, соответственно, СП-1 и АСЕ, так как способствуют формированию гелеобразных гидратных фаз цементного камня повышенной плотности. Было установлено, что продолжительное выдерживание образцов в нормальных условиях, до испытания на водопоглощение, практически не влияет на их результат, благодаря сохранению микроструктуры бетона. Как и при прочностных испытаниях, модификация бетона добавками АСЕ и МК оказывает наилучшее влияние на снижение величины водопоглощения до 3,2 %. Это удовлетворяет требованиям национального стандарта по ограничению величины водопоглощения для бетона дорожных плит – не более 5 % по массе [221].

4.3 Стойкость бетонов с модифицирующими добавками к циклическому замораживанию и оттаиванию

Испытания стойкости бетонов к морозной агрессии проводились по ГОСТ 10060-2012 – изготовленные образцы кубы 100×100×100 мм через 28 суток нормального твердения насыщались 5 % раствором NaCl и в сосуде с этим раствором циклически замораживались при минус 50 °С и оттаивали при 20 °С [213]. При этом образцы бетона с маркой по морозостойкости F₂₅₀₀ должны выдерживать без сброса прочности и потери массы 80 циклов замораживания и оттаивания. Стандартом жестко не регламентируется общая продолжительность одного цикла, но она должна составлять не менее 6 часов. В работе продолжительность цикла замораживания и оттаивания была принята 12 часов, что обеспечивало два цикла в сутки. Образцы бетона с разными модификаторами изготавливались в таком количестве, чтобы осуществлять периодический контроль после разного числа циклов, соответствующих маркам F₂₁₀₀, F₂₁₅₀, F₂₂₀₀, F₂₃₀₀, F₂₄₀₀ и F₂₅₀₀. Серия образцов с каждым модификатором делилась на две группы, одна испытывалась на марки по морозостойкости (основные образцы), а вторая выдерживалась в 5 % растворе NaCl при (20±2) °С (контрольные образцы) и испытывалась одновременно с первой группой. Перед началом испытаний все образцы предварительно насыщались в соответствии с п. 4.12 ГОСТ 10060-2012 в течение четырех суток в 5 % растворе поваренной соли [213]. Морозостойкость образцов модифицированных бетонов показана на рисунке 41, а расчет марок по морозостойкости приведен в приложении А, таблицы А.6–А.10.

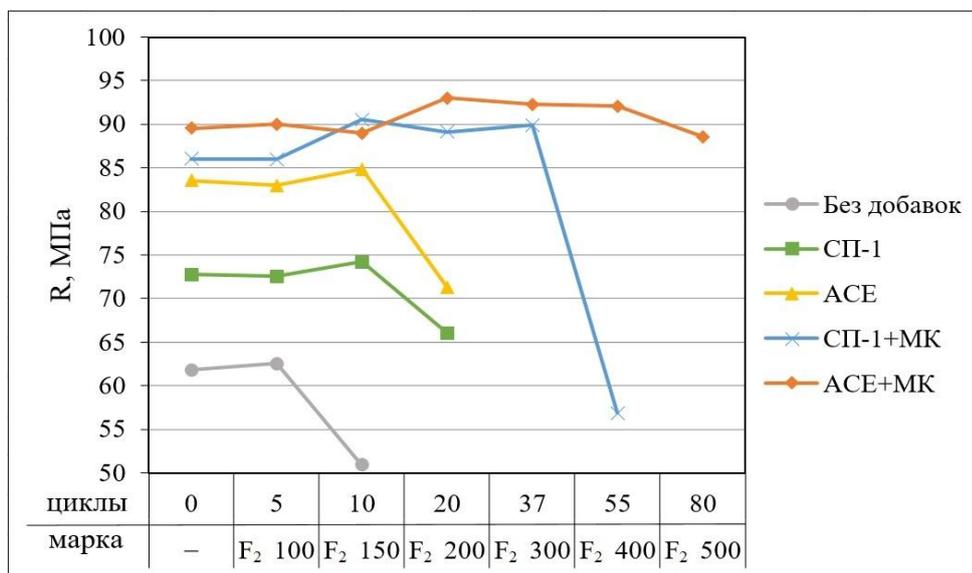


Рисунок 41 – Результаты испытания образцов модифицированных бетонов на морозостойкость

Контрольные и основные образцы изготавливались из бетонных смесей с одинаковой маркой по удобоукладываемости П1, при постоянной величине водоцементного отношения 0,31.

Образцы бетона без модифицирующих добавок выдержали наименьшее количество циклов замораживания и оттаивания, соответствующее марке по морозостойкости F₂100. Несмотря на отмеченный ранее модифицирующий эффект добавки поликарбоксилатного пластификатора, марка бетона по морозостойкости F₂150 при его применении не отличается от марки полученной при введении СП-1. Для образцов бетона с СП-1, после испытания марки по морозостойкости, были отмечены повреждения в виде шелушения поверхности. Кроме того, для образцов бетона без добавок до пяти циклов, а с пластификаторами до 10 циклов замораживания и оттаивания наблюдалось повышение прочности, что может свидетельствовать об ускорении процесса гидратации, так как первоначальная структура гидратных фаз цементного камня перестала блокировать зерна непрореагировавшего цемента, то есть гелевая пористость частично увеличилась до микро- и макрокапиллярной [112, 113]. Наиболее существенное повышение марки бетона по морозостойкости происходит при совместном введении пластификатора и микрокремнезема, при

этом достигается F_{2300} для модификаторов СП-1 и МК и F_{2500} – для АСЕ и МК. Роль пуццолановой добавки микрокремнезема в повышении морозостойкости бетона усиливается модифицирующим действием АСЕ, за счет связывания ионов кальция в поровой жидкости бетона в комплексные соединения [166, 194, 207].

Таким образом, совместное применение добавок АСЕ и МК – наиболее эффективный способ получения бетона высокой морозостойкости, вследствие уменьшения содержания портландита в цементном камне и образования слабозакристаллизованных гидросиликатов, которые сохраняются на протяжении длительных низкотемпературных испытаний морозостойкости.

Водопоглощение образцов бетона с модифицирующими добавками также является характеристикой структуры порового пространства, связанной с особенностями формирования гидратных фаз. Величина поглощения влаги образцами бетона и влияние на неё 55 циклов замораживания и оттаивания по третьему методу ГОСТ 10060-2012, приведена на рисунке 42 [213, 217].

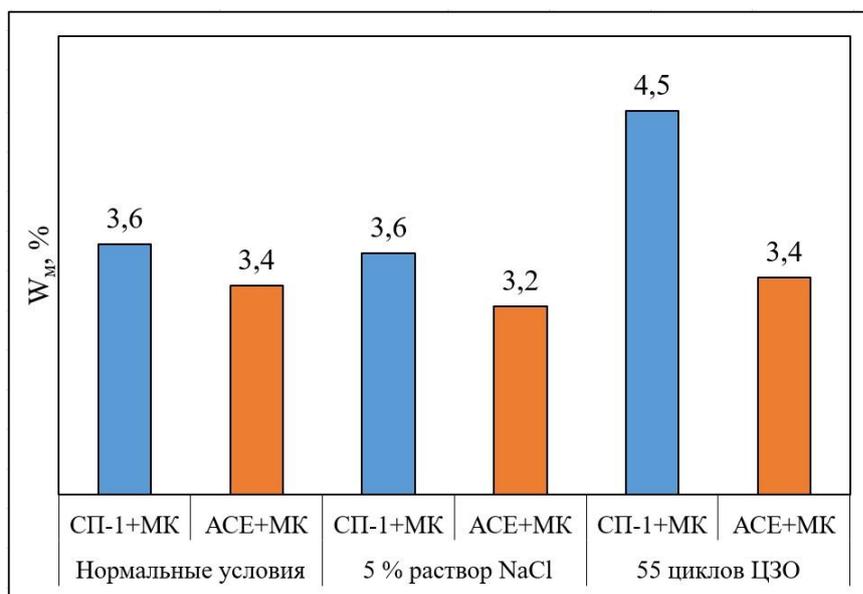


Рисунок 42 – Величина поглощения влаги бетонными образцами в одинаковом возрасте

По результатам этого эксперимента, можно сделать заключение о том, что вид флюида – вода или раствор поваренной соли, в котором образцы выдерживались на протяжении месяца, не оказал влияния на значение водопоглощения. После 55 циклов замораживания величина водопоглощения

образцов, модифицированных СП-1 и МК, увеличилась на 25 %, что вызвано изменением первоначальной микроструктуры, сопровождающееся увеличением размера пор. При введении добавок АСЕ и МК структура продуктов гидратации остается неизменной, что и обеспечило такую же величину водопоглощения, как у контрольных образцов.

Для оценки сохраняемости микроструктуры цементного камня, после циклических испытаний на морозостойкость ускоренным способом, проводили испытания бетона с различными добавками на осевое растяжение при раскалывании. Полученные результаты приведены на рисунке 43.

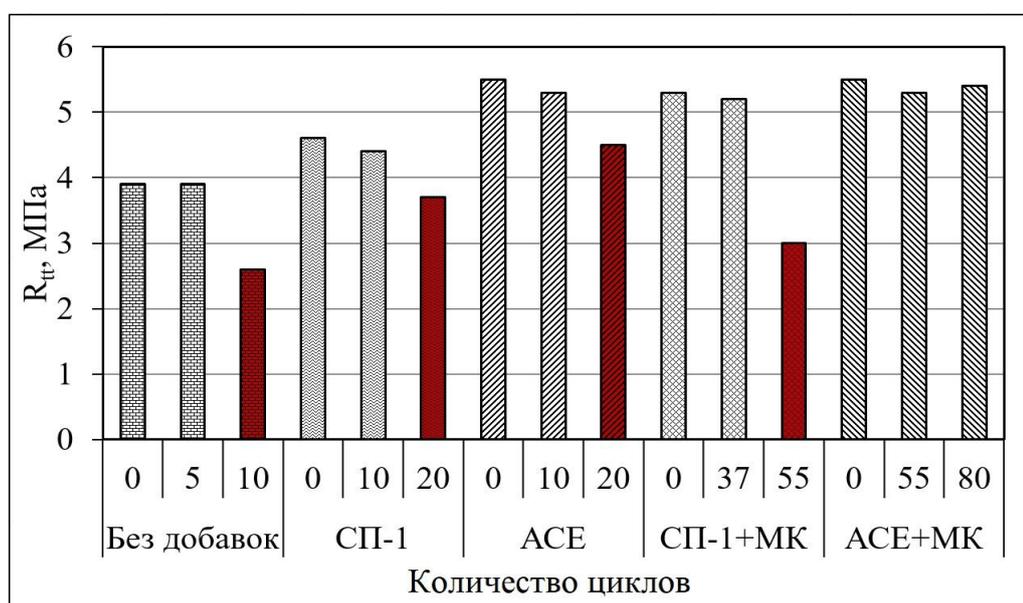


Рисунок 43 – Влияние циклических замораживаний образцов бетона с различными модификаторами на прочность при раскалывании

Самое быстрое снижение прочности в процессе циклического замораживания происходит при испытании бездобавочных образцов – через 10 циклов оно составляет 33 %. Для образцов бетона с СП-1, после 20 циклов, снижение прочности составило 16 %, а для образцов с АСЕ – 15 %. При совместном введении СП-1 и МК после 55 циклов снижение прочности на раскалывание составило 42 %, а при модифицировании добавкой АСЕ и МК, после 80 циклов снижения прочности не произошло. Следовательно, при циклическом замораживании сохранение первоначальной структуры гидратов не происходит в бездобавочном бетоне. Пластификаторы практически не изменяют

стойкость бетона и стабильность гидратных фаз в процессе циклического замораживания. Введение СП-1 и МК позволяет получить бетоны с маркой по морозостойкости F₂₃₀₀, тогда как с добавками АСЕ и МК, даже после циклического замораживания, соответствующего марке по морозостойкости F₂₅₀₀, не произошло снижение прочности на растяжение при расколе. Таким образом, только совместное введение определенной дозировки добавок АСЕ и МК обеспечивает неизменность первоначальной микроструктуры цементного камня и достижение сверхвысоких показателей морозостойкости.

Оценивать процессы, протекающие в структуре цементного камня бетона, при испытании морозостойкости, целесообразно по изменению величины водопоглощения на одних и тех же образцах, взвешиваемых после разного количества циклов. Допускаемая по стандарту потеря массы не должна превышать 2 %, чтобы назначить марку бетона по морозостойкости [213].

Для образцов бетона, модифицированных пластификатором и пуццоланой, величина насыщения по стандартной процедуре в течение четырех суток, перед испытанием морозостойкости, составляет порядка 0,42–0,84 % (10–20 граммов). Такая небольшая величина водопоглощения является следствием отсутствия капиллярных пор в бетоне при наличии, в основном, гелевой пористости, в которой перемещение влаги осуществляется за счет диффузионных механизмов. 30-суточное насыщение контрольных образцов в 5 % растворе поваренной соли увеличивает массу образцов бетона с СП-1 и МК на 23–44 % (до восьми грамм), а для АСЕ и МК до 6–27 % (до пяти грамм). Данные по насыщению контрольных образцов солевым раствором представлены на рисунке 44, на котором показаны числовые значения растворопоглощения в процентах по отношению к количеству жидкой фазы, поглощенной за четверо суток насыщения.

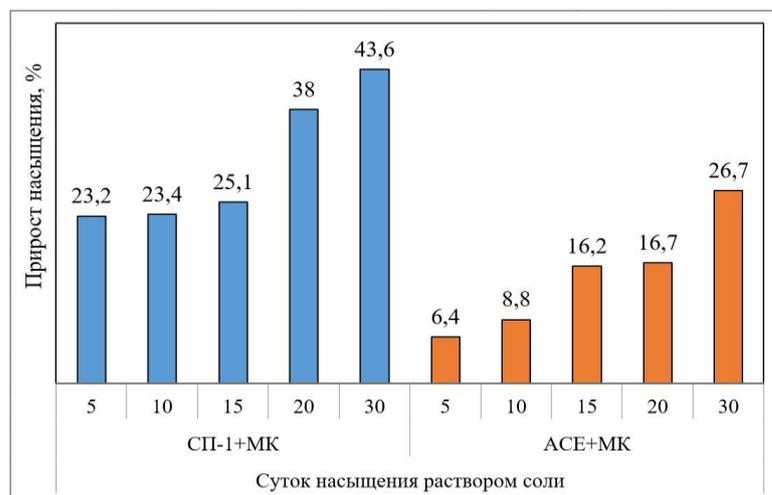


Рисунок 44 – Повышение массы контрольных образцов после длительной выдержки в растворе поваренной соли

Даже в течение длительного времени насыщения образцов бетона, их масса увеличивается незначительно, причем для образцов с АСЕ и МК этот процесс протекает в 2–4 раза медленнее, чем при модифицировании бетона СП-1 и МК.

Изменение растворопоглощения образцов бетона в процессе циклического замораживания приведено на рисунке 45, по режиму два цикла замораживания и оттаивания в сутки.

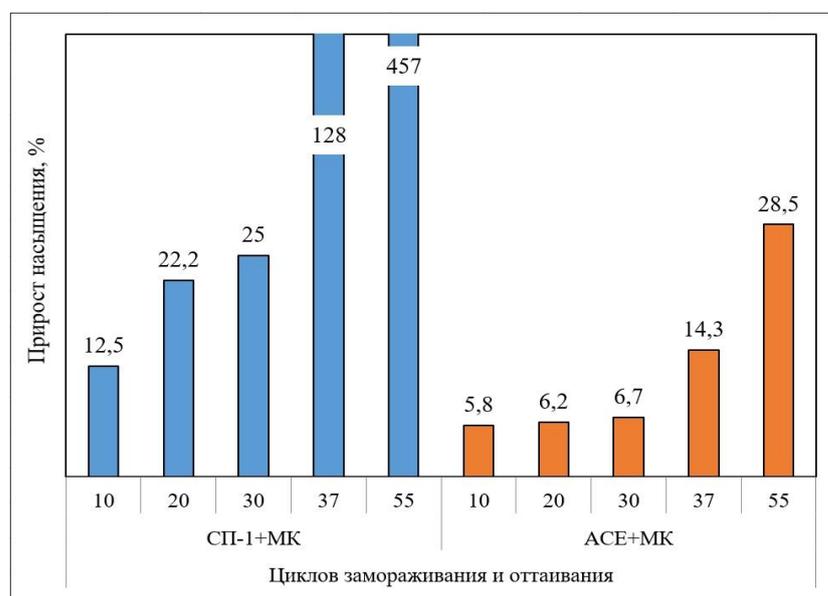


Рисунок 45 – Влияние циклического замораживания на величину насыщения модифицированных бетонов

Масса образцов не снижается, как происходит при разрушении в процессе циклического замораживания, а увеличивается вследствие сохранения

преимущественно гелевой пористости. Для образцов, модифицированных СП-1 и МК, после 37 циклов замораживания происходит резкое увеличение массы, которое продолжается и при дальнейшем испытании морозостойкости до 55 циклов. Это явление вызвано процессами, которые А.В. Волженский определил как «старение» цементного геля, то есть снижение дисперсности гидратных фаз, их кристаллизация с образованием капиллярной пористости [21, 23]. Таким образом, по величине насыщения можно оценить кинетику «старения» гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании. Количество циклов, после которого начинается кристаллизация гидратных фаз, фактически определяет морозостойкость бетона, хотя при этом прочность при сжатии может снижаться незначительно, на величину меньше критической. Изменение насыщения основных образцов может быть использовано для упрощенного метода испытания морозостойкости бетона – образцы, подвергаемые циклическому замораживанию, после каждого цикла взвешиваются и количество циклов, при котором начинается интенсивное поглощение влаги, будет соответствовать морозостойкости бетона по которой будет назначаться его марка.

Помимо особенностей насыщения бетона солевым раствором, в процессе испытания морозостойкости было отмечено явление самовысушивания, которое выявлялось визуально по наличию влажной тонкой прослойки на поверхности бетонного образца и сухой сердцевины, рисунок 46.



Рисунок 46 – Зоны самовысушивания бетона после 37 циклов замораживания

Представленные на фотографиях образцы бетона были испытаны на разрушение с применением автоматического гидравлического пресса, который отключался при начале падения сжимающего усилия.

При изготовлении бетона с В/Ц менее 0,35 вода связывается химически и адсорбционно, поэтому в макро- и микрокапиллярах практически отсутствует свободная влага, что и характеризуется самовысушиванием. Связыванию влаги способствует также ускорение процессов гидратации в присутствии хлоридов – при насыщении и замораживании образцов бетона в растворе NaCl. Данное явление описано в монографии П.С. Айсина по высокофункциональным бетонам в разделе, посвященном обзору публикаций по их морозостойкости [147]. В исследовании Т.А. Хаммера и Е.Ж. Селлеволлда отмечается самовысушивание бетона с В/В=0,3, при циклическом замораживании которого до минус 50 °С лёд практически не образуется, но, несмотря на это, его разрушение все равно происходит [158]. Авторы предполагают, что возможной причиной деструкции бетона при циклических воздействиях являются температурные напряжения.

Самовысушивание и низкая льдистость высокофункциональных бетонов при замораживании, в процессе циклических испытаний, позволяет предполагать, что на начальных стадиях разрушение вызвано главным образом температурными напряжениями [32]. Несогласованные коэффициенты температурного расширения компонентов бетона также могут способствовать его деструкции по всему объёму в процессе циклических воздействий. Роль льдообразования в этом процессе проявляется только после изменения первоначальной структуры гидратных фаз цементного камня, а также под влиянием процессов выщелачивания портландита, что повышает макропористость бетона [135, 155].

Деструкция образцов бетона при циклическом замораживании часто проявляется в виде шелушения их поверхности. Такой характер разрушения является следствием наиболее быстрого изменения температуры поверхности образцов, когда температурные деформации неравномерны по толщине [147]. Роль термических напряжений выявлена при испытании образцов цементного камня на циклическое увлажнение и высушивание, так образцы,

модифицированные СП-1, через 50 циклов распались на отдельные фрагменты [188].

4.4 Исследование микроструктуры продуктов гидратации после циклического замораживания и оттаивания

Для физико-химических исследований из бетона производили отбор проб цементного камня после различных циклических воздействий. Предполагалось, что разрушение бетонов под нагрузкой происходит по слабому месту, которым в данном случае является цементный камень [10, 11, 46]. После разрушения образцов бетона на прессе отбирались фрагменты с минимальным содержанием заполнителей, которые размельчались и отсеивались на сите 0,08. Помимо цементного камня в пробы могли попасть слабые включения из заполнителя, что выявлялось с помощью рентгенофазового и дифференциально-термического анализа.

Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне модифицированного бетона, по результатам термогравиметрического анализа, помещены на диаграмме, рисунок 47.

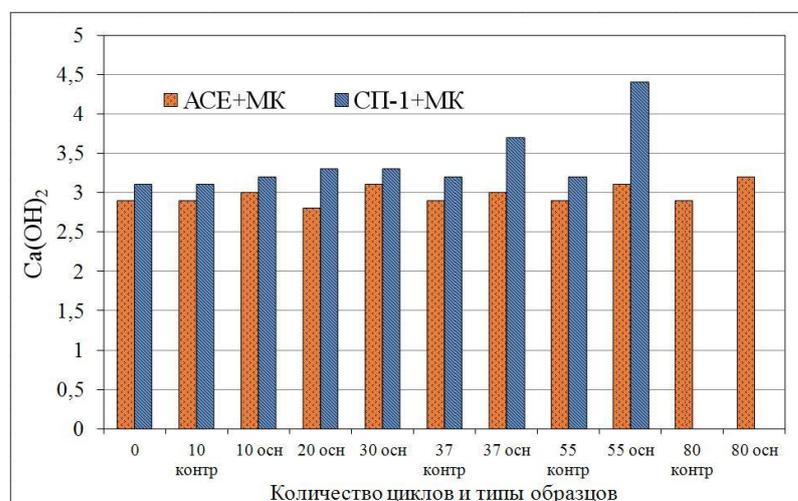


Рисунок 47 – Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне модифицированного бетона при циклическом замораживании

При введении добавок АСЕ и МК количество содержания портландита в цементном камне модифицированного бетона снижается значительно, чем при введении СП-1 и МК. Это вызвано способностью поликарбоксилатных добавок образовывать комплексы с ионами кальция [166, 194, 207]. Остаточное содержание свободного гидроксида кальция в цементном камне сохраняется на протяжении 80 циклов замораживания и оттаивания без существенных изменений, что свидетельствует о сохранении микроструктуры из низкоосновных слабозакристаллизованных гидросиликатов кальция в неизменном состоянии [135, 188, 191]. До 37 циклов количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне бетона с СП-1 и МК практически неизменно, то есть его первоначальная структура сохраняется. После 37 циклов, вследствие перекристаллизации исходных фаз, дополнительно выделяется ~25 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$, то есть первоначальная микроструктура гидратных фаз изменяется. Кроме того, было отмечено, что для образцов бетона, модифицированного СП-1 и МК, в поверхностных слоях содержание портландита понижается на 5–10 %, вследствие протекания коррозии выщелачивания – коррозии I вида по классификации В.В. Москвина [84].

По данным рентгенофазового анализа цементного камня из бетона, модифицированного поликарбоксилатом и микрокремнеземом, структура представлена в основном слабозакристаллизованным гидросиликатным тоберморитоподобным гелем ($d/n=0,305; 0,278; 0,182$ нм) с соотношением $C/S \leq 1,5$ (см. рисунок 48).

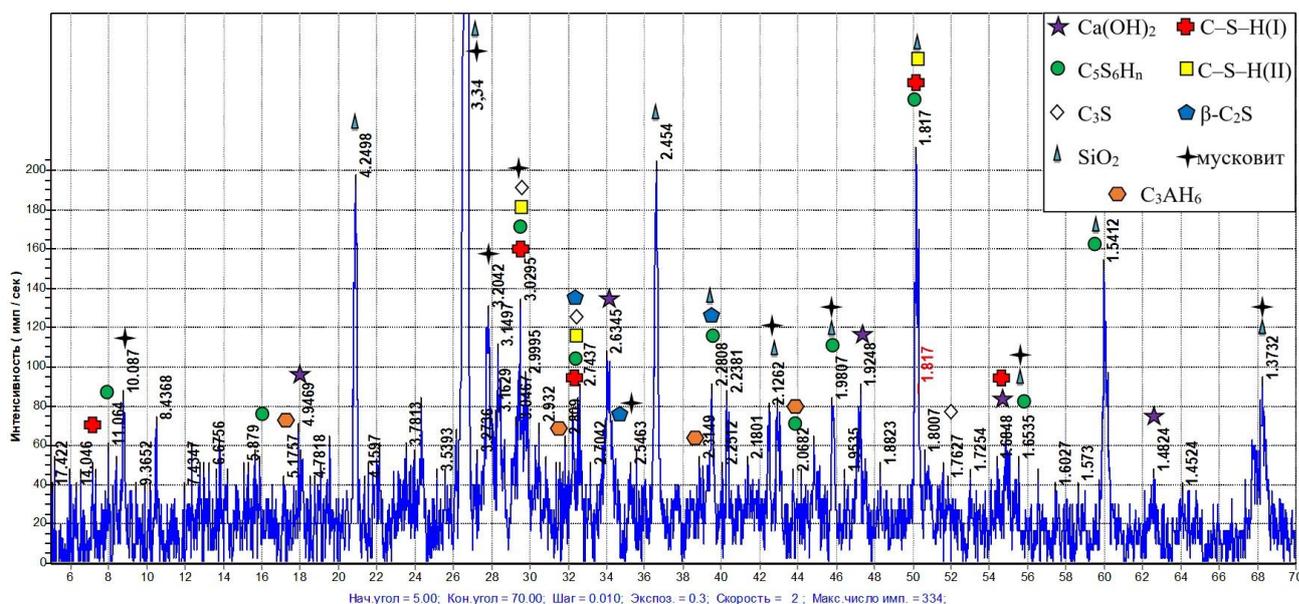


Рисунок 48 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня из бетона с полиакрилатным пластификатором и микрокремнеземом после 55 циклов замораживания и оттаивания

Помимо традиционных гидратных фаз на рентгенограммах цементного камня бетона выявлены отражения мусковита ($d/n=1,003; 0,502; 0,452; 0,334; 0,309; 0,286; 0,256$ нм), являющегося примесью в крупном заполнителе. Национальный стандарт ГОСТ 8267-93 допускает примеси слюды в количестве до 15 %, но для бетонов высокой морозостойкости такие примеси могут оказывать негативное влияние на контактную зону цементного камня с заполнителем [210]. Поэтому для бетонов высокой морозостойкости содержание гидрослюды следует ограничивать в большей мере.

В бетоне с СП-1 и МК также в основном формируется гидросиликатная структура, преимущественно из C-S-H(I) фазы ($d/n=0,98; 0,309; 0,285; 0,280; 0,183$ нм), но в этом случае из-за повышенного содержания портландита, первоначальные гидросиликаты переходят из гелевидного в кристаллическое состояние с повышением концентрации напряжений (см. рисунок 49).

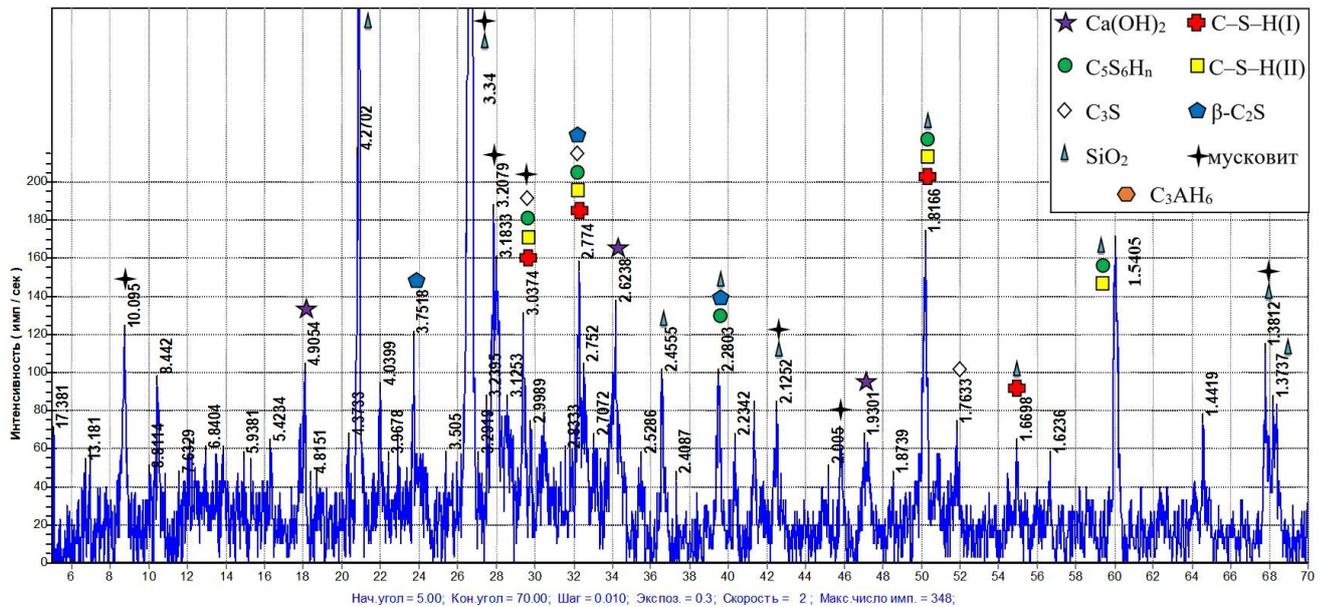


Рисунок 49 – Данные рентгенофазового анализа цементного камня из бетона с нафталинформальдегидным пластификатором и микрокремнеземом после 55 циклов замораживания и оттаивания

На рентгенограммах с СП-1 и МК, в отличие от АСЕ и МК, интенсивность пиков мусковита и кварца повышается ($d/n=0,424; 0,334; 0,245; 0,228; 0,223; 0,212; 0,181$ нм), что позволяет предположить механизм разрушения не только по цементному камню, но и по заполнителю.

Таким образом, из данных РФА следует, что структурные элементы цементного камня в бетоне с СП-1 и МК до циклических воздействий очень близки к элементам в бетоне с АСЕ и МК. Благодаря модифицирующему эффекту поликарбоксилатного пластификатора, понижающего содержание портландита, цементный камень с АСЕ и МК способен сохраняться неизменным большее количество циклических замораживаний и оттаиваний, повышая марку бетона по морозостойкости [67, 165].

На электронных микрофотографиях цементный камень из бетона с АСЕ и МК состоит из гелеобразной гидросиликатной фазы (см. рисунок 50), которая остается неизменной после 55 циклических замораживаний (см. рисунок 51). По данным рентгеновского микроанализатора, основность этой фазы как до, так и после циклических воздействий составляет $C/S \leq 1,5$.

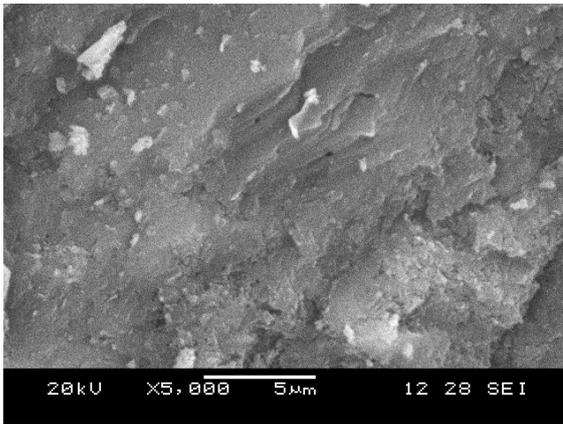


Рисунок 50 – Микроструктура цементного камня с АСЕ и МК

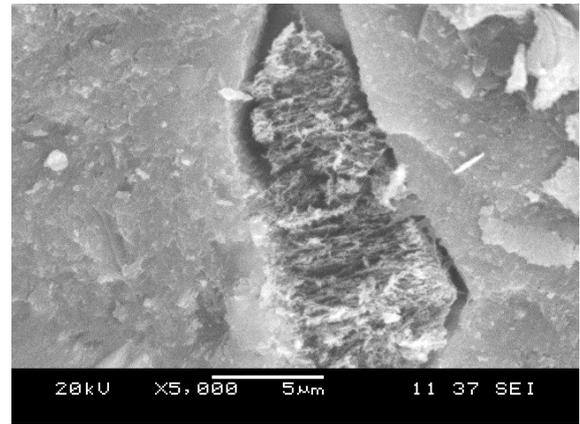


Рисунок 51 – Микроструктура цементного камня с АСЕ и МК после 55 циклических замораживаний

На рисунке 51 показана контактная зона цементного камня с крупным заполнителем, где отмечается повышенное количество портландита. Аналогичные явления наблюдаются в поровом пространстве, а в остальном объеме цементного камня большие скопления $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не присутствуют. В основном продукты гидратации цементного камня с АСЕ и МК представлены тонкими слоистыми пластинками гидросиликатного геля (см. рисунок 52). В анализируемое поле попадают редкие кристаллы мусковита (см. рисунок 53).

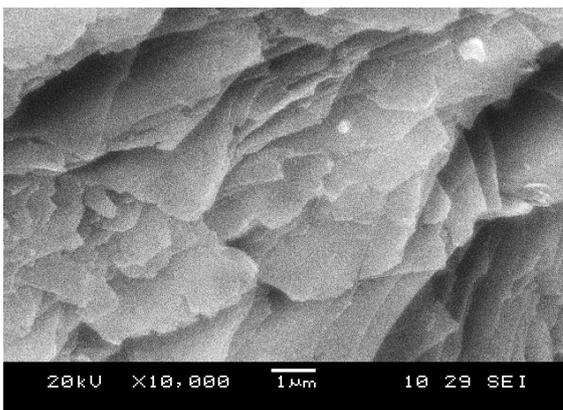


Рисунок 52 – Микроструктура цементного камня с АСЕ и МК после 55 циклических замораживаний

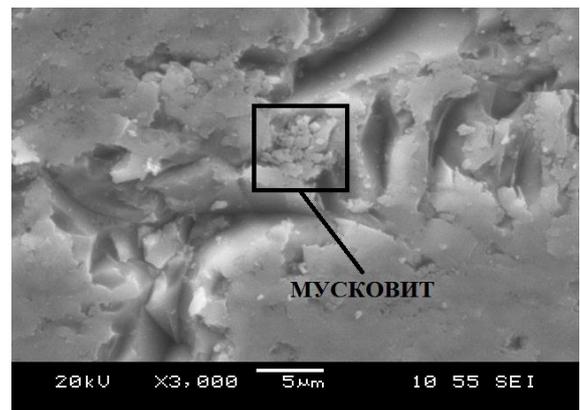


Рисунок 53 – Микроструктура цементного камня с АСЕ и МК после 55 циклических замораживаний

Гидратные фазы бетона, модифицированного СП-1 и МК, на микрофотографиях также представлены слабозакристаллизованным цементным гелем пластинчатого строения (см. рисунок 54).

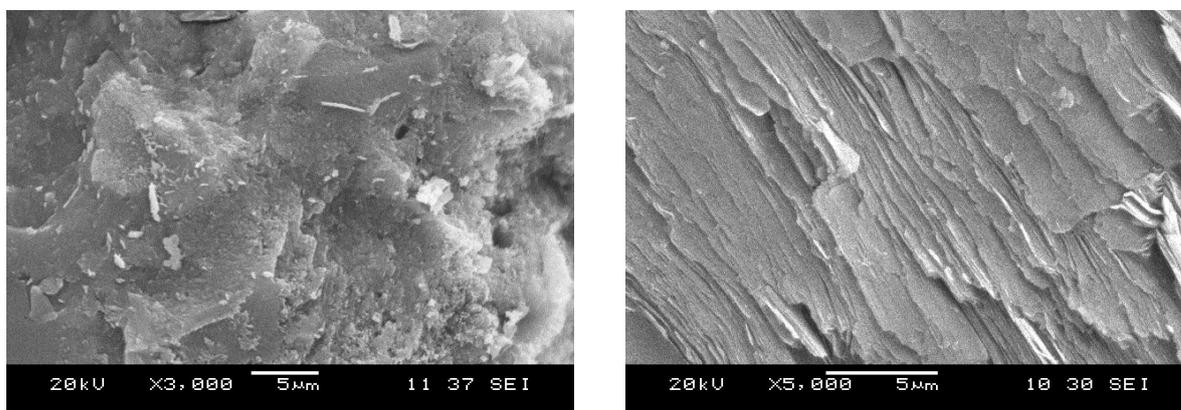


Рисунок 54 – Электронная микроскопия гидратных фаз контрольных образцов с СП-1 и МК

После 37 циклов испытания морозостойкости бетона, модифицированного СП-1 и МК, отмечаются отдельные случаи снижения концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (см. рисунок 55), вероятно, вследствие выщелачивания. После 55 циклов замораживания и оттаивания в разрушающемся бетоне отмечается повышение основности гидратных фаз, с $\text{C/S}=1,1-1,3$ до $\text{C/S}=1,7-2,1$ (см. рисунок 56). Чаше всего при этом происходит перекристаллизация гидратных фаз.

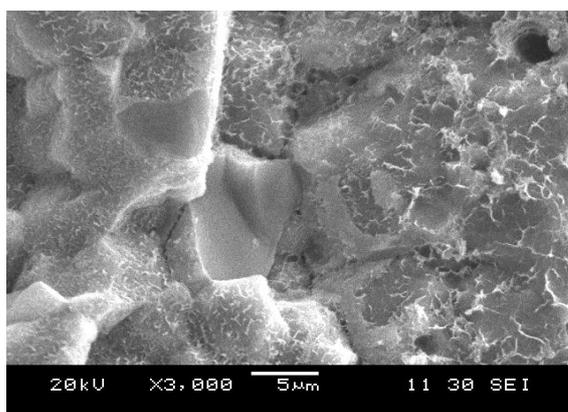


Рисунок 55 – Микроструктура цементного камня бетона с СП-1 и МК после 37 циклов испытания морозостойкости

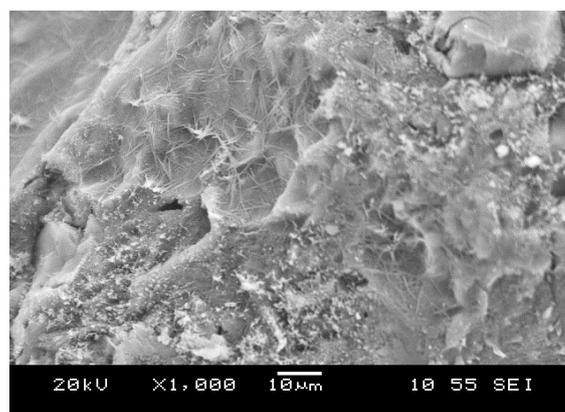


Рисунок 56 – Микроструктура цементного камня бетона с СП-1 и МК после 55 циклов испытания морозостойкости

Установлено, что при модификации бетона СП-1 и МК, в цементном камне формируются слабозакристаллизованные гидросиликатные фазы, типа C-S-H(I) ,

которые после 37 циклов замораживания и оттаивания начинают перекристаллизовываться, что вызывает разрушение бетона. При введении добавок АСЕ и МК цементный камень формирует более стойкую структуру гидратных фаз, которая сохраняется после 80 циклов. Добавки АСЕ и МК в большей степени, по сравнению с СП-1 и МК, уменьшают содержание портландита, что и позволяет сформировать стабильные гидросиликатные фазы.

4.5 Влияние механических циклических нагрузжений на стойкость бетона

Для оценки надежности полученных бетонов в различных конструкциях, подвергающихся циклическим механическим воздействиям (мосты, подкрановые балки, колонны, опоры линии электропередач, шпалы и другие), проводились испытания образцов при немногочисленных циклических нагружениях. Скорость нагружения принималась 2 кН/с, так как при большей скорости бетон работает как хрупкий материал и оценить особенности поведения структуры гидратных фаз в нём не представляется возможным [46]. Нагружение призм 40×40×160 мм производилось до 80 или 90 % от призмной прочности, а разгрузка до 10 %. Для проведения испытания были приняты серии образцов по шесть штук, а коэффициент вариации прочности при сжатии составил менее 6,5 %. Данные испытаний на гидравлическом прессе WAW-600кН показаны на рисунке 57.

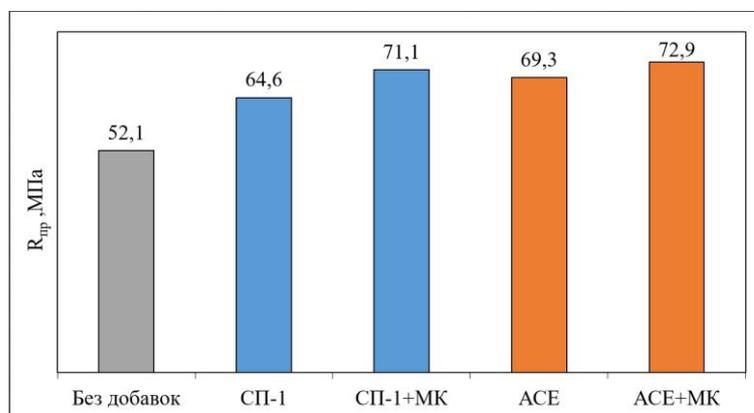


Рисунок 57 – Прочность образцов-призм на сжатие в 28 суток нормального твердения

Прочность образцов-призм и кубов из модифицированных бетонов изменяется аналогично, в зависимости от дозировки и вида модификатора. С увеличением в цементном камне бетона количества гелеобразных продуктов гидратации призмная прочность возрастает и достигает максимума – 72,9 МПа, для образцов с АСЕ и МК в возрасте 28 суток.

Для выявления причин разрушения бетона при циклических механических нагрузках проводили исследование структуры цементного камня и её влияние на стойкость бетона. Число циклических нагружений до разрушения, в зависимости от вида модификаторов, при уровне нагружений $0,9 R_{пр}$ показано на рисунке 58.

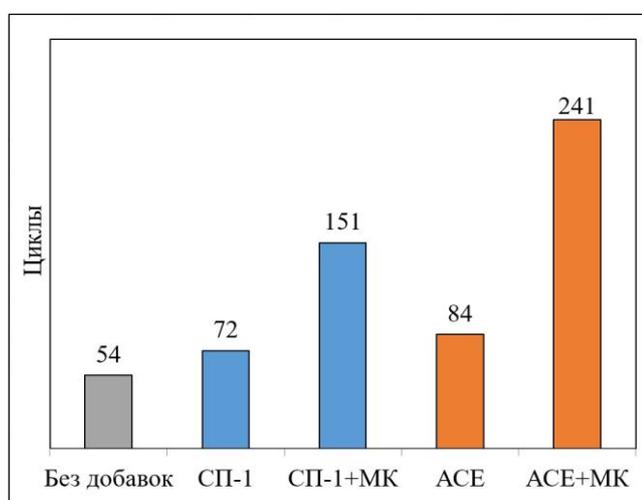


Рисунок 58 – Число циклических нагружений до $0,9 R_{пр}$, вызывающих разрушение образцов-призм

При введении микрокремнезема совместно с пластификатором повышается количество циклов до разрушения образцов, особенно эффективно применение бетонов с АСЕ. Применение АСЕ и МК повышает количество циклов до разрушения при уровне напряжений $0,9$ в 4,5 раза, а СП-1 и МК в 2,8 раз, по сравнению с бездобавочным бетоном. Отдельно пластификаторы повышают количество циклов в 1,3 раза с СП-1 и 1,6 с АСЕ.

Таким образом, микрокремнезем, способствуя формированию гелеобразной структуры гидратных фаз, обеспечивает равномерное распределение действующих напряжений в объёме образца [68]. Бетон, модифицированный добавками АСЕ и МК, выдерживает до разрушения на 37 % большее количество циклов нагружения, по сравнению с бетоном модифицированным СП-1 и МК,

вследствие направленного формирования слабозакристаллизованной структуры с $C/S < 1,5$ и низким содержанием портландита.

Микроструктура модифицированных бетонов исследовалась с использованием электронно-растрового микроскопа с рентгеновским микроанализатором, см. рисунок 59.

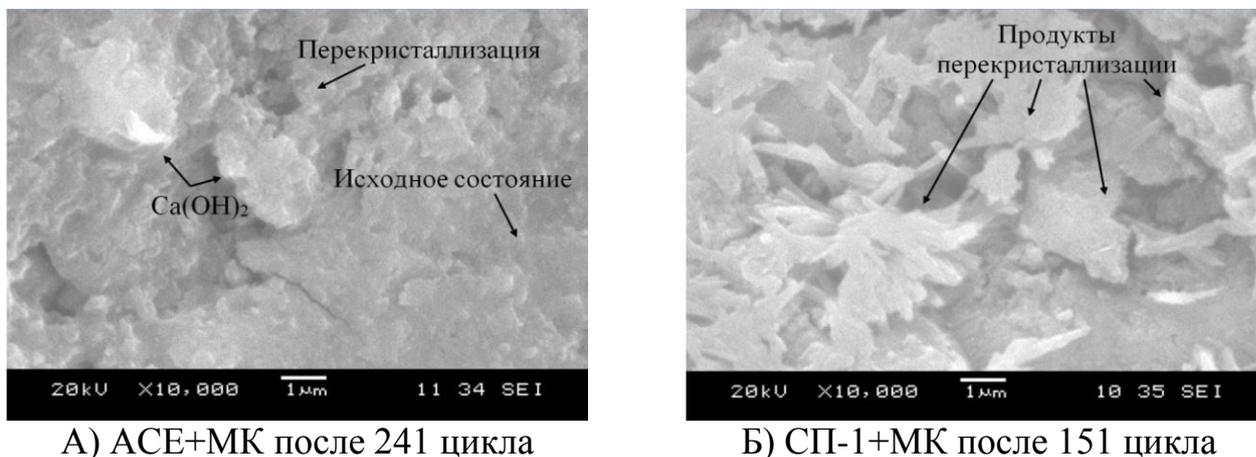


Рисунок 59 – Структура гидратных фаз в бетоне после циклических нагружений при уровне $0,9 R_{пр}$

Модифицирование бетона добавками СП-1 и МК не позволяет формировать стойкую при циклических нагружениях структуру. После 151 цикла, при уровне напряжения 90 % призмочной прочности, выявляются процессы кристаллизации и изменения гидратных образований, что свидетельствует об их недостаточной стойкости и стабильности в условиях циклического нагружения. В образцах бетона, выдержавших 241 цикл нагружения при $0,9 R_{пр}$, с добавкой ACE+МК, отмечаются аналогичные явления, но менее выраженные и в более поздний период.

Это связано с действием циклических нагрузок, приводящих, возможно, к частичному перемещению наружных слоёв адсорбционной влаги и переходу её в жидкое состояние с последующим изменением pH среды, что может дестабилизировать низкоосновные гидросиликаты кальция и вызвать их перекристаллизацию с выделением мелкодисперсного портландита.

Электронная микрофотография, выявляющая особенности структуры гидратных фаз цементного камня, для бетона модифицированного ACE и МК,

после 1000 нагружений до $0,8 R_{пр}$, не вызвавших разрушение образца, показана на рисунке 60.

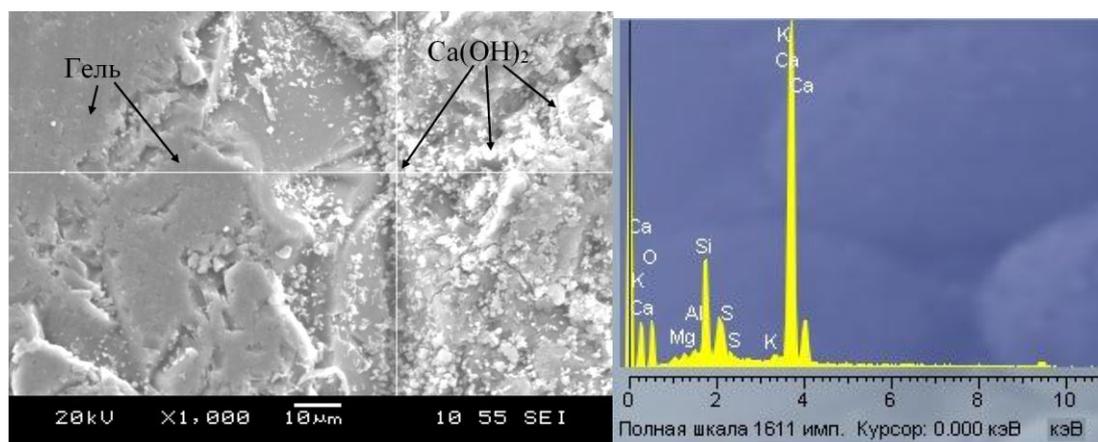


Рисунок 60 – Электронная микроскопия цементного камня бетона с данными рентгеновского микроанализатора в области перекрестия с добавкой АСЕ+МК после 1000 циклов при уровне напряжения $0,8 R_{пр}$

Диссипация механической энергии нагружения бетона и переход её в тепловую энергию приводит к переносу Ca(OH)_2 , после чего происходит кристаллизация портландита в воздушных и контракционных порах. Эти процессы протекают с невысокой скоростью, поэтому структура модифицированного цементного камня сохраняется. Следовательно, при высоком уровне напряжений сжатия первоначально происходит процесс кристаллизации исходных гидросиликатов с последующей их перекристаллизацией и выделением Ca(OH)_2 в поровом пространстве.

Выводы по главе 4

1. Установлено, что наибольшее повышение прочности бетона на 45–50 %, по сравнению с бездобавочным составом, в возрасте 28 суток нормального твердения при постоянном $V/C=0,31$ достигается при направленном формировании слабозакристаллизованной структуры гидратных фаз за счет введения поликарбоксилатного суперпластификатора и микрокремнезема.

2. Добавки АСЕ и МК ускоряют набор прочности бетона в нормальных условиях – так суточная прочность на сжатие составляет 38 МПа, что превышает этот показатель для СП-1 и МК на 36 %, а для бездобавочных образцов – на 68 %.

3. Основной причиной повышения морозостойкости тяжелого бетона, при постоянной величине В/Ц, является одновременная пуццоланизация и аморфизация структуры цементного камня, что подтверждается увеличением марки по морозостойкости с F₂100 до F₂300 с добавками СП-1 и МК и до F₂500 с добавками АСЕ и МК, по сравнению с морозостойкостью образцов бетона без добавок.

4. Слабозакристаллизованная структура цементного камня в бетоне с низким В/Ц при испытании морозостойкости способствует медленному насыщению образцов жидкой фазой, под диффузионным контролем, поэтому в процессе испытания масса образцов не снижается, а повышается.

5. Образцы бетона с СП-1 и МК, подвергаемые низкотемпературному циклическому замораживанию в солевом растворе и выдерживаемые в этом растворе без циклических воздействий, характеризуются практически одинаковой величиной приращения массы до тех пор, пока под влиянием замораживания структура цементного камня не начинает перекристаллизовываться, что сопровождается резким повышением скорости насыщения, перед снижением прочностных характеристик.

6. Изменение кинетики насыщения, под влиянием структурных превращений, повышает точность определения марки бетона по морозостойкости и этот принцип может быть использован для создания ускоренного метода определения морозостойкости бетона.

7. Структура цементного камня в бетоне, модифицированного поликарбоксилатным пластификатором и микрокремнеземом, состоящая преимущественно из слабозакристаллизованных гидросиликатов кальция, типа С–S–Н(І) с C/S<1,5, не изменяется после 80 циклов испытания морозостойкости по третьему ускоренному методу.

8. В бетонах с низким В/Ц практически отсутствует свободная влага и процессы льдообразования не фиксируются при первых циклах испытания на морозостойкость, поэтому можно предполагать, что механизм деструкции бетона связан с термическими напряжениями.

9. Стойкость тяжелых бетонов, модифицированных АСЕ и МК, к механическим циклическим нагрузкам, при уровне напряжений более 80 % $R_{пр}$, повышается на 37 %, за счет формирования низкоосновной слабозакристаллизованной структуры гидратных фаз цементного камня.

10. Даже при самой эффективной модификации циклическое нагружение вызывает перекристаллизацию гидросиликатных фаз с выделением тонкодисперсных кристаллов портландита в поровом пространстве.

Глава 5 Технология и эффективность изделий из морозостойких бетонов

Для организации транспортных коридоров, соответствующих международным стандартам, и их интеграции с евразийской инфраструктурой необходимо строительство опорной сети автомобильных дорог и аэродромов на территории северной строительно-климатической зоны Российской Федерации [270]. В большинстве стран такие задачи решаются за счет развития технологии монолитного и сборного цементобетона [42, 87, 95, 151]. Необходимо адаптировать эти технологии с использованием модифицированных бетонов для суровых условий эксплуатации Арктики, Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока.

5.1 Ускорение твердения бетона

Для сборной технологии характерно применение тепловлажностной обработки для повышения производительности труда. Используемый для установления режима тепловой обработки состав бетона с оптимальной дозировкой модификаторов приведен в таблице 22.

Таблица 22 – Соотношение компонентов бетона с оптимальной дозировкой модификаторов

ЦЕМ I 42,5Н	Мелкий заполнитель	Крупный заполнитель	Микрокремнезем	АСЕ	Вода
Доля компонентов					
1	1,6	2,2	0,08	0,01	0,31
Расход в килограммах на 1 м ³ бетонной смеси					
480	770	1060	38,4	4,8	148

Национальные стандарты нормируют отпускную прочность дорожных плит более 90 % от требуемой прочности в холодный период года и более 70 % в остальное время [115, 247]. Таким образом, для класса бетона по прочности при сжатии В60 требуемая прочность должна быть более 78,6 МПа, соответственно, отпускная прочность 70 % от класса составит 55 МПа, а 90 % – 70,7 МПа [220, 236]. Данные по набору прочности бетонов при разной дозировке добавки АСЕ и режимах ТВО приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Зависимость отпускной прочности от режима пропаривания и дозировки поликарбонатного пластификатора

Максимальная температура, °С	Режим пропаривания, ч: предварительная выдержка при 20 °С +нагрев до максимальной температуры + выдержка при максимальной температуре + охлаждение до 40 °С	Прочность бетона с 8 % микрокремнезема и дозировкой пластификатора MasterGlenium ACE 430			
		0,9 %		1 %	
		МПа	% от требуемой	МПа	% от требуемой
50	3+4+5+4	54,9	69,8	58,4	74,3
	3+4+6+4	57,9	73,7	59,8	76,1
	3+4+7+4	60,5	77,0	60,2	76,6
60	3+3+4+4	63,2	80,4	69,9	88,9
	3+3+5+4	65,4	83,2	74,8	95,2
	3+3+6+4	67,6	86,0	75,8	96,4
70	3+3+4+4	68,5	87,2	78,7	100,1
	3+3+5+4	68,6	87,3	77,4	98,5
	3+3+6+4	65,4	83,2	78,9	100,4

Из полученных данных следует, что добавка поликарбонатного суперпластификатора в дозировке 0,9 % не позволяет достигнуть величины отпускной прочности 90 %. Но такой дозировки АСЕ достаточно для получения 70 % отпускной прочности при этом минимальной необходимой температурой изотермической выдержки является 50 °С. Полученные режимы ТВО с дозировкой АСЕ 0,9 % от массы цемента и соответствующие им отпускные прочности бетона приведены на рисунке 61.

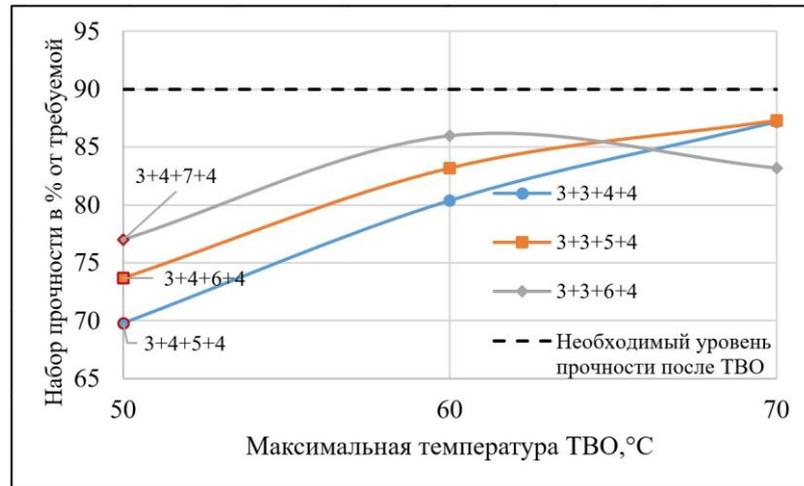


Рисунок 61 – Отпускная прочность бетона при разных режимах пропаривания, дозировка АСЕ 0,9 %

Для обеспечения отпускной прочности бетона не ниже 90 % требуется увеличить количество поликарбоксилатного пластификатора до 1 % (см. рисунок 62).

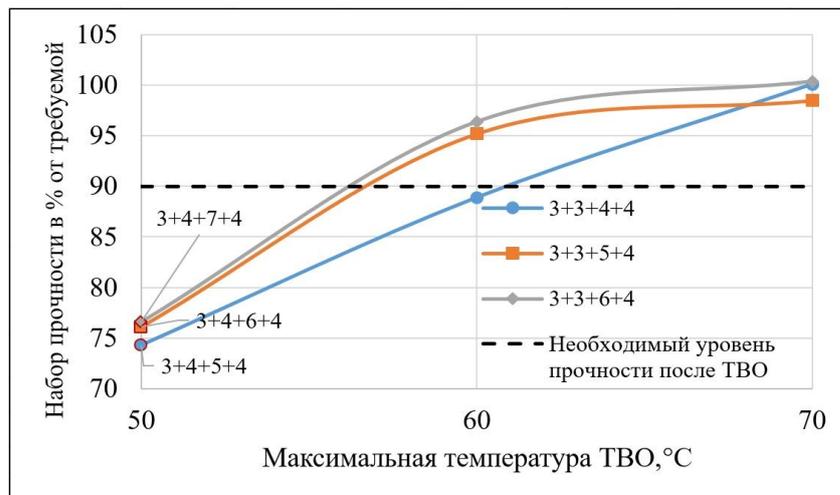


Рисунок 62 – Отпускная прочность бетона при разных режимах пропаривания, дозировка АСЕ 1 %

Прочность пропаренного бетона возрастает с увеличением продолжительности пропаривания и максимальной температуры изотермической выдержки, также существенное влияние оказывает дозировка пластификатора. Температура выше 60 °C незначительно влияет на повышение прочности, но увеличивает расход тепловой энергии и повышает дефектность бетона, вследствие повышения давления паровоздушной смеси на стадии разогрева [66].

Оптимизация режимов пропаривания производилась по критерию минимальных энергозатрат, за счет снижения максимальной температуры и времени тепловой обработки изделий, при достижении требуемой отпускной прочности (см. таблицу 24) [247].

Таблица 24 – Выбранные оптимизированные режимы пропаривания

Температура изотермической выдержки, °С	Дозировка поликарбоната, %	Режим пропаривания, 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

Скорость изменения температуры при нагревании и охлаждении не должна превышать 25 °С в час [247]. Несоблюдение этого требования может привести к повышению пористости и снижению характеристик стойкости бетона. Время предварительной выдержки изделий перед пропариванием должно быть не меньше конца схватывания цементного теста, в данном случае 3 ч.

Для уменьшения затрат на энергоносители эффективно применять термосные режимы с разогревом до максимальной температуры без изотермической выдержки, с последующим остыванием изделий совместно с хорошо утепленной камерой, при этом скорость остывания должна быть не более 3 °С в час, см. рисунок 63 [258].

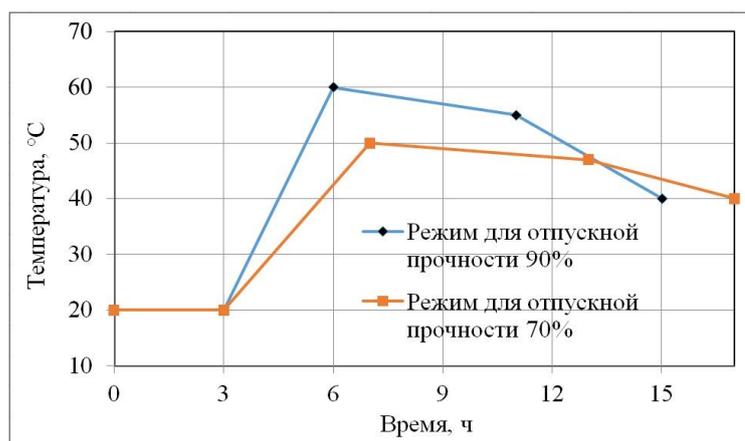


Рисунок 63 – Термосные режимы пропаривания

Данные испытаний образцов бетона с разными условиями твердения показаны в таблице 25.

Таблица 25 – Испытания нормируемых свойств бетона дорожных покрытий

Свойство	Значение			
	Показатели пропаренных бетонов		Свойства образцов нормального твердения	
	3+4+6+4 ч. при 50 °С	3+3+5+4 ч. при 60 °С		
Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте:	–			
1 сутки	57,9 (73,7 %)	74,8 (95,2 %)	38,2 (48,6 %)	
28 суток	87,3	92,4	95,2	
Класс бетона по прочности	В70			
Подвижность (осадка конуса), см	(3±1)	(4±1)		
Коэффициент уплотнения бетонной смеси	не менее 0,98			
Средняя плотность бетона, кг/м ³	2482	2480	2490	
Марка по	морозостойкости	F ₂ 300	F ₂ 300	F ₂ 500
	водонепроницаемости	W14	W14	W16
	истираемости при испытании на круге истирания	G1 (0,26 г/см ²)		

Таким образом, применение ТВО негативно влияет на стойкость и проницаемость бетона, хотя и позволяет получать большую прочность в ранние сроки твердения.

5.2 Монолитные дорожные покрытия

Технологическая схема производства работ при устройстве монолитного покрытия автомагистралей показана на рисунке 64.

Все материалы для бетона дорожных покрытий должны соответствовать требованиям национальных стандартов [229, 263, 269]. Марка по удобоукладываемости бетонной смеси для монолитных покрытий устанавливается П1, а дозирование щебня, с наибольшей крупностью 20 мм, осуществляется пофракционно.

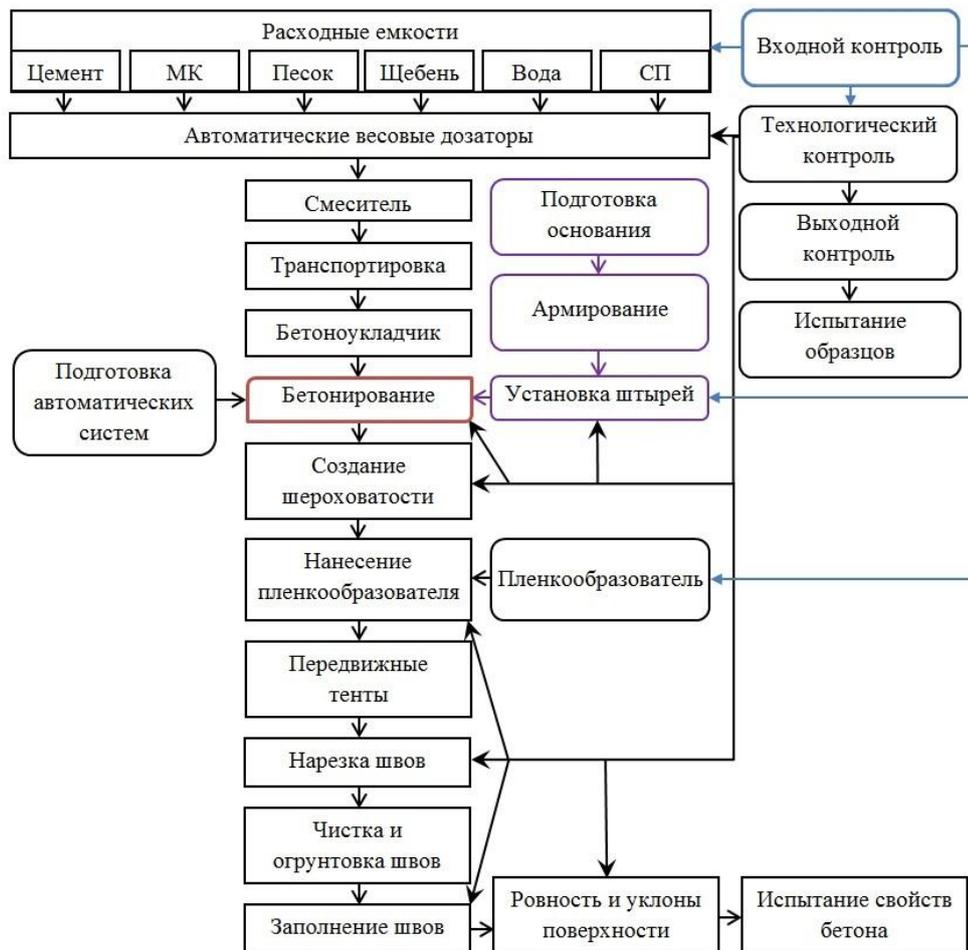


Рисунок 64 – Технологическая схема изготовления монолитного бетонного покрытия

Состав бетонной смеси, перед выдачей в производство, оценивается на соответствие требованиям ГОСТ 7473-2010 и проверяется опытным бетонированием с установлением качества бетона и характеристик уложенного бетоноукладчиком слоя бетонной смеси [209].

Этапы технологии монолитных покрытий:

1. Изготовление бетонной смеси должно осуществляться на автоматизированных предприятиях с весовыми дозаторами с погрешностью взвешивания до 2 % для заполнителей и до 1 % для остальных компонентов. Современные циклические бетоносмесители для снижения продолжительности перемешивания при высокой однородности бетонной смеси оборудованы устройствами, позволяющими осуществлять движение компонентов бетона во встречных потоках, подачу воды затворения через форсунки и коррекцию

дозировки воды на влажность заполнителей. Показатель удобоукладываемости бетонной смеси с пластифицирующими добавками зависит от длительности процесса перемешивания. Рекомендуется 5 мин., с экспериментальной проверкой. Разгрузка смесителя в транспортные устройства должна производиться с высоты менее 0,5 м. Транспортировка бетонной смеси допускается только в автотранспорте, который обеспечивает её защиту от вредного воздействия окружающей среды, пыли и испарения влаги. Длительность транспортировки зависит от температуры воздуха и составляет не более 30 мин при 20–30 °С и не более 60 мин при 10–20 °С. После транспортировки удобоукладываемость бетонной смеси не должна измениться, а также визуально не иметь признаков расслоения – отслоение воды и неравномерное распределение крупного заполнителя.

2. Перед укладкой бетонной смеси основание очищается от пыли, грязи и посторонних предметов, а также оно не должно находиться в переувлажненном или замороженном состоянии.

3. Укладка бетонных слоев синхронизируется в скользящих формах, со строгим соответствием скорости перемещения бетоноукладчика и удобоукладываемости бетонной смеси (см. таблицу 26).

Таблица 26 – Допустимая скорость перемещения бетоноукладчика при различной удобоукладываемости бетонной смеси

Скорость, м/мин	Удобоукладываемость ОК, см [263]
≤ 2	≤ 2
От 2 до 2,5	≤ 3
От 2,5 до 3	≤ 4

Контроль степени уплотнения бетонной смеси осуществляется ежесменно. База автоматической системы задания проектных вертикальных отметок не должна иметь отклонение от проекта более ± 2 мм. Бетоноукладчик должен перемещаться непрерывно, с постоянной скоростью при укладке, уплотнении и отделке свежееположенной бетонной смеси. Для улучшения сцепления дорожного

покрытия с колесами автотранспорта на поверхность дорожного покрытия, после отделки бетонной смеси, стальной щеткой наносятся бороздки глубиной не менее 1 мм. Устройство железобетонных покрытий сопровождается контролем проектного положения арматуры перед бетонированием. Предварительно, до бетонирования, необходимо установить в швах стальные штыри, предотвращающие вертикальные смещения плит дорожных покрытий.

4. После окончания отделки дорожного покрытия, на его поверхность наносится в два слоя пленкообразующее покрытие с расходом не менее 300 г/м², для предотвращения испарения воды из бетона. Продолжительность ухода не менее 28 суток. Целое пленочное покрытие должно быть светлое и твердое. При повреждении пленочного покрытия его восстанавливают [253].

Свежеуложенный бетон, до нарезки швов, защищается от солнечной радиации, дождя и снижения перепада суточной температуры передвижными тентами длиной не менее сменной захватки.

Пробная нарезка деформационных швов производится при прочности бетона не допускающей выкрашивание кромок более, чем на 3 мм. После резки осуществляется мойка швов водой под давлением, с последующей чисткой и обдувкой горячим воздухом с температурой менее 60 °С. В очищенные швы устанавливаются прокладки, стенки швов грунтуются, устанавливается резиновый шнур и шов заделывается нетвердеющей мастикой.

5. В соответствии с национальными стандартами осуществляется трехступенчатый контроль качества.

Первая ступень – входной контроль качества применяемых материалов.

Вторая ступень – контроль технологических операций по приготовлению, транспортированию, укладке и уплотнению бетонной смеси. К контролируемым параметрам относится точность дозирования, режимы приготовления, коэффициент бетонной смеси ($\geq 0,98$) при заданных параметрах уплотнения, а также правильность армирования, устройства швов, качество кромок, сплошность поверхности дорожного покрытия и уход за бетоном.

Третья ступень – приёмочный контроль. Ежедневно испытывается прочность бетона по контрольным образцам на сжатие и растяжение при изгибе. При подборе состава бетона, а также при изменении материалов и технологии, но не реже одного раза в квартал, определяется марка по морозостойкости. В процессе бетонирования периодически производится контроль ровности и уклонов поверхности бетонного покрытия аттестованной рейкой длиной 3 м.

Когда швы в бетонных плитах загерметизированы, а прочность бетона составляет более 70 % от проектной, тогда можно допустить движение транспортных средств.

5.3 Сборные дорожные покрытия

Схема производства предварительно напряженных железобетонных дорожных плит показана на рисунке 65.

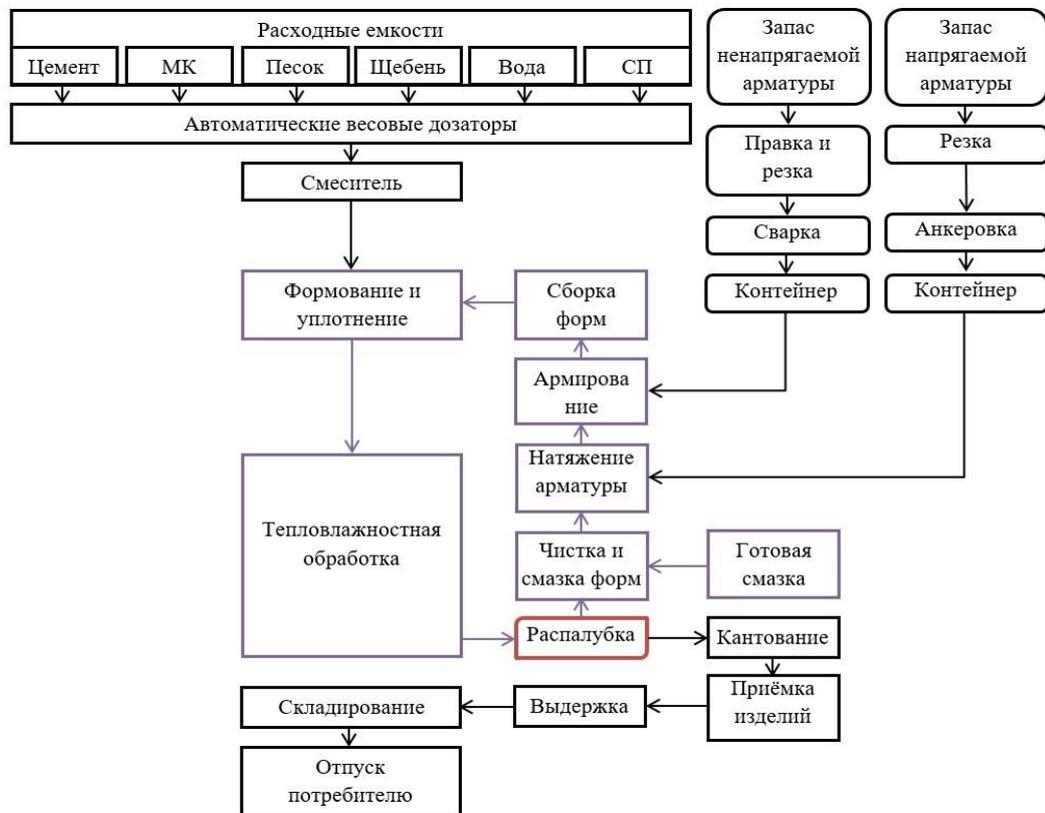


Рисунок 65 – Схема технологического процесса дорожных плит

Для обеспечения стойкости и прочности железобетонных дорожных плит, особенно в суровых условиях эксплуатации, следует подбирать качественные материалы, свойства которых не изменяются в процессе производства и удовлетворяют требованиям национальных стандартов [229, 238, 247]. Бетонная смесь приготавливается в автоматизированных бетоносмесительных установках со смесителями принудительного перемешивания. Такие смесители, корректирующие количество подаваемой воды в зависимости от влажности заполнителей, обеспечивают однородное перемешивание без флокулообразования.

Напрягаемая арматура класса А800, диаметром 14 мм, обеспечивает предварительное напряжение 590 МПа. Ненапрягаемая арматура из свариваемой стали класса А500.

Технологическая линия работает по поточно-конвейерной технологии. Перемещение форм по технологическим постам осуществляется роликовыми конвейерами. Силовые формы с вилочными упорами, палуба из рифленой стали для изготовления плит лицевой поверхностью вниз. На посту подготовки форм механизировано производится их чистка и смазка под разряжением для предотвращения выброса пыли в помещение цеха. Натяжение арматуры осуществляется механическим способом, гидродомкратом с насосной станцией, и контролируется автоматически по удлинению и усилию натяжения. Сварная ненапрягаемая арматура, закладные детали и монтажные приспособления устанавливаются и фиксируются манипуляторами. Формы собираются специализированными механизмами, закрываются и запираются борта. Перед бетонированием составляется акт скрытых работ в котором отмечается положение и сортамент применяемой арматуры, и их соответствие проектным требованиям.

Формование изделия осуществляется механизировано с использованием бетоноукладчика и питателя для равномерного распределения бетонной смеси по площади формы. Для уплотнения бетонной смеси используются эффективные ударно-вибрационные площадки, формы к которым крепятся магнитами. Обязательным контролируемым параметром при формовании является степень

уплотнения бетонной смеси, с коэффициентом уплотнения не менее 0,98 [266]. Тепловая обработка изделий осуществляется в малоинерционной ямной камере за счет эффективной теплоизоляции, оборудованной автоматическими стойками, системой циркуляции пара, обратным клапаном для удаления воздуха и создания паровой среды, обеспечивающей повышенную морозостойкость бетона. Режим тепловой обработки принимается: длительность разогрева не менее 4 часов, максимальная температура не более 60 °С и остывание в камере не менее 3 часов. Распалубка изделий начинается с обрезки напрягаемой арматуры пилами трения, затем осуществляется механизированное открывание бортов, строповка и съём изделий с помощью автоматической траверсы. После распалубки изделия поступают на кантователь, осуществляется приемка и маркировка изделий, а перед вывозом на открытый склад готовой продукции изделие выдерживается при (20 ± 2) °С в цехе не менее 10 часов. Раз в сутки производится испытание изделий на прочность, жесткость и трещиностойкость [212].

Основными технологическими особенностями производства дорожных плит следует считать высокое постоянное качество материалов, эффективное приготовление бетонной смеси, механизация и автоматизация всех технологических операций.

5.4 Технико-экономическая эффективность

В рецензируемых научных публикациях отмечается целесообразность и экономичность использования цементобетонных монолитных и сборных покрытий, по сравнению с традиционными покрытиями, причем не только для суровых, но и для любых других условий эксплуатации [14, 91, 107, 146].

Экономическая эффективность высокоморозостойкого бетона оценивалась по расходам на материалы, которые сравнивались с аналогами из бетона класса В60 и марки по морозостойкости F₂₅₀₀ (см. таблицы 27–29 и рисунок 66). Для

проведения этого сравнения из публикаций выбран состав высокофункционального бетона №5 с добавками СП-1 и МК и высокопрочный бетон с микрокремнеземом и комплексом Sika, включающим пластификатор и воздухововлекающую добавку (high strength concrete+air entrained admixture) [114, 163].

Таблица 27 – Затраты на материалы для 1 м³ разработанной бетонной смеси

Компонент	Ед. изм.	Норма расхода	Цена (без НДС), руб.	Стоимость, руб.
ЦЕМ I 42,5Н	т	0,48	5000	2400
Песок	т	0,77	290	223
Щебень	т	1,06	450	477
Вода	м ³	0,148	17,39	3
Микрокремнезем	т	0,0384	15 000	576
MasterGlenium ACE 430	кг	4,8	165	792
Итого:				4471

Таблица 28 – Затраты на материалы для 1 м³ бетона, с добавками СП-1 и МК, состав №5 [114]

Компонент	Ед. изм.	Норма расхода	Цена (без НДС), руб.	Стоимость, руб.
ЦЕМ II/A-III 32,5Н	т	0,55	4200	2310
Песок	т	0,49	290	142
Щебень	т	1,148	380	436
Вода	м ³	0,154	17,39	3
Микрокремнезем	т	0,11	15 000	1650
СП-1	кг	11	65	715
Итого:				5256

Таблица 29 – Затраты на материалы для 1 м³ бетона аналога с добавками Sika [163]

Компонент	Ед. изм.	Норма расхода	Цена (без НДС), руб.	Стоимость, руб.
ЦЕМ I 42,5Н	т	0,407	5000	2035
Песок	т	0,877	290	254
Щебень	т	1,1	450	495
Вода	м ³	0,122	17,39	2
Микрокремнезем	т	0,102	15 000	1530
Sika AER	кг	0,61	63	38
Sikament RMC 310	кг	6,1	180	1098
Итого:				5453

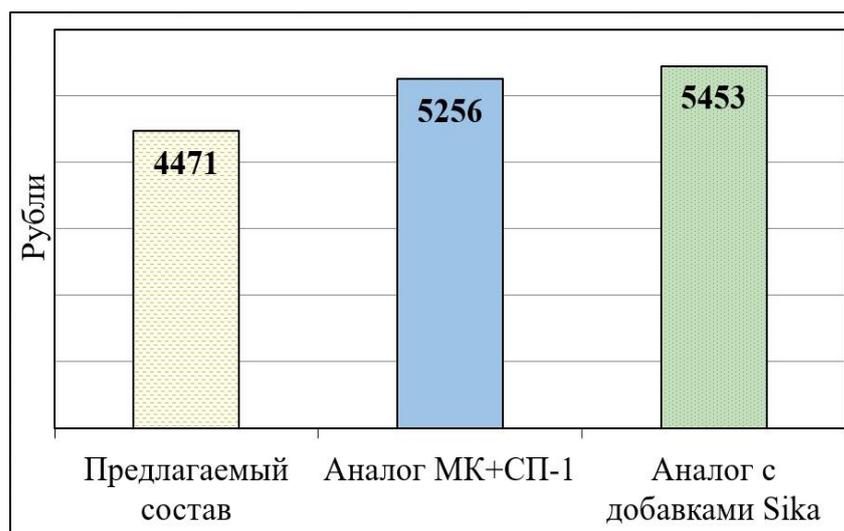


Рисунок 66 – Затраты на материалы для производства 1 м³ бетонной смеси

Экономическая целесообразность разработанного состава бетона подтверждается снижением расходов на материалы для 1 м³ бетонной смеси на 785 рублей, по сравнению с бетоном модифицированным микрокремнеземом и СП-1.

5.5 Опытнo-промышленное внедрение

Разработанная в диссертационной работе технология бетонов использовалась для устройства сборных дорожных покрытий в Белгородской области с индустриальным партнером ООО «Инновационные технологии в строительстве» и в г. Челябинске с ООО «Опытный завод «УралНИИСтром».

При опытнo-промышленном внедрении совместно с ООО «Инновационные технологии в строительстве» бетон соответствовал классу по прочности при сжатии В60, марке по морозостойкости F₂₅₀₀, по водонепроницаемости W14 и по истираемости G1. Предложенные принципы формирования бетона были включены в СТО 68632639-001-2013 «Система плит сборного дорожного покрытия. Технические условия».

Предприятием-партнером запатентована конструкция плит габаритами 6000×3500×130 мм и весом 7,5 тонн, предусматривающая натяжение арматуры на бетон (см. рисунок 67).



Рисунок 67 – Железобетонные плиты перед укладкой в дорожное полотно

Эти плиты по своим характеристикам превышают требования стандарта ГОСТ Р 52748-2007 – допустимая нагрузка на ось увеличена с 11,5 до 20 тонн [243]. На экспериментальном участке пути укладка плит осуществлялась в один ряд, в соответствии с СП 99.13330.2016 [264]. Строительство проводилось в

Белгородской области между поселками Бродок и Новая Нелидовка, за собственные средства исполнителя. В результате, построен опытный участок дороги протяженностью 200 метров и площадью 630 м² (см. рисунок 68).



Рисунок 68 – Готовое сборное покрытие

При строительстве выполнены следующие операции: размечен участок для проведения земляных работ; срезан гумусовый слой; произведена выемка грунта и насыпан слой щебня; выравнивание слоя щебня и укладка слоя песка толщиной 150 мм; установка гидроизолирующей пленки и дорожных плит; протягивание канатной арматуры и её натяжение на бетон; герметизация арматуры битумно-полимерным составом; организация обочин.

Монтаж плит осуществлялся автокраном, весом 23 тонны, который при работе опирался на уложенные ранее плиты (см. рисунок 69).



Рисунок 69 – Монтаж дорожных плит автокраном

Для проверки прочности дорожного покрытия после завершения строительства по нему был организован проезд грузовиков массой до 30 тонн.

По решению рабочей группы Министерства Транспорта Российской Федерации, под руководством заместителя министра, железобетонные плиты включены в Перечень инновационной продукции гражданского назначения и рекомендованы к государственным закупкам [256]. В приложении Б помещен акт о внедрении.

Дорожные плиты из бетона разработанного состава совместно с ООО «Опытный завод «УралНИИСтром» были внедрены на территории г. Челябинска, при строительстве подъездного пути к заводу, рисунок 70.



Рисунок 70 – Формование дорожной плиты

Для опытной партии плит и их использования для дорожных покрытий был разработан проект стандарта организации «Плиты железобетонные дорожные из высокоморозостойкого бетона», где прописаны параметры основных технологических операций. Применяемый бетон соответствует классу по прочности на сжатие В60, на осевое растяжение В_т4,5 и на растяжение при изгибе В_{тб}8,4. В работе использовались местные материалы, соответствующие требованиям национальных стандартов [229, 236, 247]. После распалубки бетонные плиты твердели в нормальных условиях в течение 28 суток, совместно с контрольными образцами, по испытанию которых определялись свойства бетона. Акт о внедрении приведен в приложении Б.

Выводы по главе 5

1. Разработаны и испытаны оптимальные режимы термосной тепловой обработки плит дорожных покрытий:

– для зимнего периода года с отпускной прочностью 95,2 % от требуемой, с дозировкой поликарбоксилатного пластификатора 1 %, при максимальной температуре прогрева 60 °С 3+3+4+5 ч.

– для остального времени года с отпускной прочностью 73,7 % от требуемой, с дозировкой поликарбоксилатного пластификатора 0,9 %, при максимальной температуре прогрева 50 °С 3+4+6+4 ч.

2. Предложены технологические схемы, в которых предполагается тщательное выполнение всех технологических переделов и трехступенчатый контроль качества при производстве из цементобетона сборного и монолитного дорожного покрытия.

3. Экономический эффект, величиной 785 рублей, рассчитан исходя из затрат на материалы для изготовления 1 м³ разработанной бетонной смеси и аналогов с эксплуатационными характеристиками – В60 и F₂500.

4. Осуществлено два опытно-промышленных внедрения, совместно с предприятиями-партнерами, которые обеспечивали изготовление дорожных плит по технологии, разработанной в диссертации.

5. Составлены акты внедрения, подтверждающие получение необходимых технических параметров бетона для плит покрытий.

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 F_{2500} , водонепроницаемости W_{16} и с водопоглощением по массе W_m 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 $V/C=0,31$ и подвижности П1 введение в бетонную смесь водоредуцирующих добавок не обеспечивает марку по морозостойкости тяжелого бетона свыше F_{2150} , при совместном введении СП-1 и МК – F_{2300} , 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 F_{2500} .

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 АСЕ 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 АСЕ 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.

Список сокращений

- АМД – активные минеральные добавки;
- АСЕ – поликарбоксилатный суперпластификатор MasterGlenium ACE 430;
- В/В – отношение массы воды к массе вяжущего;
- В/Ц – отношение массы воды к массе цемента;
- С–S–Н – частично закристаллизованный гидросиликатный гель разной степени основности с $C/S=0,8-2$ [35];
- С–S–Н(I) – частично закристаллизованный низкоосновный гидросиликатный гель с $C/S < 1,5$ [35];
- С–S–Н(II) – частично закристаллизованный высокоосновный гидросиликатный гель с $C/S \geq 1,5$ [35];
- ДТА – дифференциально-термический анализ;
- Контрольные образцы – образцы бетона, не подвергавшиеся циклическим воздействиям [213];
- ЛСТ – лигносульфонат натрия технический;
- МБ – модификатор бетона [245];
- МК – микрокремнезём;
- НГ – нормальная плотность цементного теста;
- НК – наибольшая крупность зёрен щебня;
- Основные образцы – образцы бетона, подвергавшиеся циклическим воздействиям [213];
- ПАВ – поверхностно активные вещества;
- РФА – рентгенофазовый анализ;
- СП – суперпластификатор;
- ТВО – тепловлажностная обработка;
- ЦЗО – циклическое замораживание и оттаивание;
- ЦК – цементный камень.

Список литературы

1. Алексеев, С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоны / С.Н. Алексеев. – М. : Стройиздат, 1968. – 231 с.
2. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
3. Алмазов, В.О. Особенности поведения тяжелых бетонов в условиях Арктики / В.О. Алмазов, З.А. Амирасланов // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2014. – №1 (274). – С.48–55.
4. Аль-Ахмади Мухаммед Ахмед Али. Свойства керамзитобетона и конструкций на его основе при предварительном напряжении и повторных нагружениях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Аль-Ахмади Мухаммед Ахмед Али. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2003. – 26 с.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. – 353 с.
6. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М. : АСВ, 2006. – 368 с.
7. Баландина, И.В. Термический удар в дорожных бетонах при использовании антиобледенителей / И.В. Баландина // Научное обозрение. – 2016. – № 22. – С.68–72.
8. Батраков, В.Г. Применение суперпластификаторов в бетоне / В.Г. Батраков, Ф.М. Иванов, Е.С. Силина и др. // Обзорная информация ВНИИИС. – 1982. – Серия 7. – Вып. 2. — 5 с.
9. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков. – М. : Стройиздат, 1990. – 400 с.

10. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1962. –96 с.
11. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 206 с.
12. Бойко, В.Г. Зависимость между маркой бетона по морозостойкости и долговечностью конструкций / В.Г.Бойко, С.Ю.Калугин, А.В.Ушеров-Маршак // Сборник научных трудов по материалам национальной научно-технической конференции с международным участием «Физико-химические процессы в строительном материаловедении». – Новосибирск, 2018. – С.83–92.
13. Бугрим, С.Ф. К вопросу замерзания воды в капиллярно-пористых телах / С.Ф. Бугрим, Е.И. Слепокуров, С.П. Мухаметгалеева // Способы строительства и материалы, применяемые при нефтегазовом строительстве в условиях Севера. – М. : Стройиздат, 1980. – С.89–96.
14. Буров, М.П. Строительство и эксплуатация дорог, пути повышения их долговечности и экономичности / М.П. Буров // Инновации в строительстве и строительной индустрии: Сборник научных трудов руководителей научных направлений, молодых ученых, руководящих работников и специалистов системы Комплекса градостроительной политики и строительства города Москвы. – Москва, 2013. – Вып. 55. – С.11–20.
15. Бутт, Ю.М. Твердение вяжущих при повышенных температурах / Ю.М. Бутт, Л.Н. Рашкович. – М. : Стройиздат, 1965. – 248 с.
16. Бутт, Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М. : Высшая школа, 1980. – 472 с.
17. Вербек, Г.Д. Структура и физические свойства цементного камня / Г.Д. Вербек, Р.А. Хельмут // Пятый межд. Конгресс по химии цемента. – М. : Стройиздат, 1973. – С.250–270.
18. Власов, О.Е. Долговечность ограждающих и строительных конструкций / О.Е. Власов. – М. : Госстройиздат, 1963. – 115 с.
19. Вовк, А.И. Суперпластификаторы в бетоне: анализ химии процессов / А.И. Вовк // Технологии бетонов. – 2007. – №2. – С.8–9.

20. Вовк, А.И. Гидратация C_3S и структура С–S–Н-фазы: новые подходы, гипотезы и данные / А.И. Вовк // Цемент и его применение. – 2012. – №3. – С.89–92.
21. Волженский, А.В. О процессах твердения цемента и их влиянии на микроструктуру и некоторые другие физические и механические свойства образующегося камня / А.В. Волженский // VI Конференция по бетону и железобетону. – М. : Стройиздат, 1966. – С.3–9.
22. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества: (технология и свойства). Учебник для вузов / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – 3-е изд. переработ. и доп. – М. :Стройиздат, 1979. – 476 с.
23. Волженский, А.В. Влияние дисперсности портландцемента и В/Ц на долговечность камня и бетонов / А.В. Волженский // Бетон и железобетон. – 1990. – №10. – С.16–17.
24. Воробьев, В.А. Строительные материалы / А.В. Воробьев, А.Г. Комар. – М.:Стройиздат, 1971. –496 с.
25. Гамалий, Е.А. Комплексные модификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и активных минеральных добавок для тяжелого конструкционного бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Гамалий Елена Александровна. – Челябинск.: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 22 с.
26. Гамалий, Е.А. Структура и свойства цементного камня с добавками микрокремнезема и поликарбоксилатного пластификатора / Е.А. Гамалий, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «строительство и архитектура». – 2009. – Вып.8. – №16 (149). – С.29–35.
27. Гамалий, Е.А. Влияние поликарбоксилатного суперпластификатора на структуру и свойства цементного камня при циклическом замораживании и оттаивании / Е.А. Гамалий, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Технологии бетонов. – 2013. – №6. – С.28–30.

28. Гвоздев, А.А. Прочность, структурные изменения и деформации бетона / А.А. Гвоздев, А. В. Яшин, К.В. Петрова, И.К. Белоборов, Е.А. Гузеев. – М. : Стройиздат, 1978. – 299 с.
29. Голубых, Н.Д. Методы оценки стойкости бетона в суровых климатических условиях и агрессивных средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Н.Д. Голубых. – М.: 1974. – 21 с.
30. Городницкий, Ф.М. Выносливость арматуры железобетонных конструкций / Ф.М. Городницкий, К.В. Михайлов. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1972. –152 с.
31. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г.И. Горчаков, М.М. Капкин, Б.Г. Скрамтаев. – М. : Стройиздат, 1965. – 196 с.
32. Горчаков, Г.И. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов / Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов, Л.Н. Терёхин. – М. : Изд-во Стандартов, 1968. – 168 с.
33. Горчаков, Г.И. Строительные материалы: Учеб. Для вузов / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. – М. : Стройиздат, 1986. – 688 с.
34. Горчаков, Г.И. О комплексной характеристике структуры бетона / Г.И. Горчаков, И.А. Иванов // Бетон и железобетон. – 1980. –№6. – С. 22.
35. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: учеб. пособие / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М. : Высш. Школа, 1981. – 335 с.
36. Горшков, В.С. Вяжущие, керамика и стекло-кристаллические материалы. Структура и свойства / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, А.В. Абакумов. – М. : Стройиздат, 1995. – 584 с.
37. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг / перевод с англ. В.А. Эльтекова, Ю.А. Эльтекова / Под ред. К.В. Чмутова. – М. : Мир, 1970. – 407 с.

38. Грушко, И.М. Структура и прочность дорожного цементного бетона / И.М. Грушко, Н.Ф. Глушенко, А.Г. Ильин // Харьков : Изд-во при Харьк. ун-те, 1965. – 136 с.
39. Гузеев, Е.А. Механика разрушения бетона: вопрос теории и практики / Е.А. Гузеев, С.Н. Леонович, К.А. Пирадов. – Брест : БПИ, 1999. –217 с.
40. Дворкин, Л.И. Основы бетоноведения / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Санкт-Петербург: ООО «Строй-Бетон», 2006. – 692 с.
41. Десов, А.Е. Структура, прочность и деформации бетонов / А.Е. Десов. – Издательство литературы по строительству, 1966. – 365 с.
42. Дея, Я. Польский опыт в строительстве дорог с цементобетонным покрытием / Я. Дея // Алитинфом. – 2011. – №5–6. –С.53–64.
43. Добролюбов, Г. Прогнозирование долговечности бетона с добавками / Г. Добролюбов, В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1983. – 213 с.
44. Ерофеев, В.Т. Способы повышения долговечности и надежности железобетонных конструкций / В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми, О.А. Мишуняева // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2016. – №1. – С.13–19.
45. Ерофеев, В.Т. Ударная прочность цементных композитов / В.Т. Ерофеев, В.Д. Черкасов, Д.В. Емельянов, И.В. Ерофеева // Academia. Архитектура и строительство. – 2017. – №4. – С. 89–94.
46. Зайцев, Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. Пособие для строит. Вузов / Ю.В. Зайцев. – М. : Высш. шк., 1991. – 288 с.
47. Закржевский, М.В. Материалы и технологии для строительства, ремонта и продления срока службы цементобетонных покрытий автомобильных дорог / М.В. Закржевский, Н.В. Рубо // Алитинформ «Международное аналитическое обозрение». – 2011. – N 5–6 (22). – С. 68–74.
48. Иванов, Ф.М. Добавка для бетонных смесей – суперпластификатор С-3 / Ф.М. Иванов и др. // Бетон и железобетон. – 1978. – №10. – С. 13–16.

49. Ильина, Л.В. Влияние дисперсных минеральных добавок на прочность мелкозернистого бетона / Л.В. Ильина, С.А. Хакимуллина, Д.А. Кадоркин // Фундаментальные исследования. – 2017. – №4. – С. 34–38.

50. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – №3. – С. 103–106.

51. Калашников, В.И. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В.И. Калашников, М.Н. Мороз, О.В. Тараканов, Д.В. Калашников, О.В. Суздальцев // Строительные материалы. – 2014. – №9. – С. 70–75.

52. Калашников, В.И. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения / В.И. Калашников, В.Т. Ерофеев, О.В. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – №4 (688). – С. 30-37.

53. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов // Бетон и железобетон, 1992. – №7. – С. 4–7.

54. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива / С.С. Каприелов, В.Г. Батраков, А.В. Шейнфельд. // Бетон и железобетон. – 1999. – №6. – С. 6–10.

55. Каприелов, С.С. Высокопрочные бетоны повышенной морозостойкости с органоминеральным модификатором / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Е.С. Силина и др. // Транспортное строительство. – 2000. – №11. – С.24–27.

56. Каприелов, С.С. Уникальные бетоны и технологии в практике современного строительства России / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян, Ю.А. Киселева, О.В. Пригоженко // Проблемы современного бетона и железобетона. – Санкт-Петербург : НП ООО «Стринко», 2007. – т. 2. – С.105–120.

57. Каранфилов, Т.С. Выносливость и деформативность бетона при воздействии многократно повторной нагрузки / Т.С. Каранфилов, Ю.С. Волков // Труды Гидропроекта. – М. : «Энергия», 1965. – сб. 13. – С.87–95.

58. Карпенко, Н.И. К построению общих критериев деформирования и разрушения железобетонных элементов / Н.И. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2002. – №6. – С. 20–24.

59. Кокарев, А.М. Деформации железобетонных призм при малоцикловом повторном и знакопеременном нагружении // Развитие технологии, расчета и конструирования железобетонных конструкций. – М. : Тр. НИИЖБа, 1983. – С.60–63.

60. Комохов, П.Г. Оценка параметров макроструктуры бетона повышенной трещино- и морозостойкости / П.Г. Комохов // Повышение эффективности применения цементных и асфальтовых бетонов в Сибири. – Новосибирск, 1978. – С.40–46.

61. Комохов, П.Г. Механика разрушения в формировании свойств цементного камня и бетона / П.Г. Комохов // Совершенствование технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности. – Уфа, 1985. – С.4–8.

62. Косухин, М.М. Обеспечение долговечности, эксплуатационной надежности, комфортности и экологической безопасности улично-дорожной сети путём использования цементобетонных дорожных покрытий на модифицированном вяжущем / М.М. Косухин, А.М. Косухин, Ю.А. Шарапова, О.Н. Шарапов // Вестник БГТУ. – 2016. – №3. – С.31–37.

63. Крамар, Л.Я. Влияние добавки микрокремнезема на гидратацию алита и сульфатостойкость цементного камня / Л.Я Крамар, Б.Я. Трофимов, Л.С. Талисман, Ф.М. Иванов // Цемент и его применение. – 1989. – №6. – С. 14–15.

64. Крамар, Л.Я. Бетоны высокой сульфатостойкости / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Е.А. Гамалий // Цемент и его применение. – 2011. – №4. – С. 127–134.

65. 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», 2015. – С. 168–175.

66. Крамар, Л.Я. Модификаторы цементных бетонов и растворов (технические характеристики и механизм действия) /Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Т.Н. Черных и др. – Челябинск : Изд-во «ЮУрГУ», 2016 – 145 с.

67. 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. Шулдяков // Строительные материалы. – 2016. – №11. – С.21–25.

68. Крамар, Л.Я. Цементные тяжелые бетоны для строительства скоростных автомобильных дорог / Л.Я. Крамар, А.И. Кудяков, Б.Я. Трофимов, К.В. Шулдяков // Вестник ТГАСУ. – 2017. – №4 (63). – С.147–157.

69. Кудяков, А.И. Совершенствование технологии изготовления базальтофибробетона с повышенной однородностью / А.И. Кудяков, В.С. Плевков, К.Л. Кудяков, А.В. Невский, А.С. Ушакова // Строительные материалы. – 2015. – №10. – С. 44–48.

70. Кудяков, А.И. Технология и состав углеродофибробетона с повышенной однородностью прочностных показателей / А.И. Кудяков, В.С. Плевков, В.В. Белов, А.В. Невский, К.Л. Кудяков // Вопросы материаловедения. – 2016. – №1. – С. 66–72.

71. Кузнецова, Т.В. Цементы алюминатного и сульфоалюминатного твердения / Т.В. Кузнецова // XII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – М. : Наука, 1981. – №5. – 203 с.

72. Кузнецова, Т.В. Микроскопия материалов цементного производства / Т.В. Кузнецова, С.В. Самченко. – М. : МИКХиС, 2007. – 304 с.

73. Лазарев, Ю.Г. Формирование потребительских и эксплуатационных свойств автомобильных дорог / Ю.Г. Лазарев, Д.Л. Симонов, А.Н. Новик // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2016. – №1. – С. 43–47.

74. Леснов, В.В. Исследование свойств цементных композитов, модифицированных поливинилацетатной эмульсией и фиброй «Rіcem» для изготовления каркасных бетонов / В.В. Леснов, В.Т. Ерофеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – №12. – С.3–8.

75. Литвинова, Ю.О. Стратегия развития сети скоростных автомобильных дорог в России до 2030 г. / Ю.О. Литвинова, Ю.Ю. Пономарев // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – №4 (65). – С. 18–21.

76. Магомедэминов, И.И. Оценка морозостойкости крупного заполнителя тяжелых бетонов: автореф. дис. ... д-р. техн. наук: 05.23.05 / Магомедэминов Исафил Искандерович. – Ленинград. – 1981. – 228 с.

77. Маилян, Д.Р. Сопротивление керамзитовофиброжелезобетонных колонн многократно повторным нагружениям / Д.Р. Маилян // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №1. – С.17–23.

78. Макридин, Н.И. Изменение конструкционной прочности модифицированной структуры цементного камня во времени / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, Ю.В. Овсяюкова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – №2. – С. 36–41.

79. Макридин, Н.И. Комплексная оценка механического поведения заполнителей бетона из горных пород / Н.И. Макридин, Ю.П. Скачков, И.Н. Максимова, И.А. Суров // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №3. – С. 18–25.

80. Максимова, И.Н. Структура и конструкционные свойства бетона / И.Н. Максимова, Н.И. Макридин, М.В. Симаков // Региональная архитектура и строительство. – 2008. – №2. – С. 22–27.

81. Малинин, Ю.С. К вопросу о гидратации и твердении портландцемента / Ю.С. Малинин, Л.Я. Лопатникова, В.И. Гусева, Н.Д. Клишанис // Труды

Международной конференции по проблемам ускорения твердения бетона. – Москва, 1968 г. – С.89–90.

82. Морозов, Н.М. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит / Н.М. Морозов, Н.М. Красиникова, И.В. Боровских // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №7. – С.30–38. – doi: 10.5862/MSE.59.3.

83. Москвин, В.М. Экспериментальная проверка некоторых гипотез разрушения бетона при циклическом воздействии отрицательных температур / В.М. Москвин, Н.Д. Голубых // Коррозионная стойкость бетона и стальной арматуры. – М. : Стройиздат, 1974. – вып. 11. – С.50–54.

84. Москвин, В.В. Коррозия бетона и железобетона. Методы их защиты / В.В. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузеев. – М. : Стройиздат, 1980. – 536 с.

85. Москвин, В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций / В.В. Москвин. – М. : Наука, 1981. – 325 с.

86. Несветаев, Г.В. Бетоны: учеб. пособие. – Изд. 2-е, доп. и перераб. / Г.В. Несветаев. – Ростов-на-Дону : «Феникс», 2013. – 381 с.

87. Носов, В.П. Цементобетон в дорожном строительстве. Состояние. Проблемы. Перспективы / В.П. Носов // Международный семинар: Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве. – Москва, 2002. – С.5–9.

88. Пащенко, А.А. Вяжущие материалы / А.А. Пащенко, В.П. Сербин, Е.А. Старчевская. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 440 с.

89. Пащенко, А.А. Теория цемента / А.А. Пащенко. – К. : Будівельник, 1991. – 168 с.

90. Пирадов, К.А. Теоретические и экспериментальные основы механики разрушения бетона и железобетона / К.А. Пирадов – Тбилиси: изд-во «Энергия», 1998. – 355 с.

91. Подгорнова, Е.В. Институциональные факторы перехода к строительству дорог с цементобетонными покрытиями в автодорожном

комплексе России / Е.В. Подгорнова // Экономика и предпринимательство. – 2013. – №11. – С. 517–520.

92. Полак, А.Ф. Влияние дисперсности цемента на прочность его гидрата / А.Ф. Полак, В.В. Бабков // Цемент. – 1980. – №9. – С.15–17.

93. Пухаренко, Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Ю.В. Пухаренко // Строительные материалы. – 2004. – №10. – С.47–50.

94. Пьячев, В.А. Производство и свойства клинкерных цементах / В.А. Пьячев, Ф.Л. Капустин. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 322 с.

95. Радовский, Б.С. Цементобетонные покрытия в США: строительство / Б.С. Радовский // Автомобильные дороги. – 2015. – №4. – С.56–62.

96. Рамачандран, В. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение. Пер. с англ. / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн. – М. : Стройиздат, 1986. – 278 с.

97. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М. : Стройиздат. – 1989. – 187 с.

98. Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости / Н.К. Розенталь. – М. : ФГУП ЦПП, 2006. – 520 с.

99. Рудяк, В.Я. Влияние на прочность мелкозернистого бетона добавок микрокремнезема и диоксида различной дисперсности / В.Я. Рудяк, Л.В. Ильина, С.А. Хакимуллина // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – №12 (696). – С.16–24.

100. Рыскин, М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М.Н. Рыскин. – Минск, 2002. – 42 с.

101. Славчева, Г.С. Влияние структуры высокопрочных модифицированных бетонов на дилатометрические эффекты при их замораживании // Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2015. – №1 (22). – С.53–62.

102. Соловьева, В.Я. Высокоэффективный бетон для проведения дорожно-строительных работ при пониженных температурах / В.Я. Соловьева, М.С. Абу-Хасан, Н.В. Ершиков, Д.В. Соловьев, Е.И. Кукобин // Транспортное строительство. – 2018. – №2. – С.12–15.

103. Соловьева, В.Я. Увеличение срока службы бетона дорожных и аэродромных покрытий / В.Я. Соловьева, М.С. Абу-Хасан, Н.В. Ершиков, Д.В. Соловьев, Г.А. Мираев // Транспортное строительство. – 2018. – №1. – С.15–18.

104. Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. – М. : Госстройиздат, 1960. – 131 с.

105. Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской конференции по бетону и железобетону. – М. : МГСУ, 2014. – т. 3. – С. 430–444.

106. Сычѳв, М.М. Химия отвердевания и формирования прочностных свойств цементного камня / М.М. Сычев // Цемент. – 1978. – №9. – С.4–9.

107. Твардовский, Д.В. Развитие автомагистралей и скоростных автомобильных дорог в России / Д.В. Твардовский // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – №6 (61). – С. 9–14.

108. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер. с англ. / Х. Тейлор. – М. : Мир, 1996. – 560 с.

109. Тимашев, В.В. Избранные труды. Синтез и гидратация вяжущих материалов / В.В. Тимашев. – М. : Наука, 1986. – 424 с.

110. Толмачев, С.Н. Строительство автодорог с цементобетонным покрытием в Украине – реальность сегодняшнего дня / С.Н. Толмачев // Автошляховик України. – 2013. – №4 (234). – С. 36–40.

111. Тринкер, Б.Д. Бетоны высокой морозостойкости для высотных железобетонных сооружений, возводимых в зимнее время / Б.Д. Тринкер // II международный симпозиум по зимнему бетонированию. – т.2. – М. : Стройиздат, 1976. – С.270–281.

112. Трофимов, Б.Я. Принципы повышения стойкости бетона при морозной и сульфатной агрессии путем модифицирования гидратных соединений: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.05 / Трофимов Борис Яковлевич. – Ленинград, 1991. – 50 с.

113. Трофимов, Б.Я. Механизм «старения» гидратных фаз цементного камня при циклическом замораживании / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Популярное бетоноведение. – 2009. – №3. – С.69–83.

114. Трофимов, Б.Я. Дорожные бетоны повышенной морозостойкости / Б.Я. Трофимов, С.П. Горбунов // Цемент и его применение. – 2011. – №6. – С.66–69.

115. Трофимов, Б.Я. Технология сборных железобетонных изделий. Учебное пособие / Б.Я. Трофимов. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 384 с.

116. 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.

117. Трошкина, Е.А. Прогнозирование долговечности бетона с пластифицирующими добавками / Е.А. Трошкина // Достижения, проблемы, перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения. Десятые Академические чтения РААСН. – Казань: Изд-во Казанского архитектурно-строительного университета. – 2006. – С. 396–397.

118. Урханова, Л.А. Модифицирование цементных бетонов нанодисперсными добавками / Л.А. Урханова, П.К. Хардаев, С.А. Лхасаранов // Строительные материалы и технологии. – 2015. – №3 (59). – С.167–175.

119. Ушаков, В.В. Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве / В.В. Ушаков // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2002. – №4. – С. 5–7.

120. Ушеров-Маршак, А.В. Добавки нового поколения / А.В. Ушеров-Маршак // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков : Колорит, 2005. – С. 45–50.

121. Фаликман, В.Р. Итоги III Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону / В.Р. Фаликман // Нанотехнологии в строительстве: Научный интернет-журнал. – Москва: Изд-во «Центр новых технологий «НаноСтроительство», 2014. – том 6. – №3. – С.30–36.

122. Федосов, С.В. К вопросам теории кольматации цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, А.С. Евсяков // Информационная среда ВУЗа. – 2017. – том 1. – №1 (1). – С. 403–407.

123. Федосов, С.В. Методологические принципы моделирования жизненных циклов строительных конструкций на основе теории тепломассопереноса / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Н.А. Грузинцева // Сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума, Международного научно-технического Форума. – Москва, 2017. – С. 22–28.

124. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. – 464 с.

125. Хомич, Л.А. Диаграммы деформирования и свойства самоуплотняющихся бетонов с РД «Эмбэлит» при различных режимах многократно повторного нагружения: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Хомич Леонид Анатольевич – Ростов н/Д., 2015. – 24 с.

126. Черкасов, В.Д. Закономерности влияния полимерных покрытий на стойкость бетона к воздействию циклических механических нагрузок / В.Д. Черкасов, Д.В. Черкасов, В.Т. Ерофеев, И.Э. Кондакова, А.Д. Богатов // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2014. – №4 (21). – С.10–19.

127. Чеховской, Ю. В. Понижение проницаемости бетона / Ю.М. Чеховской. – М.: Энергия, 1968. –192 с.

128. Шеин, А.И. Влияние конструктивного и эксплуатационного отказов на долговечность строительных конструкций / А.И. Шеин, В.В. Зернов, М.Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – №2 (31). – С.64–71.

129. Шейкин, А.Е. Ползучесть при повторных нагрузках и модуль деформации бетона / А.Е. Шейкин. – Труды МИИТ. – М., 1956. – Вып. 85/6. – С.120–123.

130. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М. : Стройиздат. – 1979. – 344 с.

131. Шейнин, А.М. Обеспечение качества бетонной смеси и бетона при строительстве монолитных покрытий и оснований / А.М. Шейнин, С.В. Эккель // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2003. – №2 (25) – С. 18–21.

132. Шпынова, Л.Г. Механизм и долговечность действия некоторых добавок на свойства портландцемента / Л.Г. Шпынова, И.И. Никонец, В.М. Мельник и др. // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 1979. – т.22. – №3. – С.231–244.

133. Штарк, И. Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев: Оранта, 2004. – 301 с.

134. Шульдяков, К.В. Влияние добавки «микрокремнезем – поликарбосилатный 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.

135. Шульдяков, 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.

136. Шульдяков, К.В. Структура и свойства цементного камня с модификаторами / К.В. Шульдяков, 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.

137. Шульдяков, К.В. Высокоморозостойкий бетон без воздухововлечения / К.В. Шульдяков, Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар // Строительные материалы. – 2020. – №6. – С.18–26.

138. Эккель, С.В. Особые требования к цементу для бетона монолитных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов / С.В. Эккель // Технология бетонов. – 2014 – №1 (90). – С. 36–41.

139. Эккель, С.В. Некоторые особенности оценки морозостойкости дорожного бетона / С.В. Эккель // Технологии бетонов. – 2015. – №7–8 – С. 17–21.

140. Эккель, С.В. Некоторые вопросы строительства и ремонта цементобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов / С.В. Эккель // Цемент и его применение. – 2017. – №6. – С. 78–86.

141. Юнг, В.Н. Основы технологии вяжущих веществ / В.Н. Юнг. – М.: Промстройиздат, 1951. – 548 с.

142. Юхневский, П.И. О механизме пластификации цементных композиций добавками / П.И. Юхневский // Строительная наука и техника. – 2010. – №1–2. – С.64–69.

143. Якобсон, М.Я. Некоторые проблемы обеспечения долговечности бетонных и железобетонных конструкций / М.Я. Якобсон // Сборник тезисов Международной конференции «Популярное бетоноведение». – С-Пб., 2007. – С.41–42.

144. Якобсон, М.Я. Актуальность и перспективы применения цементобетона в дорожном строительстве / М.Я. Якобсон, А.А. Кузнецова, А.С. Введенская, А.В. Бычков // Системные технологии. – 2016. – №1 (18). – С.132–140.

145. Янковский, Л.В. К вопросу оценки и прогноза состояния цементных бетонов, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата Урала и Сибири / Л.В. Янковский // Науковедение (Строительство и архитектура). – 2012. – №3 (12). – С. 86–96.

146. Янковский, Л.В. Альтернативы автомобильным дорогам с цементобетонными покрытиями в России нет / Л.В. Янковский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – №2. – С. 18–20.

147. Aitcin, P.C. High-Performance Concrete / P.C. Aitcin. – Quebec: E&FnSpon, 2004. – 364 p.

148. AzariJafari, H. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities / H. AzariJafari, A. Yahia, B. Amor // *Journal of Cleaner Product.* – 2016. – vol. 112. – part 4. – pp. 2187–2197.

149. Azmee, N.M. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications / N.M. Azmee, N. Shafiq // *Case Studies in Construction Materials.* – 2018. – vol. 9. – e00197.

150. DeRousseau, M.A. Computational design optimization of concrete mixtures: A review / M.A. DeRousseau, J.R. Kasprzyk, W.V. Srubar III // *Cement and Concrete Research.* – 2018. – vol.109. – pp.42–53.

151. Du, X. Y. Experimental Study of the Performance of C60 Pavement Concrete / X.Y. Du, Z. Li, B. Shao // *Applied Mechanics and Materials.* – 2013. – vol.331. – pp. 527–530.

152. El-Gamal, S.M.A. Effect of superplasticizers on the hydration kinetic and mechanical properties of Portland cement pastes / S.M.A. El-Gamal, Al-Nowaiser Fawzia, Al-Baity Asmaa // *Journal of Advanced Research.* – 2011. – 3. – pp. 119–124.

153. EN 206-1 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity.

154. Fagerlund, G. Frost Destruction of Concrete – A Study of the Validity of Different Mechanisms / G. Fagerlund // *Nordic Concrete Research.* – 2018. – vol. 58. – issue 1. – pp. 35-54.

155. Fagerlund, G. The Critical Flow Distance at Freezing of Concrete – Theory and Experiment / G. Fagerlund // *Nordic Concrete Research.* – 2017. – vol. 56. – pp. 35-53.

156. Flatt, R.J. Conclusions and outlook on the future of concrete admixtures / R.J. Flatt // *Science and Technology of Concrete Admixtures.* – 2016. – pp. 527–530.

157. Haitao, Y. Preparation and properties of high-strength recycles concrete in cold areas / Y. Haitao, T. Shizhu // *Materiales de Construction.* – 2015. – vol. 65 (318). – p. 050. – doi:10.3989/mc.2015.03214.

158. Hammer, T.A. Frost Resistance of High-Strength Concrete / T.A. Hammer, E.J. Sellevold // *ACI.* – 1990. – SP-121. – pp. 457–487.

159. Helmuth, R.A. Dimensional Changes of Hardened Portland Cement Pastes Caused by Temperature Changes / R.A. Helmuth // *Pros. Highway Research Board*. – 1961. – vol.40. – pp. 315–336.
160. Hooton, R.D. Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures / R.D. Hooton // *Cement and Concrete Research*. – 2019. – vol. 124. – 1058217.
161. Hooton, R.D. Advantages of Silica fume-Slag Ternary Binders for Production of Durable Concrete / R.D. Hooton // *Proceedings of XXII Nordic concrete research symposia*. – Reykjavik, 2014. – pp. 9-12.
162. Huang, H. Improvement on microstructure of concrete by polycarboxylate superplasticizer (PCE) and its influence on durability of concrete // H. Huang, C. Qian, F. Zhao, J. Qu, J. Guo, M. Danzinger // *Construction and Building Materials*. – 2016. – vol. 110. – pp. 293–299.
163. Karakurt, C. Freeze-thaw resistance of normal and high strength concretes produced with fly ash and silica fume / C. Karakurt, Y. Bayazit // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – article ID 830984. – pp. 1–8.
164. Kessy, J. G. Concrete durability standards: International trends and the South African context / J.G. Kessy, M.G. Alexander, H. Beushausen // *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. – 2015. – vol.57. – №1. – pp. 47–58.
165. Kramar, L.Ya. Introducing pozzolanic admixture to improve frost resistance of pavement concrete / L.Ya.Kramar, A.I.Kydyakov, K.V. Shuldyakov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – vol.451. – conference 1. – 012009. – pp. 1–5.
166. Koizumi, K. Effects of chemical admixtures on the silicate structure of hydrated portland cement / K. Koizumi, Y. Umemura, N. Tsuyuki // *Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement*. – Montreal, 2007. – P.64-71.
167. Lei, L. A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance / L. Lei, J. Plank // *Cement and Concrete Research*. – 2012. – vol. 42. – issue 10. – pp. 1299–1306.

168. Lei, L. A study on the impact of different clay minerals on the dispersing force of conventional and modified vinyl ether based polycarboxylate superplasticizers / L. Lei, J. Plank // *Cement and Concrete Research*. – 2014. – vol. 60. – pp. 1–10.
169. Li, Y.J. Strength and Durability of High Performance Road Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash / Y. J. Li, Y.L. Gong, J. Yin // *Applied Mechanics and Materials*. – 2011. – vol. 99–100. – pp. 126–128.
170. Mordak, A. Effectiveness of Post-tensioned Prestressed Concrete Road Bridge Realization in the Light of Research Under Dynamic Loads / A. Mordak, Z. Zee Manko // *Procedia Engineering*. – 2016. – vol. 156. – pp. 264–271.
171. Nagrockiene, D. Properties of concrete modified with mineral additives / D. Nagrockiene // *Construction and Building Materials*. – 2017. – vol. 135. – pp. 37–42.
172. Nobili, A. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement / A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarnation // *Construction and Building Materials*. – 2013. – vol.47. – pp. 888–895.
173. Philleo, R.E. Freezing and Thawing Resistance of High Strength Concrete / R.E. Philleo. – National Cooperative Highway Research Programme Synthesis of Highway Practice 129, Transportation Research Board, National Research Council. – Washington, DC, 1986. – 31 p.
174. Pigeon, M. The durability of HS/HPC / M. Pigeon // *Third General Report on Durability, in 4th International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete*. – Paris, 1996. – vol. 1. – pp. 39–45. – ISBN 2-85978-257-5.
175. Plank, J. Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability / J. Plank, E. Sakai, C.W. Miao, C. Yu, J.X. Hong // *Cement and Concrete Research*. – 2015. – vol. 78. – part A. – pp. 81–99.
176. Powers, T.C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T.C. Powers // *Proc. ACI*. – 1945. – 41. – pp. 245–272.
177. Powers, T.C. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste / T.C Powers, T.L. Brownyard // *JACI*. – 1980. – v.77. – №4. – pp. 264–268.

178. Pucharenko, Ju.V. Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete / Ju.V. Pucharenko, V.I. Morozov // World Applied Sciences Journal, Problems of Architecture and Construction. – 2013. – 23. – pp. 111–116.
179. Rajapaske, R. Chapter 3: Concrete Construction / R. Rajapakse. – Construction Engineering Design Calculations and Rules of Thumb. – 2017. – pp. 15–70.
180. Raki, L. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology / L. Raki, J. Beaudoin, R. Alizadeh, J. Makar, T. Sato // Materials. – 2010. – №3. – pp. 918–942.
181. Ramachandran, V.S. Concrete Admixtures Handbook / V.S. Ramachandran. – Building Materials Science Series, Canada. – 1997. – 1183 p.
182. Recycling concrete. Executive summary. The cement sustainability initiative. – World Business Council for Sustainable Development, 2009. – 41 p. – ISBN: 978-3-940388-50-6.
183. Sabet, F.A. Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash / F.A. Sabet, N.A. Libre, M. Shekarchi // Construction and Building Materials. – 2013. – vol. 44. – pp. 175–184.
184. Sarkar, S.L. Dissolution rate of silica fume in very high strength concrete / S.L. Sarkar, P.-C. Aitcin. // Cement and Concrete Research. – 1987. – vol. 17. – issue 4. – pp. 591–601.
185. Shen, W. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development / W. Shen, Y. Liu, B. Yan, J. Wang, P. He, C. Zhou, X. Huo, W. Zhang, G. Xu, Q. Ding // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – vol. 75. – pp. 618–628.
186. Shi, C. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design / Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Dehui Wang, Zhi Fang // Construction and building materials. – 2015. – vol. 101. – part 1. – pp. 741–751.
187. Shi, X. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview / X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong // Construction and Building Materials. – 2012. – vol. 30. – pp. 125–138.

188. 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 Conf. Proc., 2016 – pp. 070011-1-070011-6. – doi 10.1063/1.4937881.

189. 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.

190. 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*. – vol. 143. – 2018. – 02011.

191. 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*. – 2018. – vol.451. – conference 1. – 012010.

192. 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.

193. Sing, N.B. Nanoscience of Cement and Concrete / N.B. Singh, M. Kalra, S.K. Saxena // *Materials today: Proceedings*. – 2017. – vol. 4. – issue 4, part E. – pp. 5478–5487.

194. Sowoidnich, T. A study of retarding effects on cement and tricalcium silicate hydration induced by superplasticizers: PhD thesis / Thomas Sowoidnich. – Weimar, 2015. – 216 p.

195. Supino, S. Sustainability in the EU cement industry: The Italian and German experience / S. Supino, O. Malandrino, M. Testa, D. Sica // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – vol. 112. – part 1. – pp. 430–442.

196. Taфраoui, A. Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin / A. Tarfraoui, G. Escadeillas, T. Vidal // *Construction and Building Materials*. – 2016. – vol. 112. – pp. 980–987.

197. Tan, K. Frost Resistance of Concrete with Different Strength Grades and Mineral Admixtures / K. Tan, John M. Nichols // *Modern Civil and Structural Engineering*. – 2018. – vol. 2. – N 1. – pp. 1-9.

198. Tiberti, G. Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels / G. Tiberti, F. Minelli, G. Pizzari // *Composites Part B: Engineering*. – 2014. – vol. 58. – pp. 199–207.

199. 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*. – 2017. – vol. 262. – conference 1. – 012019. – doi:10.1088/1757-899X/262/1/012019.

200. Wang, D. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties / D. Wang, C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, Z. Huang, Z. Fang // *Construction and Building Materials*. – 2015. – vol. 96. – pp. 368–377.

201. Wang, D. Chloride ion penetration resistance of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and chloride attack / D. Wang, X. Zhou, B. Fu, L. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2018. – vol. 169. – pp. 740–747.

202. Wypych, G. *Handbook of Plasticizers (Third Edition)* / G. Wypych. – Toronto:Elseiver, 2017. – 870 p.

203. Yamada, K.A. Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase / K.A. Yamada, S. Ogawa, S. Hanehara // *Cement and Concrete Research*. – 2001. – No.31. – pp. 375–383.

204. Yamada, K. A summary of important characteristics of cement and / K.A. Yamada // *Proc. of Ninth ACI International Conference*. – Spain, 2009. – pp. 56–63.

205. Zengqi, Z. Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures / Z. Zengqi, B. Zhang, P. Yan // Construction and Building Materials. – 2016. – vol. 121. – pp. 483–490.

206. Zhang, J.X. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters / J. X. Zhang, X.J. Kong // Advanced Materials Research. – 2013. – vol. 857. – pp. 212–221.

207. Zhang, Y. Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes / Y. Zhang, X. Kong // Cement and concrete research. – 2015. – vol.69. – pp. 1–9.

208. Zhou, S.B. The Relationship between Concrete Road Performance and Salt Frost / S.B. Zhou, A.Q. Shen // Advanced Materials Research. – 2013. – vol. 857. – pp. 271–276.

209. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2011. – 16 с.

210. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия (с Изменениями N 1-4). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2004. – 17 с.

211. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия (с Поправкой). – М. : Стандартиформ, 2015. – 12 с.

212. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости (с Поправкой). – М. : Стандартиформ, 2019. – 30 с.

213. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости (с Поправкой). – М. : Стандартиформ, 2014. – 24 с.

214. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия (С Изменениями N 1, 2). – М. : Стандартиформ, 2008. – 8 с.

215. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М. : Стандартиформ, 2013. – 35 с.

216. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2015. – 28 с.
217. ГОСТ 12730.3-78. Бетоны. Метод определения водопоглощения. – М. : Стандартинформ, 2007. – 4 с.
218. ГОСТ 13015-2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения (Переиздание). – М. : Стандартинформ, 2019. – 36 с.
219. ГОСТ 13087-2018. Бетоны. Методы определения истираемости. – М. : Стандартинформ, 2019. – 15 с.
220. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М. : Стандартинформ, 2019. – 19 с.
221. ГОСТ 21924.0-84. Плиты железобетонные для покрытий городских дорог. Технические условия (с Изменением N 1). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.
222. ГОСТ 21924.1-84. Плиты железобетонные предварительно-напряженные для покрытий городских дорог. Конструкция и размеры (с Изменением N 1). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 14 с.
223. ГОСТ 21924.2-84. Плиты железобетонные с ненапрягаемой арматурой для покрытия городских дорог. Конструкция и размеры (с Изменением N 1). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 13 с.
224. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2012. – 16 с.
225. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия (С Изменением N 1) (с Поправкой). – М. : Стандартинформ, 2010. – 15 с.
226. ГОСТ 24545-81. Бетоны. Методы испытаний на выносливость. – М. : Издательство стандартов, 1987. – М. : Стандартинформ, 2013. – 13 с.
227. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – 10 с.

228. ГОСТ 25912-2015. Плиты железобетонные предварительно напряженные для аэродромных покрытий. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 35 с.

229. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2017. – 15 с.

230. ГОСТ 27006-2019. Бетоны. Правила подбора состава. – М. : Стандартинформ, 2019. – 15 с.

231. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2015. – 16 с.

232. ГОСТ 30459-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности. – М. : Стандартинформ, 2010. – 20 с.

233. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка (с Поправкой). – М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. – 33 с.

234. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2016. – 15 с.

235. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2017. – 53 с.

236. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. – М. : Стандартинформ, 2014. – 20 с.

237. ГОСТ 33174-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Цемент. Технические требования. – М. : Стандартинформ, 2015. – 11 с.

238. ГОСТ 33148-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Плиты дорожные железобетонные. Технические требования (Переиздание). – М. : Стандартинформ, 2019. – 22 с.

239. ГОСТ 33320-2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия (с Поправкой). – М. : Стандартинформ, 2016. – 31 с.

240. ГОСТ 33382-2015. Дороги автомобильные общего пользования. Техническая классификация. – М. : Стандартинформ, 2015. – 4 с.

241. ГОСТ Р 50597-2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. – М. : Стандартинформ, 2017. – 31 с.

242. ГОСТ Р 52398-2005. Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. – М. : Стандартинформ, 2006. – 7 с.

243. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения (с Поправками). – М. : Стандартинформ, 2008. – 17 с.

244. ГОСТ Р 55224-2012. Цементы для транспортного строительства. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2013. – 12 с.

245. ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 27 с.

246. ГОСТ Р 56592-2015. Добавки минеральные для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 11 с.

247. ГОСТ Р 56600-2015. Плиты предварительно напряженные железобетонные дорожные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 16 с.

248. Методические рекомендации по обеспечению воздухоповлечения в бетонную смесь при строительстве цементобетонных покрытий автомобильных дорог и аэродромов / Министерство транспортного строительства. – М.: СоюздорНИИ, 1983 г. – 13 с.

249. Методическое пособие. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов / Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». – М.: АО НИЦ «Строительство», 2016. – 100 с.

250. Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года. Утверждено Президентом Российской Федерации 05 марта 2020 года N 164. Опубликован на официальном интернет-портале правовой информации www.pravo.gov.ru, 05.03.2020, N 0001202003050019.

251. ОДМ 218.3.012-2011. Цементы для бетона покрытий и оснований автомобильных дорог / Росавтодор. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2011. – 11 с.

252. ОДМ 218.3.037-2014. Рекомендации по контролю прочности цементобетона покрытий и оснований автомобильных дорог по образцам / Росавтодор. – М.: ФГУП «Информавтодор», 2014. – 40 с.

253. ОДМ 218.3.039-2014. Рекомендации по испытанию плёнообразующих материалов по уходу за свежееуложенным бетоном / Росавтодор. – М.: «БИОТЕХ», 2014. – 35 с.

254. ОДМ 218.3.081-2016. Методические рекомендации по подбору составов цементобетонов для дорожного строительства в различных климатических зонах и с учетом эксплуатационных условий работы дорожных покрытий. – М.: Росавтодор (Федеральное дорожное агентство), 2018. – 64 с.

255. Постановление правительства Российской Федерации от 23 августа 2007 г. №539, г. Москва «О нормативах денежных затрат на содержание и ремонт автомобильных дорог федерального значения и правилах их расчета» (В редакции от 14 июля 2015 года, №704).

256. Протокол №АЦ-55 заседания Рабочей группы по повышению инновационности государственных закупок в транспортном комплексе под председательством заместителя Министра транспорта Российской Федерации – руководителя Рабочей группы А.С. Цыденова. – 20 июня, 2013 года, Москва.

257. Рекомендации по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006-86). – М.: ЦИТП, 1990. – 72 с.

258. Руководство по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий. – М. : Стройиздат, 1974. – 32 с.

259. СНиП 82-02-95. Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций. – М. : ГП ЦПП, 1996. – 20 с.

260. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. – М.: Минрегион России, 2017. – 118 с.

261. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменением N 1). – М. : Госстрой России, 2013. – 112 с.

262. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. – М. : Минрегион России, 2012. – 70 с.

263. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменением N 1). – М. : Минрегион России, 2013. – 73 с.

264. СП 99.13330.2016. Внутрихозяйственные автомобильные дороги в колхозах, совхозах и других сельскохозяйственных предприятиях и организациях. Актуализированная редакция СНиП 2.05.11-83. – М. : Минстрой России, 2016. – 103 с.

265. СП 121.13330.2019. Аэродромы. СНиП 32-03-96. – М. : Стандартинформ, 2019. – 155 с.

266. СП 130.13330.2018. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий. СНиП 3.09.01-85. – М. : Стандартинформ, 2019. – 72 с.

267. СП 131.13330.2018. СНиП 23-01-99* Строительная климатология. – М. : Стандартинформ, 2019. – 105 с.

268. Специальные технические условия: Проектирование участка Москва-Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань-Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч. – разработано ФГБОУ ВО ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2017. – 74 с.

269. СТО НОСТРОЙ 2.25.220-2018 Автомобильные дороги. Устройство и капитальный ремонт монолитных цементобетонных покрытий. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ.

270. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Утверждено Президентом Российской Федерации 20 февраля 2013 года. – 20 с.

271. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10 мая 2016 года № 868-р. –64 с.

272. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 ноября 2008 года № 1734-р (с изменениями от 12 мая 2018 года N 893-р). – 267 с.

273. ТР ТС 014/2011. Безопасность автомобильных дорог (с изменениями на 9 декабря 2011 года). – Официальный сайт Комиссии таможенного союза, 2011. – 30 с.

Приложение А. Статистический анализ результатов испытаний бетона

Таблица А.1 – Расчёт среднего внутрисерийного коэффициента вариации по прочности бетона для определения количества образцов в серии [215]

Серия №	R_{max} , МПа	R_{min} , МПа	W_i , МПа	R_i , МПа
1	93,6	91,7	1,9	92,65
2	91,4	88,7	2,7	90,05
3	92,3	88,3	4	90,3
4	91,3	87,6	3,7	89,45
5	91,6	87,8	3,8	89,7
6	93,2	90,4	2,8	91,8
7	92,6	88,9	3,7	90,75
8	91,8	88,6	3,2	90,2
9	93,1	90,6	2,5	91,85
10	93,4	93,1	0,3	93,25
11	91,5	87,7	3,8	89,6
12	92,4	90,2	2,2	91,3
13	91,8	87,6	4,2	89,7
14	90,3	86,5	3,8	88,4
15	89,8	88,2	1,6	89
16	92,6	90,5	2,1	91,55
17	92,6	90,6	2	91,6
18	90,9	87,6	3,3	89,25
19	94,2	90	4,2	92,1
20	93,1	89,9	3,2	91,5
21	92,2	88,4	3,8	90,3
22	91,4	88,9	2,5	90,15
23	92,3	87,9	4,4	90,1
24	89,7	85,3	4,4	87,5
25	91,7	87,5	4,2	89,6
26	92,3	89,2	3,1	90,75
27	91,8	88,6	3,2	90,2
28	93,5	89,6	3,9	91,55
29	90,7	87,9	2,8	89,3
30	91,6	87,8	3,8	89,7
Среднее значение:			3,17	90,43
Средняя величина внутрисерийного коэффициента вариации прочности тяжелого бетона, %				3,1
Количество образцов в серии принятое для дальнейших испытаний				2

Таблица А.2 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации прочности образцов тяжелого бетона на сжатие

Модификатор	W, МПа	R _{ср} , МПа	S _n , МПа	V, %
1 сутки				
Без добавок	0,60	12,40	0,53	4,28
СП-1	0,60	11,52	0,53	4,61
АСЕ	0,80	15,12	0,71	4,68
СП-1+МК	1,20	24,65	1,06	4,31
АСЕ+МК	1,10	38,22	0,97	2,55
3 суток				
Без добавок	1,70	31,00	1,50	4,85
СП-1	1,60	39,60	1,42	3,58
АСЕ	1,80	48,72	1,59	3,27
СП-1+МК	1,70	51,00	1,50	2,95
АСЕ+МК	1,90	58,24	1,68	2,89
7 суток				
Без добавок	2,20	40,30	1,95	4,83
СП-1	2,10	50,40	1,86	3,69
АСЕ	2,40	63,00	2,12	3,37
СП-1+МК	2,30	68,00	2,04	2,99
АСЕ+МК	2,80	74,62	2,48	3,32
28 суток				
Без добавок	3,10	62,00	2,74	4,42
СП-1	2,90	72,00	2,57	3,56
АСЕ	2,80	84,00	2,48	2,95
СП-1+МК	3,20	85,00	2,83	3,33
АСЕ+МК	3,40	91,00	3,01	3,31
2 года				
Без добавок	3,70	68,20	3,27	4,80
СП-1	3,60	74,88	3,19	4,25
АСЕ	3,90	88,20	3,45	3,91
СП-1+МК	4,10	89,25	3,63	4,07
АСЕ+МК	4,00	96,46	3,54	3,67

Таблица А.3 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации прочности образцов тяжелого бетона на растяжение при изгибе

Модификатор	W, МПа	R _{ср} , МПа	S _n , МПа	V, %
1 сутки				
Без добавок	0,14	1,25	0,06	4,47
СП-1	0,12	1,22	0,05	3,92
АСЕ	0,15	1,59	0,06	3,77
СП-1+МК	0,28	2,51	0,11	4,46
АСЕ+МК	0,25	3,49	0,10	2,87
3 суток				
Без добавок	0,32	2,79	0,13	4,58
СП-1	0,40	3,60	0,16	4,44
АСЕ	0,37	4,77	0,15	3,10
СП-1+МК	0,50	4,94	0,20	4,05
АСЕ+МК	0,55	5,56	0,22	3,96
7 суток				
Без добавок	0,45	3,76	0,18	4,78
СП-1	0,42	4,76	0,17	3,53
АСЕ	0,64	6,12	0,26	4,18
СП-1+МК	0,71	6,56	0,28	4,33
АСЕ+МК	0,78	6,81	0,31	4,58
28 суток				
Без добавок	0,70	5,70	0,28	4,91
СП-1	0,68	6,80	0,27	4,00
АСЕ	0,75	7,95	0,30	3,77
СП-1+МК	0,84	8,10	0,34	4,15
АСЕ+МК	0,97	8,30	0,39	4,67
2 года				
Без добавок	0,74	6,27	0,30	4,72
СП-1	0,84	7,07	0,34	4,75
АСЕ	0,80	8,35	0,32	3,83
СП-1+МК	1,02	8,51	0,41	4,80
АСЕ+МК	1,05	8,80	0,42	4,77

Таблица А.4 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации прочности образцов тяжелого бетона на растяжение при раскалывании

Модификатор	W, МПа	R _{ср} , МПа	S _n , МПа	V, %
1 сутки				
Без добавок	0,08	0,78	0,03	4,12
СП-1	0,10	0,81	0,04	4,94
АСЕ	0,12	1,01	0,05	4,77
СП-1+МК	0,15	1,62	0,06	3,70
АСЕ+МК	0,28	2,39	0,11	4,69
3 суток				
Без добавок	0,22	1,92	0,09	4,57
СП-1	0,31	2,57	0,12	4,83
АСЕ	0,34	3,02	0,14	4,50
СП-1+МК	0,33	3,29	0,13	4,01
АСЕ+МК	0,37	3,55	0,15	4,17
7 суток				
Без добавок	0,28	2,44	0,11	4,59
СП-1	0,30	3,20	0,12	3,76
АСЕ	0,29	4,13	0,12	2,81
СП-1+МК	0,48	4,43	0,19	4,34
АСЕ+МК	0,47	4,66	0,19	4,03
28 суток				
Без добавок	0,45	3,70	0,18	4,86
СП-1	0,47	4,50	0,19	4,18
АСЕ	0,55	5,30	0,22	4,15
СП-1+МК	0,67	5,40	0,27	4,96
АСЕ+МК	0,59	5,55	0,24	4,25
2 года				
Без добавок	0,49	4,07	0,20	4,82
СП-1	0,45	4,68	0,18	3,85
АСЕ	0,57	5,57	0,23	4,10
СП-1+МК	0,69	5,67	0,28	4,87
АСЕ+МК	0,67	5,88	0,27	4,56

где W – разница между максимальным и минимальным значением прочности в серии; R_{ср} – среднее арифметическое значение прочности; S_n – среднеквадратичное отклонение; V – внутрисерийный коэффициент вариации.

Таблица А.5 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации водопоглощения по массе образцов тяжелого бетона

Модификатор	Возраст образцов	$W_m, \%$	$W, \%$	$S_n, \%$	$V, \%$
Без добавок	28 суток	6	0,67	0,268	4,46
СП-1	28 суток	4,2	0,32	0,128	3,05
СП-1+МК	28 суток	3,5	0,4	0,16	4,57
СП-1+МК	2 года	3,4	0,34	0,136	4
АСЕ	28 суток	3,8	0,32	0,128	3,37
АСЕ+МК	28 суток	3,2	0,24	0,096	3
АСЕ+МК	2 года	3,2	0,26	0,104	3,25
АСЕ+МК	4 года	3,3	0,23	0,092	2,79

Таблица А.6 – Расчетное определение марки по морозостойкости тяжелого бетона без добавок модификаторов и его статистические характеристики

Марка	$R_{cp}, \text{МПа}$	$W_m, \text{МПа}$	$\sigma_n, \text{МПа}$	$V_m, \%$	$X_{min}^{II}, \text{МПа}$	$0,9 X_{min}^I, \text{МПа}$	Соответствие
Контрольные	61,85	1,9	0,92	1,49	58,92	53,02	Да
F ₂ 100	62,55	1,7	0,83	1,32	59,92	–	
F ₂ 150	50,925	3,1	1,50	2,96	46,14	–	Нет

При испытании марки бетона по морозостойкости, в соответствии с ГОСТ 10060-2012, через заданное количество циклов испытывается прочность основных образцов и, если неравенство $0,9 X_{min}^I \leq X_{min}^{II}$ выполняется, тогда критическое снижение прочности, под действием циклического замораживания, не наступило, следовательно, на этом этапе образцы выдержали испытание [213].

Таблица А.7 – Расчетное определение марки по морозостойкости тяжелого бетона с добавкой СП-1 и его статистические характеристики

Марка	$R_{cp}, \text{МПа}$	$W_m, \text{МПа}$	$\sigma_n, \text{МПа}$	$V_m, \%$	$X_{min}^{II}, \text{МПа}$	$0,9 X_{min}^I, \text{МПа}$	Соответствие
Контрольные	72,8	3,6	1,75	2,40	67,24	60,52	Да
F ₂ 100	72,55	4,5	2,18	3,01	65,60	–	
F ₂ 150	66,075	9,1	4,42	6,69	52,02	–	Нет

Таблица А.8 – Расчетное определение марки по морозостойкости тяжелого бетона с добавкой АСЕ и его статистические характеристики

Марка	$R_{cp}, \text{МПа}$	$W_m, \text{МПа}$	$\sigma_n, \text{МПа}$	$V_m, \%$	$X_{min}^{II}, \text{МПа}$	$0,9 X_{min}^I, \text{МПа}$	Соответствие
Контрольные	83,55	2,4	1,17	1,39	79,84	71,86	Да
F ₂ 100	84,875	6,3	3,06	3,60	75,14	–	
F ₂ 150	71,325	15,1	7,33	10,28	48,00	–	Нет

Таблица А.9 – Расчетное определение марки по морозостойкости тяжелого бетона с добавками СП-1 и МК и его статистические характеристики

Марка	R _{ср} , МПа	W _м , МПа	σ _н , МПа	V _м , %	X _{min} ^{II} , МПа	0,9 X _{min} ^I , МПа	Соответствие
Контрольные	86,025	3	1,46	1,69	81,39	73,25	Да
F ₂ 150	90,55	4,1	1,99	2,20	84,22	–	
F ₂ 200	89,125	8,6	4,17	4,68	75,84	–	Да
F ₂ 300	89,9	5	2,43	2,70	82,18	–	Да
F ₂ 400	56,875	5,1	2,48	4,35	49,00	–	Нет

Таблица А.10 – Расчетное определение марки по морозостойкости тяжелого бетона с добавками АСЕ и МК и его статистические характеристики

Марка	R _{ср} , МПа	W _м , МПа	σ _н , МПа	V _м , %	X _{min} ^{II} , МПа	0,9 X _{min} ^I , МПа	Соответствие
Контрольные	89,55	3,8	1,84	2,06	83,68	75,31	Да
F ₂ 200	93	5,1	2,48	2,66	85,12	–	
F ₂ 300	92,275	8,7	4,22	4,58	78,84	–	Да
F ₂ 400	92,1	6,5	3,16	3,43	82,06	–	Да
F ₂ 500	88,6	6,3	3,06	3,45	78,87	–	Да

Таблица А.11 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации водопоглощения по массе образцов тяжелого бетона при циклическом замораживании

Модификатор	Воздействующая среда	W _м , %	W, %	S _н , %	V, %
СП-1+МК	Нормальные условия	3,64	0,38	0,15	4,22
АСЕ+МК		3,37	0,36	0,14	4,33
СП-1+МК	5 % раствор NaCl	3,58	0,45	0,17	4,98
АСЕ+МК		3,23	0,36	0,14	4,48
СП-1+МК	55 циклов замораживания и оттаивания	4,51	0,98	0,39	8,74
АСЕ+МК		3,42	0,37	0,14	4,35

Для проведения испытания использовались половинки образцов кубов, оставшиеся после испытания на растяжение при раскалывании, которые дополнительно раскалывались на четыре части каждая, а затем все эти фрагменты подвергались водонасыщению и высушиванию до постоянной массы при температуре (100±5) °С.

Таблица А.12 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации прочности образцов тяжелого бетона на растяжение при раскалывании после различного количества циклических замораживаний

Состав	Циклы	R _{pp} , МПа	W, МПа	S _n , МПа	V, %
Без добавок	0	3,9	0,35	0,17	4,35
	5	3,9	0,37	0,18	4,6
	10	2,6	0,29	0,141	5,41
СП-1	0	4,6	0,38	0,185	4,01
	10	4,4	0,41	0,2	4,52
	20	3,7	0,34	0,165	4,46
АСЕ	0	5,5	0,51	0,248	4,50
	10	5,3	0,53	0,257	4,85
	20	4,5	0,47	0,228	5,07
СП-1+МК	0	5,3	0,51	0,248	4,67
	37	5,2	0,46	0,223	4,29
	55	3	0,35	0,17	5,66
АСЕ+МК	0	5,5	0,54	0,262	4,77
	55	5,3	0,53	0,257	4,85
	80	5,4	0,54	0,262	4,85

Таблица А.13 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации изменения приращения водопоглощения контрольных образцов тяжелого бетона

Состав	Дней водонасыщения	Увеличение водонасыщения, %	W, %	S _n , %	V, %
СП-1+МК	5	23,2	1,30	1,15	4,96
	10	23,4	1,01	0,89	3,82
	15	25,1	1,31	1,16	4,62
	20	38	2,08	1,84	4,84
	30	43,6	2,31	2,04	4,69
АСЕ+МК	5	6,4	0,31	0,27	4,29
	10	8,8	0,42	0,37	4,22
	15	16,2	0,87	0,77	4,75
	20	16,7	0,67	0,59	3,55
	30	26,7	1,05	0,93	3,48

Таблица А.14 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации изменения приращения водопоглощения основных образцов тяжелого бетона

Состав	Циклов замораживания и оттаивания	Увеличение водонасыщения, %	W, %	S _n , %	V, %
СП-1+МК	10	12,5	0,64	0,57	4,53
	20	22,2	0,97	0,86	3,87
	30	25	1,30	1,15	4,60
	37	128	4,80	4,25	3,32
	55	457	10,20	9,03	1,98
АСЕ+МК	10	5,8	0,31	0,27	4,73
	20	6,2	0,34	0,30	4,85
	30	6,7	0,21	0,19	2,77
	37	14,3	0,62	0,55	3,84
	55	28,5	0,75	0,66	2,33

Таблица А.15 – Среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации призмной прочности на сжатие при испытании шести образцов каждого состава

Состав	R _{сж} , МПа	W, МПа	S _n , МПа	V, %
Без добавок	52,13	8,27	3,31	6,35
СП-1	64,6	8,15	3,26	5,05
СП-1+МК	71,1	8,64	3,46	4,86
АСЕ	69,3	10,67	4,27	6,16
АСЕ+МК	72,93	7,94	3,18	4,35

Приложение Б. Результаты внедрения



ООО «ИТС»
454004, Россия, г. Челябинск, ул. Академика Сахарова, 26
Тел.: +7 (351) 277-75-66

ИНН 7452120881
КПП 745301001
ОГРН 1157452000310



УТВЕРЖДАЮ

Зам. генерального директора

/А.П. Гринченко/

27 января 2020 г.

АКТ

**о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Шулдякова Кирилла Владимировича**

Комиссия в составе:

Председатель: Зам. генерального директора А.П. Гринченко

Члены комиссии:

ООО «Иновационные технологии в строительстве» в лице: главного конструктора Бабича В.А.

Южно-Уральский государственный университет в лице:

д.т.н., профессор кафедры «Строительные материалы и изделия» (далее «СМИИ») Трофимова Б.Я. и Крамар Л.Я., к.т.н., заведующего кафедры «СМИИ» Орлова А.А., старшего преподавателя кафедры «СМИИ» Шулдякова К.В.

составили настоящий акт о том, что разработанный в диссертационной работе Шулдякова К.В. состав высокофункционального бетона был использован в производственной деятельности ООО «Иновационные технологии в строительстве» при сооружении экспериментального участка дороги в Белгородской области площадью 630 м² дорожного полотна.

Техническая характеристика полученного продукта:

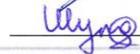
- Бетон класса по прочности на сжатие В60.
- Марка по морозостойкости F₂₅₀₀.
- Марка по водонепроницаемости W16.
- Марки по истираемости G1.
- Класс прочности на осевое растяжение В_{4,5}.
- Класс прочности на растяжение при изгибе В_{т8,4}.

Применение разработанной технологии позволяет получать бетон, стойкий к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации. Полученный состав бетона экономически более эффективен по сравнению с аналогами.

Члены комиссии:

 /Бабич В.А./

 /Крамар Л.Я./

 /Шулдяков К.В./

 /Трофимов Б.Я./

 /Орлов А.А./

ООО «ИТС»
© Все права защищены

Закрытое акционерное общество «Иновационные технологии в
строительстве»

ЗАО «ИТС»

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

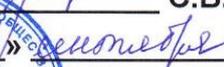
СТО 68632639-001-2013

УТВЕРЖДАЮ

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР

ЗАО «ИТС»

 С.В. МУРАШОВ

 2013 г.



СИСТЕМА ПЛИТ СБОРНОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ
Технические условия

г. Челябинск

2013

ООО «Опытный завод «УралНИИСтром»

454047, г. Челябинск
ул. Сталеваров 5/2, оф. 8
ИНН/КПП 7480028706/746001001

Основана в 1957 году

8 (351) 735-98-08
info@uniis.ru
www.uniis.ru

Уральский научно-исследовательский институт строительных материалов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

/К.С. Морозов/

25 февраля 2020 г.

г. Челябинск

АКТ

*о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Шулдякова Кирилла Владимировича*

Комиссия в составе:

Председатель: Зам. директора ООО Опытный завод «УралНИИСтром» Морозов К.С.

Члены комиссии:

ООО Опытный завод «УралНИИСтром» в лице: к.т.н., заместителя директора по научной работе Ахмедьянова Р.М.

Южно-Уральский государственный университет в лице:

д.т.н., профессор кафедры «Строительные материалы и изделия» (далее «СМИИ») Трофимова Б.Я. и Крамар Л.Я., к.т.н., заведующего кафедрой «СМИИ» Орлова А.А., старшего преподавателя кафедры «СМИИ» Шулдякова К.В.

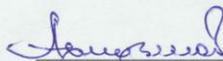
составили настоящий акт о том, что из разработанного в диссертационной работе Шулдякова К.В. состава тяжелого бетона на предприятии ООО Опытный завод «УралНИИСтром» была изготовлена опытная партия дорожных плит, уложенных в дорожное покрытие города Челябинска и проведены испытания свойств бетона.

Техническая характеристика полученного бетона:

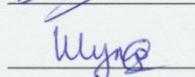
- Класс по прочности на сжатие В60.
- Марка по морозостойкости F₂₅₀₀.
- Марка по водонепроницаемости W16.
- Марка по истираемости G1.
- Класс прочности на осевое растяжение В_т4,5.
- Класс прочности на растяжение при изгибе В_{из}8,4.

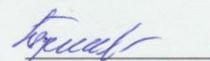
Применение разработанной технологии позволяет получать бетон, стойкий к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации. Полученный состав бетона экономически более эффективен по сравнению с аналогами.

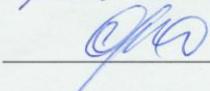
Члены комиссии:

 /Ахмедьянов Р.М./

 /Крамар Л.Я./

 /Шулдяков К.В.

 /Трофимов Б.Я./

 /Орлова А.А./

Открытое акционерное общество
«ОПЫТНЫЙ ЗАВОД «УРАЛНИИСТРОМ»»

ПРОЕКТ СТАНДАРТА ОРГАНИЗАЦИИ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

ООО «Опытный завод «УралНИИСтром»»

/К.С. Морозов/

« 14 » февраля 2020 г.



Плиты железобетонные дорожные из
высокоморозостойкого бетона

Челябинск

2020



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Архитектурно-строительный
институт



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Коржов А.В.

«02» сентября 2020 г.

СПРАВКА
о внедрении результатов
диссертационной работы К.В. Шулдякова
«Тяжелые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации»

Результаты диссертационной работы Шулдякова Кирилла Владимировича «Тяжелые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации» внедрены в учебный процесс Архитектурно-строительного института ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. В частности:

1. По направлению подготовки 08.04.01 Строительство в дисциплинах: «Модификаторы цементных бетонов» (д.т.н., проф. Крамар Л.Я.), «Методы формирования структуры и свойств строительных материалов» (к.т.н., доц. Орлов А.А.), «Структура и свойства цементных бетонов» (д.т.н., проф. Крамар Л.Я.) и «Строительные материалы» (Шулдяков К.В.).
2. По направлению подготовки 08.03.01 Строительство в дисциплинах: «Технология бетона» (д.т.н., проф. Трофимов Б.Я.) и «Стойкость строительных конструкций в агрессивных средах» (к.т.н., доц. Горбунов С.П.).
3. По направлению подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства в дисциплинах: «Долговечность бетона» (д.т.н., проф. Трофимов Б.Я.) и «Химия цементов и бетонов» (д.т.н., проф. Крамар Л.Я.).
4. По направлению подготовки 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений в дисциплине «Химия в строительстве» (к.т.н., доц. Орлов А.А.).
5. По направлению подготовки 08.04.01 Строительство у обучающихся по проектной форме обучения по теме «Исследование долговечности бетона железобетонных конструкций при циклических воздействиях» (д.т.н., проф. Трофимов Б.Я.).

Использование результатов диссертационной работы Шулдякова К.В. позволило расширить представление обучающихся о роли структуры в формировании свойств строительных материалов и изделий и необходимость обеспечения стабильности структурных элементов цементного камня для достижения высокой стойкости железобетонных конструкций, эксплуатируемых при циклических воздействиях.

Директор Архитектурно-
строительного института

Ульрих Д.В.