

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение коррозионной стойкости цементных бетонов в агрессивных средах

Обучающийся

А.С. Пушкина

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

канд. техн. наук, доцент, доцент центра, В.Н. Шишканова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. филолог. наук, доцент, Т.Г. Никитина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Содержание

Введение	4
1 Теоретические аспекты технологии ремонта железобетонных конструкций, подверженных хлоридной и сульфатной коррозиями при морозе.	8
1.1 Основные сведения о железобетоне и его долговечности	8
1.2 Классификация коррозии и технологии ее ремонта	9
1.2.1 Хлоридная коррозия	12
1.2.2 Коррозия выщелачивания	14
1.2.3 Карбонизация бетона.....	15
1.2.4 Морозная деструкция бетона	16
1.2.5 Повреждения при капиллярном всасывании и испарении растворов солей	18
1.2.6 Кислотная коррозия.....	18
1.2.7 Сульфатная коррозия	19
1.2.8 Внутренняя коррозия бетона	21
2 Характеристики используемых материалов. Методики исследований.....	23
2.1 Свойства используемых материалов	23
2.1.1 Портландцемент	23
2.1.2 Крупный заполнитель	25
2.1.3 Мелкий заполнитель.....	25
2.1.4 Микрозаполнитель	27
2.1.5 Пластификатор.....	29
2.1.6 Добавки	30
2.2 Методы экспериментальных исследований.....	32
2.2.1 Песок	32
2.2.2 Добавки	35
2.2.3 Подбор состава бетонной смеси	35
2.2.4 Определение подвижности бетонной смеси	36
2.2.5 Определения предела прочности	38

2.2.6	Определения водопоглощения.....	38
2.2.7	Определения пористости бетона	39
2.2.8	Определение коррозионной стойкости бетона	40
3	Коррозионная стойкость бетонов высокой плотности.....	42
3.1	Получение бетонов высокой плотности с применением микрозаполнителя	42
3.2	Коррозионная стойкость бетонов	45
3.2.1	Хлоридная коррозия	51
3.2.2	Сульфатная коррозия	57
	Заключение	64
	Список используемой литературы	66

Введение

В современном мире, при строительстве зданий и сооружений промышленных, гражданских, транспортных и частных назначений, бетон является основным материалом для постройки. Довольно широкая и область применения бетона: несущие и ограждающие конструкции, гидротехнические и ирригационные сооружения, объекты транспортного и сельскохозяйственного назначения.

Такой обширной областью применения бетоны обладают за счет своих физико-механических свойств, а именно: высокой прочности, долговечности и, конечно же, простотой работ. Бетон - универсальный строительный материал, позволяющий производить конструкции и изделия разнообразных форм.

Невзирая на легкость приготовления раствора бетона, он все же не простой материал. Свойства бетона создаются под влиянием многочисленных факторов, зависящих от условий эксплуатации, а именно воздействия влаги, перепада температур и агрессивных сред, в процессе твердения.

Бетон, обеспечивающий безопасность в процессе эксплуатации зданий на длительный расчетный период, можно получить при комплексе благоприятных технологических и эксплуатационных факторов, но при недостатке одного из них, неизбежно преждевременное разрушение бетона.

Неправильный анализ агрессивных показателей, воздействующих на бетон, часто влечет за собой тотальные проблемы в процессе строительства.

Крупнейшее экономическое значение имеет обеспечение надежности и, как следствие, долговечности любых строительных объектов РФ, так к примеру, огромный ущерб народнохозяйственной отрасли страны может нанести коррозия бетона. Для предупреждения коррозии цементного камня нужны существенные материальные и технические ресурсы. Исследование экономически эффективных мер сопротивления коррозии бетона довольно

медленно в связи с длительной протяженностью экспериментов и высокой трудоемкости.

Актуальность работы.

В настоящее время бетон и железобетон являются самыми распространенными материалами в строительной отрасли. Из данных материалов возводятся жилые здания, плотины гидроэлектростанций, промышленные комплексы, а также комплексы сельского хозяйства.

Бетон обладает широким спектром применения в различных отраслях строительства, ввиду простоты изготовления, высокой прочности, надежности и долговечности. В свою очередь, свойства бетона зависят от влияния различных факторов в процессе эксплуатации, таких как неоднократные повышения и понижения температур, влажность и неблагоприятные (агрессивные) среды.

На первый взгляд кажется, что бетон и железобетон являются самыми надежными и долговечными, так как срок службы таких конструкций в среднем достигает 100 лет, но вопрос прочности и долговечности таких конструкций остается актуальным до сих пор.

Соблюдение требований нормативных документов позволяет в процессе изготовления бетона поддерживать долговечность конструкции в течение всего срока эксплуатации и предотвращать его коррозию.

Но на практике зачастую встречаются ошибки проектирования, выбора материалов, отклонения от технологии производства конструкций, а также железобетонные конструкции подвергаются воздействиям неблагоприятных условий эксплуатации, не предусмотренных проектом.

Все это приводит к раннему повреждению конструкций и как следствие к последующему их ремонту и защите.

Рассматривая влияние коррозии от агрессивных сред на экономику страны можно отметить какой существенный убыток наносится на бюджет государства. Изучения в области борьбы с коррозией это очень трудоемкий и

длительный процесс, который еще до конца не изучен. Тем самым, проблема борьбы с коррозией остается по-прежнему актуальной.

Цель исследования: Совершенствование технологических решений повышения коррозионной стойкости бетонов в агрессивной среде.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- Провести анализ научных работ по теме исследования, кратко описывая технические решения проблемы и подчеркивая достоинства и недостатки.
- Произвести подбор оптимального состава, снижающего воздействия агрессивных сред на бетон.
- Произвести анализ проведенных экспериментов и произведенных расчетов в ходе исследования.

Предметом исследования магистерской диссертации являются бетонные конструкции, подверженные воздействиям агрессивных сред.

Объект исследования магистерской диссертации – повышение коррозионной стойкости.

Методы исследования: анализ, синтез, индукция, дедукция, факторный анализ, моделирование.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Данные о применении высокоактивного метакаолина и гидрофобизирующей добавки Goodhim INTERPLAST AT S GIDRO, снижающие коррозионные процессы в теле бетона, подверженного воздействиям агрессивных сред.
- Оптимизация состава бетонной смеси, способствующая снижению водопоглощения, пористости и увеличению прочности бетона.

Практическая значимость состоит в разработке оптимального выбора состава для повышения коррозионной стойкости бетона и в его последующем применении.

Личное участие автора - изучение методов повышения коррозионной стойкости бетонов, экспериментальные исследования и обработка полученных результатов.

Апробация результатов исследования. Результаты работы (2 статьи) опубликованы в научном журнале «Наука и просвещение».

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка.

1 Теоретические аспекты технологии ремонта железобетонных конструкций, подверженных хлоридной и сульфатной коррозиями при морозе.

1.1 Основные сведения о железобетоне и его долговечности

Ключевые понятия для нашего исследования – это бетон; коррозия бетона; бетоны, подверженные воздействию агрессивных сред.

Бетон – композитный материал (искусственный камень), состоящий из вяжущего вещества (чаще всего цемента), воды и заполнителей различных фракций.

Анализируя данные [1, 2, 3, 24, 25, 26] выделим основные негативные факторы, влияющие на снижение долговечности бетонных конструкций:

- высокие нагрузки;
- воздействия ветра и морозов;
- вода и влажность окружающей среды;
- агрессивные среды (газы, растворы, соли).

Все вышеперечисленные факторы приводят конструкции к разрушению.

Согласно данным ГОСТ 31384-2017 определением термина коррозия железобетона является «ухудшение технических характеристик железобетона в результате коррозии бетона и/или арматуры.» [2].

«Основные причины коррозионных повреждений неплохо изучены и соответствующие рекомендации по их предотвращению освещены в нормативных документах.» [4]. Соблюдение требований нормативных документов позволяет в процессе изготовления бетона поддерживать долговечность конструкции в течение всего срока эксплуатации и предотвращать его коррозию.

«Однако на практике нередки случаи ошибок в проектировании, выборе материалов, подборе состава, реализации технологического процесса.

В ряде случаев не учитываются действительные условия эксплуатации конструкций. В связи с ухудшением экологической обстановки бетонные и железобетонные конструкции могут попадать в неблагоприятные условия эксплуатации, не предусмотренные проектом. Все это приводит к раннему повреждению конструкций.» [4].

Далее рассмотрим более детально виды коррозии и технологии их ремонта.

1.2 Классификация коррозии

Основанием для становления и последующего развития коррозии бетона являются перепады температуры, свойства и воздействия агрессивных сред, состав бетонной смеси, ее взаимодействие с окружающей средой, влажность и параметры защитного слоя бетона, а именно толщина, структура и плотность.

Прежде чем приступить к классификации коррозии бетона, необходимо рассмотреть виды внешних агрессивных сред, воздействие которых приводит к коррозии железобетонных конструкций.

Классификация внешних агрессивных сред, влияющих на бетон и железобетонные конструкции, представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация внешних агрессивных сред, влияющих на бетон и железобетонные конструкции

Под воздействием агрессии в бетонных и железобетонных конструкциях развиваются физико-химические и физико-механические разрушающие процессы, представленные на рисунке 2.

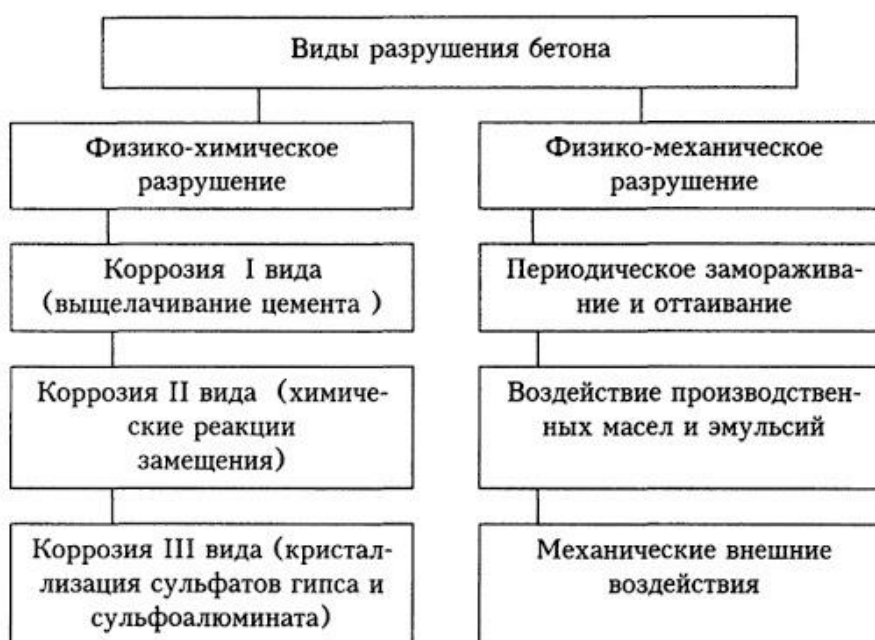


Рисунок 2 – Классификация видов разрушения бетона

Проанализировав материалы и научные работы по данной теме [2, 3, 4, 5, 7], можно классифицировать основные виды коррозии бетона и железобетона:

- хлоридная коррозия;
- карбонизация бетона;
- «коррозия бетона в результате его взаимодействия с растворами солей аммония, называют аммонийной коррозией;
- коррозия бетона в результате его взаимодействия с кислотами, называют кислотной;
- магниальная коррозия бетона, происходящая в результате взаимодействия цементного камня с растворами магниальных солей;
- радиационная коррозия бетона представляет собой изменение свойств бетона вследствие действия на него потоков ионизирующих излучений;
- сульфатная коррозия бетона, проявляется в результате взаимодействия цементного камня с сульфатами;
- углекислая коррозия бетона проявляется в результате взаимодействия бетона с агрессивной углекислотой, содержащейся в воде;
- коррозия бетона, происходящая в результате взаимодействия бетона с щелочами, называют щелочной;
- карбонизация бетона представляет собой процесс взаимодействия цементного камня с углекислым газом, приводящий к снижению щелочности жидкой фазы бетона;
- коррозия бетона под действием электрического тока в результате электрохимических и электроосмотических процессов, возникающих под действием постоянного или переменного тока, называют электрокоррозией;

- электрохимическая коррозия железобетона, происходящая вследствие того, что арматурная сталь при погружении в раствор электролита начинает корродировать» [7].

1.2.1 Хлоридная коррозия

Повреждения хлоридной коррозии являются результатами проникновения хлоридов в бетон, потерей свойств защитного слоя, а также развитием коррозии арматуры.

Разрушения хлоридами происходят при взаимодействии морской воды, солей, антигололедных реагентов и бетона. Процесс коррозии начинается с проникания хлора в тело бетона и контакта хлора с арматурой. В это время происходит растворение пассивирующей пленки оксидов железа и начинается коррозия [30]. Скорость проникновения хлоридов зависит от их концентрации, проницаемости бетона и влажности.

Концентрация хлоридов прямо пропорциональна водородному показателю (рН) бетона. Тем самым можно подчеркнуть зависимость разрушений из-за образования солей и разрушения хлоридов, зачастую протекающих параллельно, в единый аспект.

Катион магния в водах мирового океана находится на втором месте по содержанию. Его средняя концентрация в морской воде (1,5 г/л) выше чем в речной почти в 100 раз. В результате первоначальной реакции солей магния и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ образуется $\text{Mg}(\text{OH})_2$, хуже растворяется в воде [40].

По итогу данной реакции получается растворимый хлорид кальция (CaCl_2), который вымывается из цементного камня.

В результате воздействия морской воды на бетон, из его состава вымывается гораздо больше гидроксида кальция, чем из того же количества пресной воды при физической коррозии. В то же время заметно уменьшается щелочность раствора, содержащегося в порах бетона. Показатель кислотности рН снижается с 12,5 до 10,5. Это говорит о снижении устойчивости к гидролизу высокоосновных гидросиликатов кальция и возможности удаления кальциевого налета [43]. В конечном итоге прочность

цементного камня резко снижается в следствии частичного изменения гидросиликатного каркаса бетона на мелкие кристаллы брусита гидроксида магния.

Пример хлоридной коррозии представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Хлоридная коррозия бетона

Ремонт конструкций подверженных такой коррозией производится катодной защитой. Данный способ используют в отдельных случаях и больше применяют за рубежом [31].

В России защита конструкций «включает в себя удаление загрязненного хлоридами бетона, в первую очередь защитного слоя, обнажение и очистку от ржавчины и солей поверхности корродирующей арматуры струей воды высокого давления [32]. При значительном коррозионном поражении арматуры армирование усиливают дополнительными стержнями. Затем восстанавливают защитный слой. В зависимости от конкретной ситуации возможно применение изолирующих покрытий по очищенной поверхности стальной арматуры и поверхности бетона за арматурой. После выполнения ремонта предпринимаются меры по защите поверхности конструкций от хлоридов (пропитка, покрытия)» [4].

1.2.2 Коррозия выщелачивания

Такую коррозию часто называют физической коррозией бетона. Основной отличительной чертой данного повреждения является вынос гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, то есть его выщелачивание. Взаимодействие бетона с пресной водой приводит к коррозии I вида.

Как можно заметить по исследованиям Ф.М. Иванова (НИИЖБ), в условиях выщелачивания повреждения бетона тонкостенных конструкций представляет опасность, нежели для массивных конструкций. Это обосновано малой толщиной защитного слоя бетона.

Как итог, выщелачивание приводит к поэтапному ослаблению, влияющему на прочность конструкции и ведущему к ее разрушению.

Для данного вида коррозии характерно появление белого налета на поверхности бетонных конструкций, в местах выхода воды при фильтрации [34].

На рисунке 4 представлен характерный внешний признак коррозии выщелачивания.



Рисунок 4 – Характерный внешний признак коррозии выщелачивания

1.2.3 Карбонизация бетона

Карбонизация бетона – взаимодействие углекислого газа и бетона, сопровождаемое переходом гидроксида кальция в карбонат кальция. Прочность цементного камня значительно не изменяется, при этом уменьшается щелочность и теряется свойство пассивации металла. Концентрация углекислоты зависит от окружающей среды, эксплуатации сооружения и уровня загрязненности среды. В процессе взаимодействия бетона и карбонатов, у бетона понижается уровень щелочной среды. Защитная пленка арматурных стержней разрушается, что приводит к агрессивному воздействию на них влаги и кислорода. Как результат, получаем агрессивную коррозию арматурных стержней. Происходит вспучивание бетона, а также возможна его отслойка или даже полное разрушение. Таким образом, в поврежденной конструкции создается новый доступ кислорода и влажности, а это способствует увеличению площади и глубины повреждений.

Анализируя результаты обследований развития коррозии ЖБ конструкций, можно сделать выводы, что причиной полной карбонизации защитного слоя бетона служат его недостаточная величина и высокая проницаемость бетона.

Карбонизированные зоны бетона при $pH < 9$ и $pH > 12$ представлены на рисунке 5.

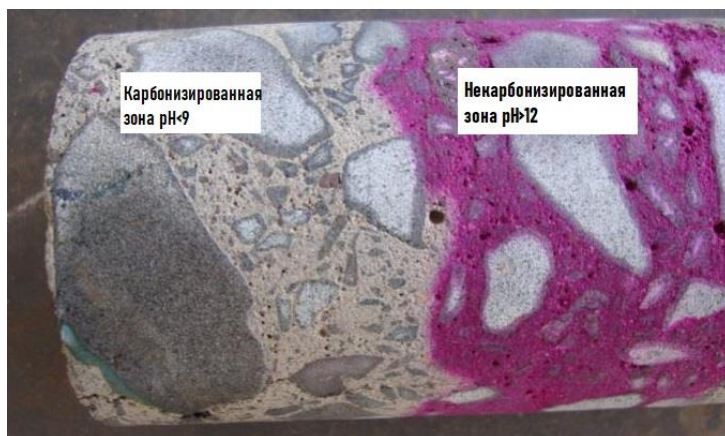


Рисунок 5 – Карбонизация бетона

Нанесение плотного мелкозернистого бетона на поверхность конструкции может способствовать остановке процесса коррозии, если вовремя обнаружить быструю карбонизацию, недостригшую стальной арматуры. В таких условиях величина рН карбонизированного участка, покрытого цементно-песчаным раствором, в результате диффузии растворённого гидроксида кальция и щелочей может измениться до первоначальных значений, необходимых для возобновления пассивирующего действия на стальную арматуру.

Для ремонта в случае полной карбонизации бетона с развивающейся коррозией стальной арматуры необходимо удалить поврежденный бетон. Если карбонизация превысила толщину защитного слоя бетона, то его необходимо удалить вместе с арматурой. Затем при помощи механизированного способа очищают арматуру от продуктов коррозии, а также усиливают ее при необходимости. Далее восстанавливают защитный слой бетона специальными ремонтными составами, обладающими малой проницаемостью после твердения.

«В практике ремонта начали применять усиление железобетонных конструкций наружным армированием с помощью наклеиваемых полотнищ из углеродного волокна или установкой в специально сделанные пазы ламината из углепластика.» [4].

1.2.4 Морозная деструкция бетона

Данный вид повреждений наблюдается с высокой периодичностью, в частности, когда бетон претерпевается систематическое оттаивание и повторное замораживание [35]. «Морозная деструкция бетона многократно ускоряется, если насыщающая его вода содержит растворенные соли. Широко известны случаи преждевременного повреждения железобетонных элементов мостов от совместного воздействия противогололедных реагентов и мороза.» [4].

На рисунке 6 представлены механизмы и факторы морозной деструкции бетона.



Рисунок 6 – Механизмы и факторы морозной деструкции бетона

Такие повреждения сказываются не только на дорожных плитах, ограждениях, элементах гидротехнических сооружений, причалов, но и на фундаментах. Вместе с водой, в грунт проникают противогололедные реагенты, что может сказываться на фундаментах.

Ремонт поврежденных конструкций затруднителен, так как любая пропитка низковязкими мономерами с последующей полимеризацией или изолирующее покрытие со стороны замораживания может стать причиной ускоренного разрушения бетона.

Термодиффузионный поток влаги, возникающий в бетоне в процессе охлаждения, распространяется в направлении наиболее холодной зоны. Под изолирующим покрытием возникает такое большое количество влаги, что способствует быстрому разрушению бетона. «При глубоком повреждении

бетона тонкостенные конструкции следует заменять. В массивных конструкциях возможно удаление разрушенного слоя и замена его новым морозостойким бетоном. При этом применяется анкеровка нового слоя к старому бетону конструкции дополнительно устанавливаемой арматурой.» [4].

1.2.5 Повреждения при капиллярном всасывании и испарении растворов солей

Данный вид повреждений наблюдается при обильном содержании солей в воде, проникающей в бетон. Это свойственно для районов с жарким климатом и засоленными грунтами, а также для зданий различных производств с использованием солей [27, 28].

Ремонт поврежденных конструкций аналогичен с предыдущими видами повреждений, а именно – удаление поврежденного участка бетона и замена его более плотным бетонным раствором. В последствии применяется гидроизоляция, для исключения дальнейшего поглощения воды.

1.2.6 Кислотная коррозия

Коррозия арматуры начинается после нарушения сплошности защитных пленок (депассивации). Основная ее причина - нейтрализация защитного слоя под действием кислых сред. Как результат, pH поровой жидкости понижается.

Такая коррозия в основном характерна для различных промышленных предприятий. Также кислотная коррозия типична для повреждений коллекторов сточных вод [36]. В них развиваются аэробные тионовые бактерии, выделяющие серную кислоту H_2SO_4 с концентрацией 5-20% и используя сероводород H_2S в жизненном цикле, а это в свою очередь способствует созданию определенных солей и разрушению бетонных конструкций.

Кислотная коррозия бетона представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Кислотная коррозия бетона

При водородном показателе (рН) меньше 7, в растворах любых кислот прослеживается ускоренный процесс кислотной коррозии. Исключениями являются поликремниевая и кремнефтористоводородная кислоты. В растворах соляной кислоты (HCl) с водородным показателем равным единице, темп развития коррозии обычных бетонов с маркой по водонепроницаемости W4 составляет около 60 мм/год. Объясняется это меньшим влиянием кислот на бетоны высоких марок по водонепроницаемости, чем на обычные плотные бетоны.

Ремонт бетона, поврежденного кислотной коррозией, осуществляется путем удаления поврежденного слоя и его последующим восстановлением более плотным бетоном.

1.2.7 Сульфатная коррозия

Такая коррозия появляется в результате кристаллизации солей и испарения минерализованной воды в порах бетона. В свою очередь, это вызывает увеличение объема в порах цемента и, как следствие, трещины в бетонных конструкциях.

Особенностью сульфатной коррозии считается преобразование в твердую фазу продуктов химической реакции в процессе кристаллизации [42]. В процессе взаимодействия солей магния, растворенных в воде,

изменяются физико-механические параметры бетона. Сульфаты, которые вызывают коррозию бетона, наблюдаются в больших количествах в природных водах. «Содержание солей в воде мирового океана составляет (в г/л): NaCl - 27.2; MgCl₂ - 3.8; MgSO₄ - 1.7; CaSO₄ - 1.2» [1]. Природные воды можно классифицировать по степени минерализации (сумма всех веществ, растворенных в воде). Такая классификация представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация природных вод

Характеристика воды	Сухой остаток при выпаривании 1 л воды, г/л
Пресная	<1
Слабо-солончатая	1-3
Солончатая	3-10
Соленая	10-30
Рассол	>30

В результате первоначальной реакции солей магния и Ca(OH)₂ образуется гидроксид магния. По итогу реакции получается растворимый двуводный сульфат кальция (CaSO₄·2 H₂O), который вымывается из цементного камня. Химическая реакция идет до полного исчерпания гидроксида магния, в виде не растворяющегося в воде бесвязного осадка.

Данный вид коррозии различается по специфике воздействия определенных химических соединений и делится на две группы.

Классификация этих групп представлена на рисунке 8.

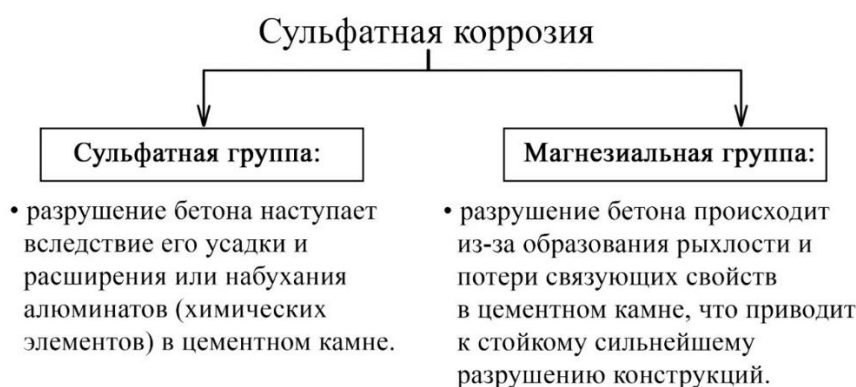


Рисунок 8 – Классификация сульфатной коррозии

Пример конструкции, подверженной сульфатной коррозии представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Конструкция, подверженная сульфатной коррозии

Следует отметить, что воздействие растворов сульфатов на бетон приводит к стремительному коррозионному разрушению последнего. Так как в порах бетона и разрушают его. Ниже приведена информация о степени агрессивности сульфатосодержащих сред в отношении бетонов.

Для предупреждения такой коррозии применяют специальные плотные бетоны с сульфатостойким портландцементом. Он содержит минимальное количество клинкерных минералов портландцементов, таких как $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, и других.

1.2.8 Внутренняя коррозия бетона

«Процесс внутренней коррозии состоит в том, что реакционноспособные компоненты заполнителя вступают в химическое взаимодействие с щелочами цемента и химических добавок, образуют на контакте с цементным камнем и в микротрещинах зерен заполнителей вязкий силикатный гель и, создавая внутреннее давление, приводят к растрескиванию бетона.» [4].

В данном случае в качестве защиты от коррозии выступает ограничение содержания щелочей и применение специальных минеральных добавок. [2,6].

Ремонт таких повреждений практически невозможен. В практике существуют попытки остановки коррозии путем пропитки бетона солями лития, но данная технология еще не доведена до применения в строительстве. В настоящий момент, процесс коррозии можно только приостановить, если бетон высушить и поддерживать в сухом состоянии.

Выводы по первой главе:

Определены основные сведения о железобетоне и его долговечности. Определены основные виды коррозии арматуры. Рассмотрены примеры наиболее распространённых видов ремонта и защиты конструкций подверженных коррозии. Проведен анализ научных работ, статей и исследований по заданной теме магистерской диссертации.

2 Характеристики используемых материалов. Методики исследований

2.1 Свойства используемых материалов

2.1.1 Портландцемент

Практическая часть данной работы осуществлялась в лабораторном комплексе «Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства» Тольяттинского государственного университета.

В экспериментальной работе, в роли вяжущего был выбран композиционный портландцемент Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5. Выбранный цемент представлен на рисунке 10 и соответствует ГОСТ 31108 – 2016 «Цементы общестроительные. Технические условия», а также ГОСТ 30515 – 2013 «Цементы. Общие технические условия».



Рисунок 10 - Цемент Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5

Быстротвердеющим цементом (БТЦ) называют бетонный раствор, обладающий ускоренной гидратацией, что в свою очередь существенно сокращает время набора прочности [3]. Приготовление БТЦ подразумевает

мелкий помол ингредиентов. Чем меньше гранулы, тем больше их площадь взаимодействия с реагентом, а это в свою очередь ускоряет гидратацию.

В таблице 2, представлены основные свойства цемента.

Таблица 2 – Характеристики цемента

Наименование	Значение
Предел прочности при сжатии 2 суток, МПа	26,1
Предел прочности при сжатии 28 суток, МПа	48,7
Начало схватывания, мин	187
Конец схватывания, мин	242
Удельная поверхность, см ² /г	4682
Остаток на сите с отверстиями 32 мкм, %	11,4
Нормальная густота раствора, %	26,3

В таблице 3 перечислен химический состав цемента в процентах.

Таблица 3 – Химический состав цемента

Наименование	Значение
Оксид кальция CaO, %	62,5
Оксид кремния SiO ₂ , %	17,0
Оксид алюминия Al ₂ O ₃ , %	4,2
Оксид железа (III) Fe ₂ O ₃ , %	2,9
Оксид магния MgO, %	1,2
Оксид серы (VI), %	0,6
Оксид титана (II) TiO, %	0,3
Оксид фосфора P ₂ O ₅ , %	0,1

В таблице 4 представлен минералогический состав цемента.

Таблица 4 – Минералогический состав цемента

Наименование	Значение
Трехкальциевый силикат C ₃ S, %	69,9
Двухкальциевый силикат C ₂ S, %	8,4
Трехкальциевый алюминат C ₃ A, %	4,9
Четырехкальциевый алюмоферрит C ₄ AF, %	12,5
Оксид кальция CaO, %	1,9

«При производстве цементов применяется портландцементный клинкер. В нем суммарное содержание трехкальцевого и двухкальцевого силикатов ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) составляет не менее 67% массы клинкера, а массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния (CaO/SiO_2) – не менее 2,0. Содержание оксида магния (MgO) в клинкере не должно быть более 5,0% массы клинкера» [9].

2.1.2 Крупный заполнитель

В роли крупного заполнителя использован щебень из гранодиоритов, соответствующий ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». Гранодиориты представляют собой плотные горные породы, фракцией 5-10 мм из Гумбейского щебеночного комплекса.

В общей массе заполнителя не присутствуют вредные примеси, комки глины и частицы слабых пород.

Характеристики щебня определены в соответствии с требованиями [14,15]:

- марка по дробимости щебня М1400;
- 2 группа щебня (содержание зерен лещадной и игловатой формы составляет 13% по массе);
- марка по истираемости И-1;
- морозостойкость F300;
- насыпная плотность 1360 кг/м³.

2.1.3 Мелкий заполнитель

В роли мелкого заполнителя выбран природный песок Волжского месторождения, соответствующий требованиям ГОСТ 8736 – 2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

На рисунке 11 представлен процесс определения гранулометрического состава песка при помощи сит с круглыми отверстиями диаметром 5, 2,5 мм и сетками 1,5, 0,63, 0,315, 0,16 мм.

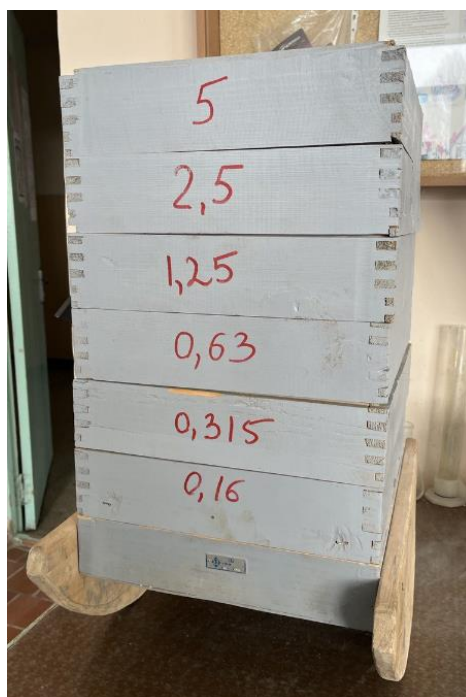


Рисунок 11 – Определение гранулометрического состава песка

Гранулометрический состав песка представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Гранулометрический состав Волжского песка

№ Сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
5	-	-
2,5	0,4	-
1,25	0,4	0,8
0,63	1,2	2
0,315	30	32
0,16	66	98
< 0,16	2	100
	100	

Модуль крупности песка определяем по формуле (3):

$$M_{кр} = \frac{0,8 + 2 + 32 + 98}{100} = 1,33.$$

Согласно таблице 1 [2] Волжский песок по своему модулю крупности является очень мелким песком.

Полный остаток на сите № 0,63 равен 2 %, в соответствии с требованиями таблицы 2 [2].

На рисунке 12 представлен песок Волжского месторождения.



Рисунок 12 - Речной Волжский песок

Одним из основных факторов пластичного бетона является удобоукладываемость смеси. Изменение свойств раствора в худшую сторону наблюдается из-за избытка цементной смеси. Это влечет за собой увеличение усадки, ползучести, образование трещин и снижение долговечности. Состав зернового песка необходимо регулировать.

2.1.4 Микрозаполнитель

В данной работе в качестве микрозаполнителя был выбран высокоактивный метаксаолин.

Метаксаолин представляет собой высокоактивную пуццолановую добавку. Ее применение в производстве бетонных смесей приводит к уплотнению затвердевшего бетона.

Это объясняется тем, что средний размер частиц высокоактивного метаксаолина значительно меньше качества измельчения (тонины помола) вяжущего [37]. В свою очередь, это позволяет говорить о заполнении пустот

между частицами, которые вступают в химическую реакцию с частицами клинкерных минералов. Это приводит к возникновению плотных новообразований [38].

Результатом такого взаимодействия является основательное уплотнение структуры твердеющего бетона, что приводит к повышению его плотности, показателей водонепроницаемости, долговечности и стойкости от коррозии. «Так как следствием введения в состав бетона ВМК, является его взаимодействие с гидрозной известью - портландитом, образующейся от гидратации основных клинкерных минералов – алита и белита, то в результате твердения, бетон обладает не только повышенной плотностью и как следствие высокими эксплуатационными характеристиками, но и высокой стойкостью к основным видам химической коррозии бетона» [9]. Применение пластификаторов в приготовлении бетонного раствора из порошков с тонко измельченными частицами, активными минеральными добавками является необходимым условием [41]. Иначе, дисперсность такого порошка спровоцирует резкое повышение водопотребности, что в свою очередь приведет к существенному снижению прочности бетона.

Метакаолин (ВМК) представлен на рисунке 13.



Рисунок 13 - Молотый ВМК

В таблице 6 представлены гранулометрический состав метакаолина и его характеристики.

Таблица 6 – Характеристики высокоактивного метакеолина

Свойство	Значение
1. Гранулометрический состав	
Наибольший размер частиц (d_{99}), %	78-83
Наибольший размер частиц (d_{50}), %	8-12
Остаток на сите 008, %	0,08
Остаток на сите 004, %	2
Массовая доля частиц размером меньше 20 мкм, %	>90
2. Химический состав	
Потери при прокаливании при 1000 °С	1,1
Массовая доля оксида кремния SiO_2 , %	51,4
Массовая доля оксида калия (K_2O), %	>1,1
Массовая доля оксида железа Fe_2O_3 , %	0,8
Массовая доля оксида кальция (CaO), %	>0,2
Массовая доля оксида алюминия Al_2O_3 , %	>42
3. Физические свойства	
Насыпная плотность (в уплотненном состоянии), кг/м^3	550
Кислотность рН водной суспензии, ед.	6,5
Влажность, %	<0,5
Пуццоланическая активность, мг $\text{Ca}(\text{OH})_2$	>1000
Удельная поверхность, г/см^2	12000–13000
Насыпная плотность (в рыхлом состоянии), кг/м^3	450

«Введение МТК в мелкозернистую бетонную смесь должно производиться в строго определенных дозировках, не превышающих 8% от массы цемента. Превышение установленной дозировки МТК приводит к резкому снижению прочности мелкозернистых бетонов» [7].

2.1.5 Пластификатор

Для улучшения свойств бетона и уменьшения расхода раствора был применен Полипласт СП-4, с помощью которого увеличивается значение прочности, водонепроницаемости, долговечности бетона. А также происходит снижение расхода цемента.

Суперпластификатор Полипласт СП-4 – комплексная добавка в жидком виде, имеющая плотность $1,17 \text{ г/см}^3$ и показателем кислотности рН 8 ± 1 . Цвет может варьироваться от светло-бежевого до темно-коричневого.

Применяют его в основном при производстве товарного бетона.

Преимущества Полипласта СП-4:

- повышается подвижность раствора;
- уменьшается водопотребность и количество цемента;
- повышается прочность смеси (более 20%);
- увеличивается водонепроницаемость и морозостойкость;
- снижается время, энергетические затраты на вибрирование раствора или отказ от него в некоторых случаях.

Технические характеристики суперпластификатора приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики Полипласта СП-4

Характеристики	Описание
Основа добавки	Смесь сополимеров на основе солей алкилнафталинсульфокислот.
Дозировка	0,2–1,2 % от массы цемента
Плотность	1,17 г/см ³ (при 20°С)
Особые отметки	Раствор Полипласта СП-4 необходимо вводить смешанным с водой, используемой для затворения бетона. Пластификатор необходимо смешивать до однородности в течение 60-100 секунд.

2.1.6 Добавки

В данной работе выбрана гидроизоляционная добавка Goodhim INTERPLAST AT S GIDRO на основе кремнийорганических сополимеров, биоцидов и ПАВ. Позволяет увеличить водонепроницаемость, прочность, а также морозоустойчивость готовой конструкции.

Положительные особенности данной добавки:

- повышение удобоукладываемости смеси,
- увеличение значений водостойкости и гидрофобных свойств,
- повышение морозостойкости,
- обладание сильным антисептическим действием,
- увеличение значений водонепроницаемости,
- снижение образований высолов в процессе строительства.

На рисунке 14 представлена добавка Goodhim INTERPLAST.



Рисунок 14 – Гидрофобизатор Goodhim INTERPLAST AT S GIDRO

Goodhim представляет собой раствор темно-коричневого цвета, на основе кремнийорганических сополимеров и биоцидов. Ее применение позволяет исключить дополнительное применение гидроизоляции конструкции после набора прочности, а также повышает сульфатостойкость цементного камня. Данная добавка позволяет защитить готовую конструкцию от агрессивного воздействия кислотных, щелочных, хлоридных, сульфатных сред, биокоррозии, а также грунтовых, морских вод. Затвердевший бетон сохраняет прочностные характеристики даже при высоком радиоактивном воздействии.

Активные элементы гидрофобизатора вступают в реакцию с ионами кальция и алюминия, различными оксидами и карбонатами металлов, содержащимися в бетоне и, по итогу реакции, получаются более сложные карбонаты [39]. Они, в свою очередь, создают нерастворимые кристаллогидраты и заполняют тем самым микрокапилляры, становясь частью бетона. Это позволяет предотвратить пропускание воды в тело бетона (действуют силы поверхностного натяжения жидкостей). Сеть кристаллов препятствует фильтрации воды при высоком гидростатического давления. Такой бетон приобретает свойства водонепроницаемости, и способности к «самозалечиванию», сохраняя при этом паропроницаемость.

Характеристики материала перечислены в таблице 8.

Таблица 8 – Технические характеристики Goodhim INTERPLAST

Наименование показателя	Значение
Внешний вид	Раствор темно-коричневого цвета
Повышение марки по водонепроницаемости бетона, ступеней, не менее	2
Повышение прочности на сжатие от начальной, %, не менее	8
Насыпная плотность в стандартном неуплотненном состоянии, кг/ м	1100±20
Повышение морозостойкости бетона, пунктов, не менее	4
Стойкость бетона к действию растворов кислот: HCl, H ₂ SO ₄	+
Стойкость бетона к действию щелочей: NaOH	+
Ультрафиолет	не оказывает влияния
Применимость для резервуаров питьевой воды	+
Кислотность среды применения, рН	3-10
Условия хранения материала	При температурах от +5°С до +30°С, при случайной заморозке раствора рекомендуется его разогреть и тщательно перемешать
Гарантийный срок хранения материала, месяцев, не менее	12

2.2 Методы экспериментальных исследований

2.2.1 Песок

Согласно методикам, ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» и ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» оценивались качество и свойства мелкого заполнителя.

Зерновой состав определяют путем отсева песка на стандартном наборе сит. Набор сит по ГОСТ 6613 и сита с круглыми отверстиями диаметрами 5 и 2,5 мм. Аналитическую пробу песка массой не менее 2000 г высушивают до постоянной массы. Высушенную до постоянной массы пробу

песка просеивают через сита с круглыми отверстиями диаметрами 10 и 5 мм [16, 17].

Просеивание производят механическим или ручным способами. Продолжительность просеивания должна быть такой, чтобы при контрольном интенсивном ручном встряхивании каждого сита в течение 1 мин через него проходило не более 0,1% общей массы просеиваемой навески.

При механическом просеивании его продолжительность для применяемого прибора устанавливают опытным путем. При ручном просеивании допускается определять окончание просеивания, интенсивно встряхивая каждое сито над листом бумаги. Просеивание считают законченным, если при этом практически не наблюдается падения зерен песка.

«Определим по итогам эксперимента:

- частный остаток на сите:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (1)$$

где: m_i – масса остатка на данном сите, г;

m – масса просеиваемой навески, г.

- полный остаток на каждом сите:

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,5} + \dots + a_i, \quad (2)$$

где: $a_{2,5}$, $a_{1,5}$, a_i – частные остатки на соответствующих ситах» [9];

- модуль крупности песка определяют по формуле:

$$M_{кр} = \frac{\sum A_i}{100}, \quad (3)$$

где $\sum A_i$ – сумма полных остатков на ситах с круглыми отверстиями диаметром 5, 2,5 мм и на ситах с сетками 1,5, 0,63, 0,315, 0,16 мм.

Насыпная плотность песка определяется его взвешиванием в мерных емкостях. Песок взвешивают объемом 1000 см^3 и насыпают в пустую емкость, предварительно определив ее массу. Засыпание песка происходит до образования над верхом цилиндра конуса с высоты 10 см от верха сосуда. Уплотнение песка не требуется. Далее конус срезают металлической линейкой по краям емкости, после это ее взвешивают.

На рисунке 15 представлен процесс определения насыпной плотности песка.



Рисунок 15 - Определение насыпной плотности Волжского песка

«Подсчет насыпной плотности песка:

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V}, \quad (4)$$

где m_1 – масса мерного сосуда с песком, кг;

m – масса мерного сосуда;

V – вместимость сосуда, m^3 » [9].

2.2.2 Добавки

Качество и свойства добавок predetermined в соответствии с ГОСТ 30459 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности» и ГОСТ 24211 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».

«Материалы, применяемые для приготовления смесей, бетонов или растворов, должны соответствовать нормативным или техническим документам на эти материалы и иметь документ о качестве.

Добавки должны иметь документ о качестве, подтверждающий их соответствие всем нормируемым показателям качества, регламентируемым в нормативном или техническом документе, по которому производится и применяется добавка конкретного вида.

Добавки следует вводить в смеси основных составов в соответствии с требованиями нормативных или технических документов на добавки конкретных видов. Сыпучие водонерастворимые добавки вводят в основные составы в сухом виде, после чего сухая смесь с добавкой должна быть тщательно перемешана до подачи в нее воды.

Эффективность действия добавок, повышающих прочность бетонов и растворов, оценивают по увеличению прочности образцов основных составов по сравнению с контрольным.

Эффективность действия гидрофобизирующих добавок оценивают по степени уменьшения водопоглощения бетонов и растворов основных составов по сравнению с контрольным составом и по гидрофобизирующей способности добавок» [13].

2.2.3 Подбор состава бетонной смеси

В соответствии с ГОСТ 27006 – 86 «Бетоны. Правила подбора состава» были подобраны оптимальные составы бетонного раствора.

Усовершенствование состава определяется расчетно-экспериментальным методом, включающим в себя: создание состава с применением исходных данных, таблиц, графиков; формирование состава методом пробных замесов; анализ реального расхода материалов на 1 м³ бетона самого приемлемого замеса [11].

2.2.4 Определение подвижности бетонной смеси

Перед созданием образцов, следует оценить подвижности бетонной смеси в соответствии с ГОСТ 10181 – 2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний». «Подвижность бетонной смеси оценивают по осадке конуса (ОК), отформованного из бетонной смеси» [1].

«Для определения подвижности бетонной смеси применяют: нормальный или увеличенный конус, металлическую линейку по ГОСТ 9533, загрузочную воронку, кельму типа КБ по ГОСТ 9533, прямой металлический гладкий стержень диаметром 16 мм, длиной 600 мм с округленными концами» [6].

«Конус устанавливают на гладкий лист и заполняют бетонной смесью марок П1, П2 или П3 через воронку в три слоя одинаковой высоты. Каждый слой уплотняют штыкованием металлическим стержнем в нормальном конусе 25 раз, в увеличенном – 56 раз. Конус во время заполнения и штыкования должен быть плотно прижат к листу. После уплотнения бетонной смеси снимают загрузочную воронку, избыток смеси срезают кельмой вровень с верхними краями конуса и заглаживают поверхность бетонной смеси. Время от начала заполнения конуса до его снятия не должно превышать 3 минуты. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая гладкий стержень на верх конуса и измеряя расстояние от нижней поверхности стержня до поверхности бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см» [6].

На рисунке 16 представлен процесс измерения осадки конуса.

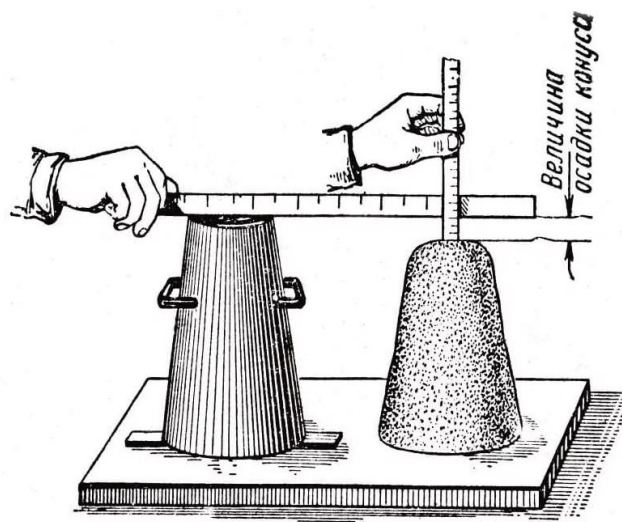


Рисунок 16 – Определение осадки конуса

Приготовленный раствор перекладывают в металлические формы, предварительно смазанные техническим маслом, чтобы упростить распалубку. Далее смесь уплотняют на виброплощадке, а затем накрывают влажной материей. Это делается предотвращения испарения влаги. Температура в помещении выдерживания образцов должна составлять $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью в $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9]. По истечению суток образцы достают и выдерживают в камере для твердения в течение 7, 14 и 28 суток при температуре $20\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительной влажности воздуха $95\pm 5\%$. Образцы в камере не должны поливаться водой. Разрешено хранить образцы под влажными слоями песка, опилок и иных материалов, способных впитывать водяные пары из воздуха.

Осадку конуса определяем по формуле:

$$OK = \frac{D_1 + D_2}{2}, \text{ мм}, \quad (5)$$

где D_1 – максимальный диаметр расплыва, мм;

D_2 – диаметр расплыва в перпендикулярном направлении, г.

2.2.5 Определения предела прочности

Испытания проводятся согласно ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Предел прочности при сжатии образцов испытывается на образцах кубической формы размерами 70×70×70 мм при помощи гидравлического пресса. Перед испытанием образцы измеряются и взвешиваются (погрешность измерений не превышает 0,1 %).

При плавном и постоянном возрастании нагрузки до полного разрушения образца, максимальное значение усилия представляет собой разрушающую силу [5].

Предел прочности при сжатии определяется по формуле:

$$R_{сж} = \frac{P}{F} \cdot \alpha, \quad (6)$$

где P – разрушающая сила, кг;

F – площадь поперечного сечения образца, см²;

α – масштабный коэффициент.

Для куба с ребром 70 мм принимается масштабный коэффициент равный 0,85.

2.2.6 Определения водопоглощения

Водопоглощение образцов определяется согласно ГОСТ 12730.3 – 2020 «Бетоны. Методы определения водопоглощения».

Поверхность образцов очищается от загрязнений. Испытания длятся при высушивании образцов до постоянной массы.

Процесс высушивания соответствует ГОСТ 12730.2 – 78 «Бетоны. Метод определения влажности». Образцы взвешивают и сушат в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 105°С с увеличением или уменьшением температуры на 5 °С. Постоянной массу образца считают, в случае если результаты двух последовательных взвешиваний отличаются не более, чем на 0,1 %.

Бетонные кубы помещают в емкость так, чтобы уровень воды в ней был выше уложенных кубов приблизительно на 5 см. Температура воды в должна находиться в пределах 20 ± 2 °С.

Взвешивание производится через каждые сутки водопоглощения на обычных или гидростатических весах (погрешность не превышает 0,1 %). Перед взвешиванием на обычных весах, образцы вытирают выжатой влажной тканью. Воду, вытекшую в чашку весов, включают в массу насыщенного образца. Испытание проводится пока результаты двух последовательных взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,1%.

Водопоглощение бетона по массе в % определяют по формуле:

$$W_M = \frac{m_c - m_b}{m_c} \cdot 100, \quad (7)$$

где m_c – масса сухого образца, г;

m_b – масса влажного образца, г.

Водопоглощение по объему в % определяют по формуле:

$$W_0 = \frac{W_c - \rho_0}{\rho_b}, \quad (8)$$

где ρ_0 – плотность сухого бетона, кг/м³;

ρ_b – плотность воды, принимаемая 1 г/см³.

2.2.7 Определения пористости бетона

Пористость определяют по ГОСТ 12730.4 – 78 «Бетоны. Методы определения показателей пористости».

Полный объем пор в % определяют по формуле:

$$P_{\Pi} = \left(\frac{\rho_b - \rho_0}{\rho_b} \right) \cdot 100, \quad (9)$$

где ρ_b – плотность измельченного в порошок бетона, определенная при помощи пикнометра;

R_0 – плотность сухого бетона.

Истинная плотность образца определяется измерением массы единицы объема измельченного высушенного материала.

Объем открытых капиллярных пор бетона в % определяют по формуле:

$$W_0 = W_0, \quad (10)$$

где, W_0 – объемное водопоглощение бетона, %.

Водостойкость образцов зависит от коэффициента размягчения. Он равен отношению прочности в водонасыщенном состоянии к прочности в сухом состоянии.

Коэффициент размягчения вычисляют по формуле:

$$K_p = \frac{R_{\text{нас}}}{R_{\text{сух}}}, \quad (11)$$

где $R_{\text{нас}}$ – предел прочности при сжатии образцов, насыщенных водой, Мпа;

$R_{\text{сух}}$ – предел прочности при сжатии сухих образцов, Мпа.

2.2.8 Определение коррозионной стойкости бетона

После твердения в течении 28 суток образцы помещают в емкость с водой на 14 суток, затем перемещают в агрессивную среду. Раствор хлорида магния представляет собой хлоридную коррозию, раствор сульфата магния – сульфатную коррозию.

Коррозионная стойкость оценивается пределом прочности на сжатие [12], вычисляемой по формуле:

$$K_c = \frac{R_{\text{сж.}}^{\text{ар.}}}{R_{\text{сж.}}^{\text{норм.}}}, \text{ Мпа}, \quad (12)$$

где $R_{сж.}^{agr.}$ – предел прочности на сжатие образцов после воздействия агрессивной среды, МПа;

$R_{сж.}^{норм.}$ – предел прочности на сжатие образцов перед воздействием агрессивной среды, МПа.

Выводы по второй главе.

По результатам раздела 2 были рассмотрены:

- свойства используемых материалов (портландцемента, мелкого заполнителя, макрозаполнителя, пластификатора, добавки),
- подобран оптимальный состав бетонной смеси,
- изучены методы экспериментальных исследований (метод определения подвижности бетонной смеси, определение пределов прочности при сжатии и изгибе, пористости, водопоглощения, коррозионной стойкости бетона).

3 Коррозионная стойкость бетонов высокой плотности

3.1 Получение бетонов высокой плотности с применением микрозаполнителя

Бетон обладает капиллярно-пористым строением, что способствует поглощению влаги при взаимодействии с ней и напрямую из воздуха. Способность поглощать влагу из воздуха у тяжелого бетона находится в пределах 7-8 %, в то время как у легких бетонов гигроскопичное водопоглощение составляет 20-25 %.

«Водопоглащение – способность материала впитывать и удерживать воду. Характеризуется оно количеством воды, поглощаемой сухим материалом» [10] и зависит от характера пор. Чем больше пор, тем выше значение водопоглощения.

Высокие значения водопоглощения и пористости бетона негативно отражаются на его морозостойкости, приводят к коррозии, а именно, к быстрому разрушению конструкции.

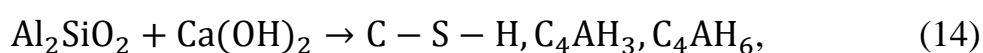
«Выщелачивание 15-30% гидроксида кальция от общего содержания бетона вызывает понижение его прочности в 2 раза. В результате выщелачивания гидроокиси кальция повышается пористость цементного камня и снижается его прочность.

Один из вариантов снижения негативного воздействия пресных вод является добавление активных минеральных добавок, связывающих гидроксид кальция в низкоосновные малорастворимые силикаты кальция.

Метакаолин ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) – высокодисперсный алюмосиликатный материал, который обладает пуццолановой активностью. Данная минеральная добавка образуется в результате обжига каолиновых глин при температуре (650-900°C)» [21]. При такой температуре происходит выделение воды и распад кристаллического каолинита на аморфный метакаолин согласно реакции (13).



«Метакаолин в бетоне реагирует с гидроксидом кальция с образованием гидратов силиката кальция (CSH-гель) вместе с кристаллическими продуктами, такими как гидраты алюмината кальция и алюмосиликатные гидраты, они заменяют гидроксид кальция, тем самым способствуя улучшению микроструктуры бетона» [2] по реакции (14).



Чтобы уменьшить значения пористости и водопроницаемости цементного камня используют специальные добавки. Одной из таких добавок является высокоактивный метакаолин (ВМК).

Метакаолин представляет собой высокоактивную пуццолановую добавку. Он способствует снижению пористости благодаря заполнению порового пространства в процессе химической реакции.

Для определения оптимального количества высокоактивного метакаолина, добавляемого в бетонную смесь, были изготовлены бетонные образцы (таблица 9), содержащие 5, 8 и 10% ВМК от массы цемента.

Таблица 9 – Составы бетонных образцов с 5, 8 и 10 % ВМК

№ партии	1 ¹	1 ²	1 ³
Цемент, кг/м ³	420	386	378
Песок, кг/м ³	857,6	775	753
Щебень, кг/м ³	816	782	809
Вода, кг/м ³	209	198	206
ВМК, кг/м ³	21	34	42
СП-4, кг/м ³	4,2	4,2	4,1
В/Ц	0,45	0,45	0,45
Средняя плотность, кг/м ³	2327,8	2179,2	2192,1
Осадка конуса, см	6,5	6	6,5

После выдерживания в нормальных условиях твердения в течение 28 суток данные бетонные образцы испытывались на предел прочности при сжатии, пористость и водопоглощение (рисунок 17, таблица 10 и 11).

Таблица 10 – Физико-механические свойства образцов партий 1¹, 1² и 1³

№ партии	Водопоглощение по массе, W_m , %	Водопоглощение по объему, W_v , %	Пористость, P_p , %
1 ¹	6,1	14,2	11,3
1 ²	5,5	12,3	11,61
1 ³	4,9	13,45	15,21

При увеличении процентного содержания ВМК (таблица 10) заметно снижаются значения водопоглощения образцов.

Таблица 11 – Прочность бетонных образцов партий 1¹, 1² и 1³

№ партии	Количество ВМК	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа		
		7 сут	14 сут	28 сут
1 ¹	5 %	35,4	43,3	49,4
1 ²	8 %	38,2	46,7	56,2
1 ³	10 %	40,7	45,4	51,3

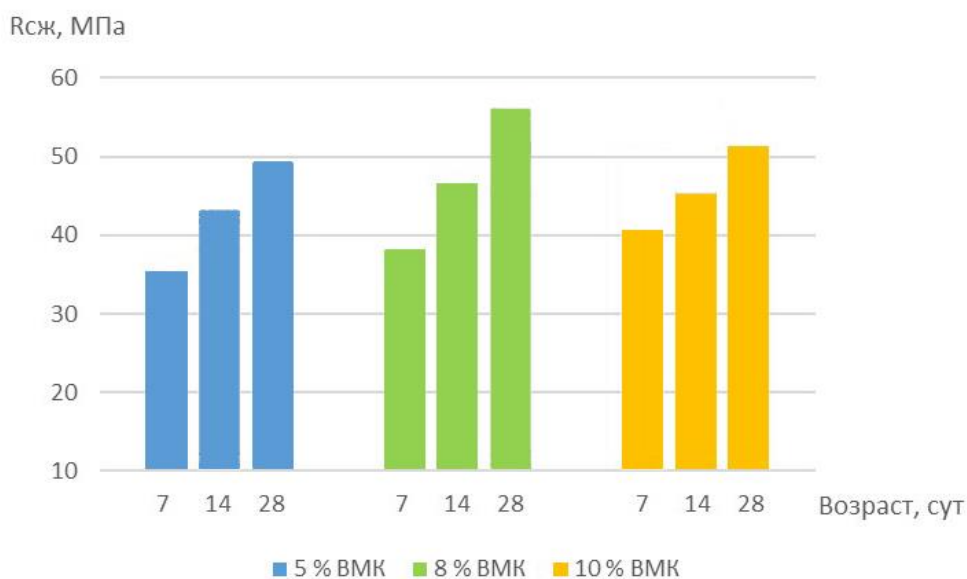


Рисунок 17 – Предел прочности при сжатии

Проанализировав полученные результаты (таблица 10 и рисунок 17) можно сделать вывод, что самые высокие значения прочности принадлежат бетонным образцам с применением ВМК 8 % от массы цемента, а при увеличении дозировки показатели прочности снижаются.

Следовательно, для дальнейших исследований, во всех составах применяется 8 % ВМК.

3.2 Коррозионная стойкость бетонов

Бетоны подвергаются химической коррозии ввиду воздействия на них хлоридов, сульфатов, щелочей, содержащихся в воде. Пресная вода растворяет и вымывает из тела цементного камня гидроксид кальция, тем самым приводит к увеличению пор в структуре бетона и к его последующему разрушению. Чтобы сократить водопоглощение и снизить пористость бетона, применяют специальные добавки [22, 23]. В данной работе в качестве дисперсной добавки был выбран высокоактивный метакаолин – в процессе его химической реакции с известью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ увеличивается объемная концентрация тонкодисперсного наполнителя и образуются нерастворимые гидроалюмосиликаты кальция, заполняющие собой капилляры бетона.

В работе применялся суперпластификатор Полипласт СП-4. Применение суперпластификатора позволяет снизить водопотребность раствора при замешивании, сократить расход цемента и увеличить пластичность раствора.

Применение гидрофобизатора Goodhim Interplast AT S Gidro позволяет снизить водонасыщение посредством образования защитной пленки на стенках пор и капилляров в структуре бетона.

В целях изучения воздействия комплексных добавок на коррозионную стойкость цементного камня были изготовлены партии образцов различных составов, с габаритными размерами 70×70×70 мм и 40×40×160 мм.

При изготовлении всех партий использовали портландцемент Holcim M500 ЦЕМ II/A-И 42.5, щебень из гранодиоритов фракцией 5-10 мм и Волжский песок ($M_{кр}=1,3$). Во всех партиях водоцементное соотношение В/Ц равно 0,45.

В таблице 12 представлены составы исследуемых бетонов.

Таблица 12 – Составы исследуемых бетонов

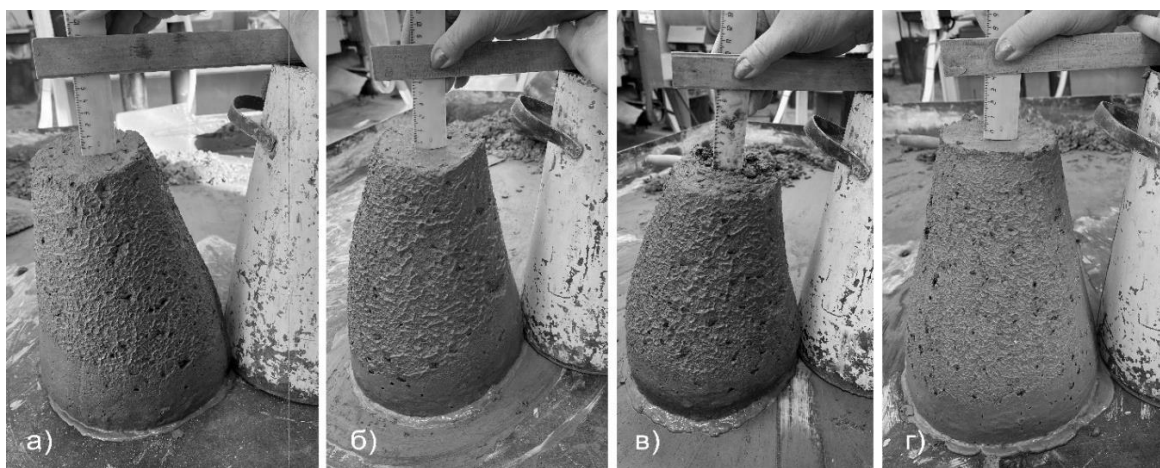
№ партии	1	2	3	4
Цемент, кг/м ³	420	423	417	407,5
Песок, кг/м ³	857,6	870	858	879,8
Щебень, кг/м ³	814,3	826	814	835
Вода, кг/м ³	205,5	190	206	183
ВМК, кг/м ³	35,7	-	35	-
СП-4, кг/м ³	4,2	4,2	4,1	4,1
Goodhim, кг/м ³	-	-	4,1	4,1
В/Ц	0,45	0,45	0,45	0,45
Средняя плотность, кг/м ³	2337,5	2313,5	2338,2	2313,5
Осадка конуса, см	6	6	6,5	6

Осадка конуса определялась путем измерения расстояния от нижней плоскости стержня (линейки) до поверхности раствора. Измерение осадки конуса представлено на рисунке 18.

На рисунке 19 изображен гидравлический пресс П-50, используемый для проведения испытаний на прочность при сжатии.

Образцы размерами 70×70×70 мм использовались для определения прочности на сжатие $R_{сж}$, а образцы с размерами 40×40×160 мм – для определения прочности на изгиб $R_{изг}$.

Подбор составов бетонных смесей был произведен в соответствии с требованиями к бетонам, применяемым в конструкциях (фундаментах, перекрытиях и т.д.) промышленных сооружений, подверженных агрессивным средам, гидротехнических и мостовых сооружений (в частности береговых опор), а также других сооружений, чаще всего подверженных разрушениям цементного камня в следствии коррозии.



а - осадка конуса 1 партии, б - осадка конуса 2 партии, в - осадка конуса 3 партии, г - осадка конуса 4 партии

Рисунок 18 – Измерение осадки конуса



Рисунок 19 – Гидравлический пресс П-50

Образцы выдерживались в нормальных условиях твердения на протяжении 28 суток [8]. Испытания на прочность проводились каждые 7 суток и результаты испытаний представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Результаты исследования бетона (в нормальных условиях)

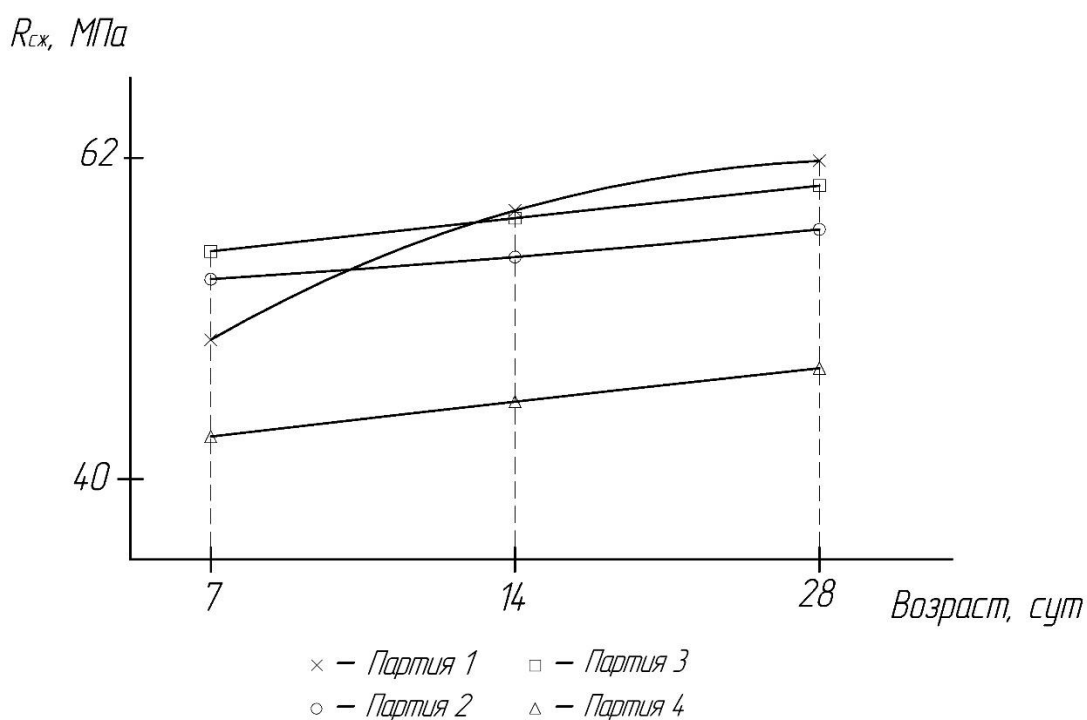
Партия	Наименование добавок	В/Ц	Средняя плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Прочность R _{сж} , МПа, в возрасте, сут		
					7	14	28
1	СП-4+ВМК	0,45	2337,5	2640	54,7	58,4	61,6
2	СП-4	0,45	2313,5	2635	53,7	55,2	57,1
3	СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%	0,45	2322,5	2640	55,6	57,9	60,1
4	СП-4+ Goodhim 1%	0,45	2337,5	2630	42,9	45,3	47,6

Испытанные на предел прочности при сжатии образцы представлены на рисунке 20.



Рисунок 20 - Бетонные образцы после испытания на предел прочности при сжатии

На рисунке 21 приводится график набора прочности при выдерживании в нормальных условиях твердения.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

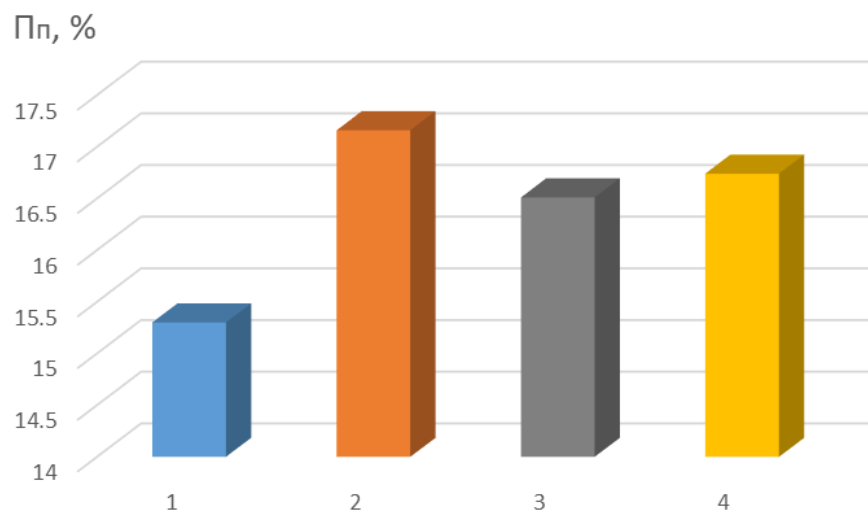
Рисунок 21 - График набора прочности бетона

Итоги испытаний физико-механических свойств бетонных образцов в возрасте представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Физико-механические свойства образцов партий 1, 2, 3 и 4

№ партии	1	2	3	4
Водопоглощение по массе, W_m , %	6,37	7,1	6,42	6,62
Водопоглощение по объему, W_v , %	15,75	17,3	15,82	16,2
Пористость, P_p , %	15,4	17,16	16,5	16,74

Пористость бетонных образцов представлена в виде графика на рисунке 22.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 22 – Пористость бетонных образцов партий 1,2,3 и 4

Пористость бетонных образцов партий 1, 3 и 4 меньше значений 2 партии на 10,8 %, 3,8 % и 2,5 % соответственно.

Водопоглощение (по массе) бетонных образцов представлено в виде графика на рисунке 23.

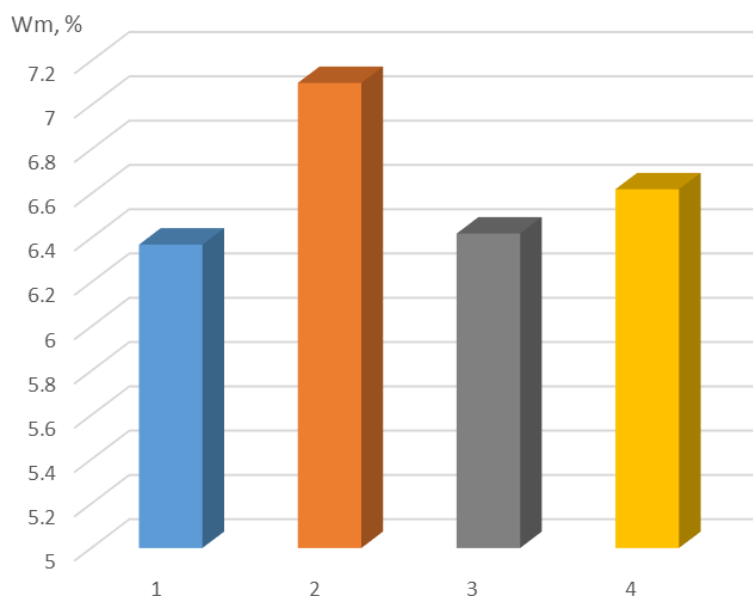
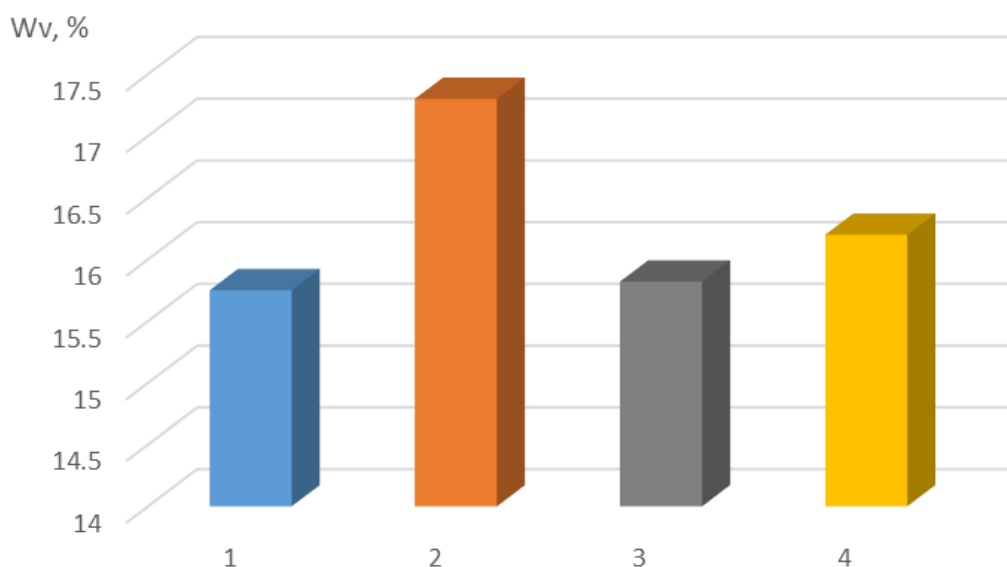


Рисунок 23 – Водопоглощение по массе бетонных образцов партий 1, 2, 3, 4

Значения водопоглощения по массе бетонных образцов 1, 3 и 4 партий также меньше значений 2 партии на 10 %, 9,5 % и 7 % соответственно.

Водопоглощение (по объему) бетонных образцов представлена в виде графика на рисунке 24.

Значения водопоглощения по объему бетонных образцов 1, 3 и 4 партий меньше значений 2 партии на 9 %, 14 % и 6,4 % соответственно.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 24 – Водопоглощение по объему бетонных образцов партий 1, 2, 3, 4

Анализируя полученные результаты исследований - лучшие результаты по прочности, пористости и водопоглощению принадлежат партии 1 и 2, где применялся ВМК. Можно сделать вывод, что структура цементного камня меняется и становится более плотной, происходит формирование и оптимизация структуры порового пространства, что позволяет получить бетоны высокой прочности.

3.2.1 Хлоридная коррозия

Хлоридной и сульфатной коррозии в основном подвержены мостовые и гидротехнические сооружения, конструкции, подверженные воздействию

грунтовых вод и конструкции промышленных зданий химических предприятий. Например, на заводе Куйбышев Азот (г. Тольятти) в процессе производства различных химических удобрений, в окружающую среду выделяются различные агрессивные вещества, в частности хлорид и сульфат магния. Хлоридной и сульфатной коррозии на производствах подвергаются такие железобетонные конструкции как фундаменты, плиты перекрытия и колонны.

Бетон, как и все строительные материалы, насыщается водой. Тем самым под воздействием растворенных в воде солей магния изменяются его структурные и физико-механические показатели [18, 19, 20]. Основными источниками содержания данных солей являются грунтовая и морская вода. Содержание солей в воде мирового океана составляет (в г/л): NaCl – 27.2; MgCl₂ – 3.8; MgSO₄ – 1.7; CaSO₄ – 1.2.

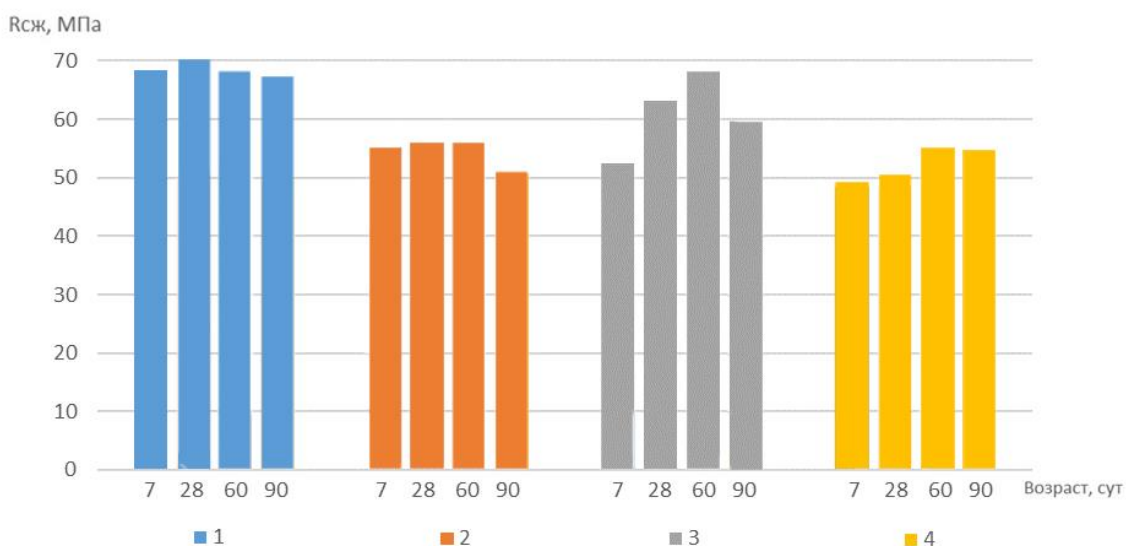
Катион магния в водах мирового океана находится на втором месте по содержанию. Его средняя концентрация в морской воде (1,5 г/л) выше чем в речной почти в 100 раз. В результате первоначальной реакции солей магния и Ca(OH)₂ образуется Mg(OH)₂, хуже растворяется в воде (15:



По итогу данной реакции получается растворимый хлорид кальция (CaCl₂), который вымывается из цементного камня.

После твердения в течении 28 суток в нормальных условиях твердения образцы помещались в емкость с агрессивной хлоридной средой, а также в емкость с водой. Раствор хлорида магния представляет собой хлоридную коррозию.

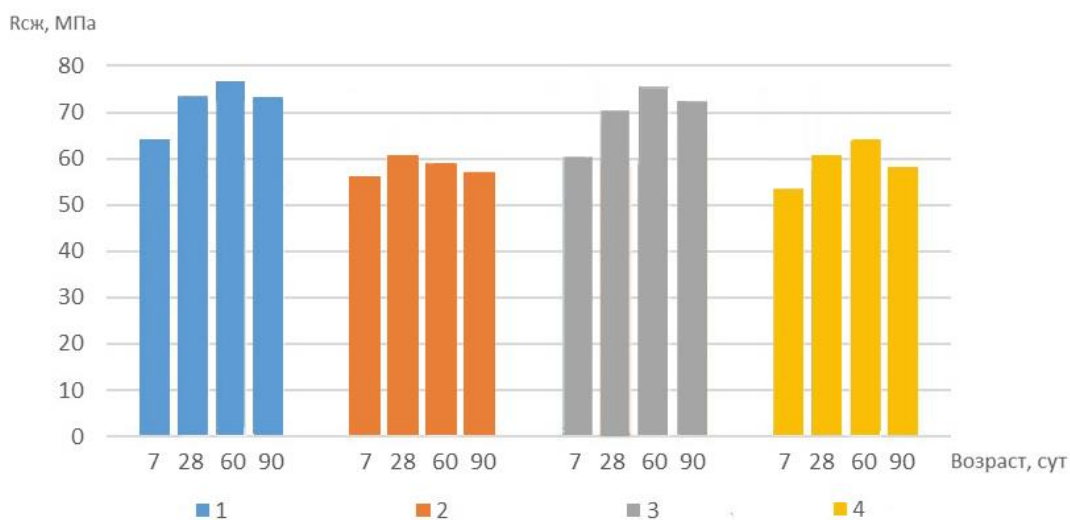
Результаты исследований на прочность при сжатии R_{сж}, МПа, бетона, подверженного влиянию агрессивной среды MgCl₂, представлены на рисунке 25.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 25 - Предел прочности при сжатии бетона, подверженного влиянию агрессивной среды $MgCl_2$

Результаты исследований на прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа, бетона, находящегося в воде, представлены на рисунке 26.

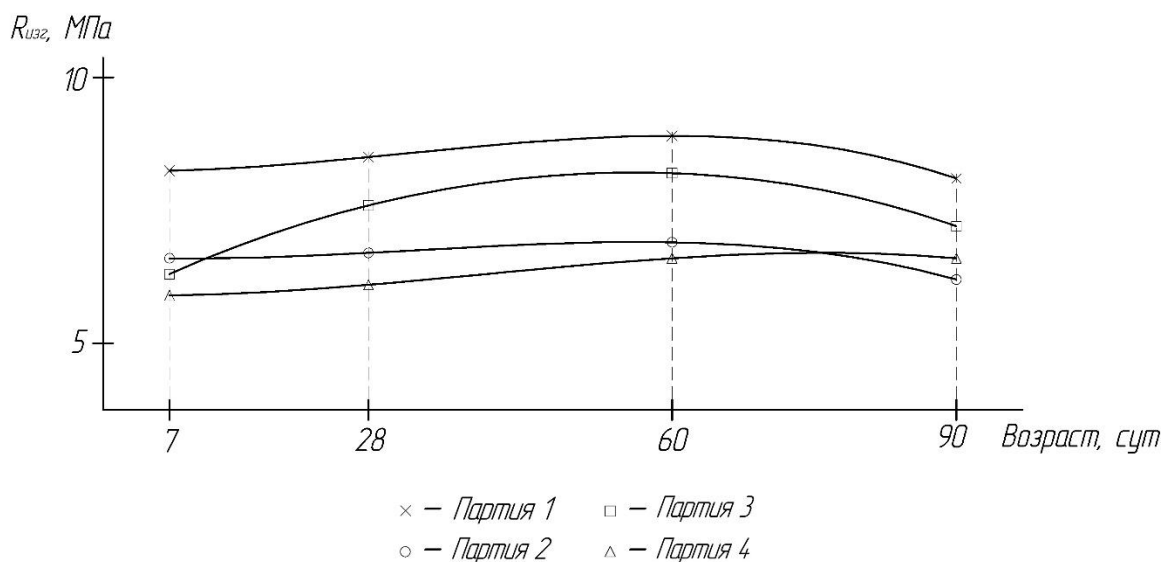


1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 26 - Предел прочности при сжатии бетона, находящегося в воде

Прочность бетонных образцов, выдерживаемых в воде, в среднем на 10% выше прочности образцов, находящихся в агрессивной среде $MgCl_2$.

Результаты исследований на прочность при изгибе бетона, подверженного влиянию агрессивной среды $MgCl_2$, представлены на рисунке 27.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 27 - Предел прочности при изгибе бетона, подверженного влиянию агрессивной среды $MgCl_2$

В таблице 15 приведены расчеты коэффициентов стойкости бетонных образцов, подверженных воздействию агрессивной хлоридной среды в возрасте 7, 28, 60 и 90 суток.

Таблица 15 – Коэффициент стойкости образцов, выдерживаемых в $MgCl_2$

№ партии	Возраст, сут			
	7	28	60	90
Прочность при сжатии в $MgCl_2$, МПа				
1	68.4	70.4	68.4	67.4

Продолжение таблицы 15

№ партии	Возраст, сут			
	7	28	60	90
2	55.1	56.1	56	51.3
3	52.5	63.2	68.1	59.8
4	49.4	50.6	55.1	54.8
Прочность при сжатии в H ₂ O, МПа				
1	64.10	73.5	76.7	73.2
2	56.1	60.4	59	57.4
3	60.4	70.8	75.5	72.4
4	53.7	60.8	64.3	58.1
Коэффициент стойкости, K _c				
1	1.07	0.96	0.89	0.92
2	0.98	0.93	0.95	0.89
3	0.87	0.89	0.90	0.83
4	0.92	0.83	0.86	0.94

На рисунке 28 представлен график изменения коэффициента стойкости бетонных образцов, выдерживаемых в растворе MgCl₂ на протяжении 7, 28, 60 и 90 суток.

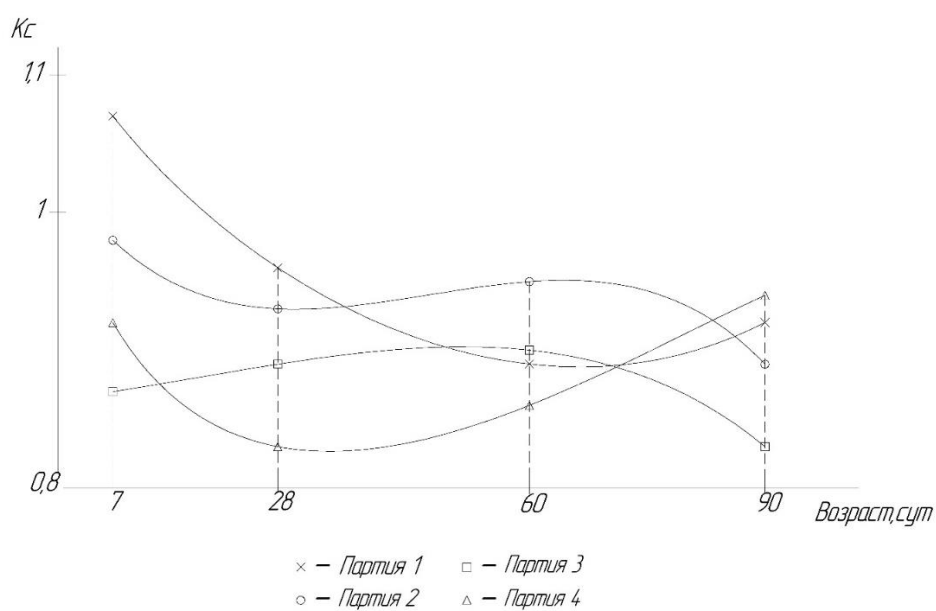


Рисунок 28 – График изменения коэффициента стойкости бетонных образцов, выдерживаемых в растворе MgCl₂

По данным таблицы 15 и рисунка 27, можно сделать вывод, что коэффициент стойкости образцов первой партии снижается на 14%, второй партии - на 9,2%, третьей партии - на 4,6%, а четвертой партии увеличивается на 2%.

На протяжении всего времени выдерживания образцов в 3-х процентном растворе $MgCl_2$ из тела бетона вымывался гидроксид кальция, о чем свидетельствует наличие нерастворимого осадка - белой корочки на поверхности раствора (рисунок 29).

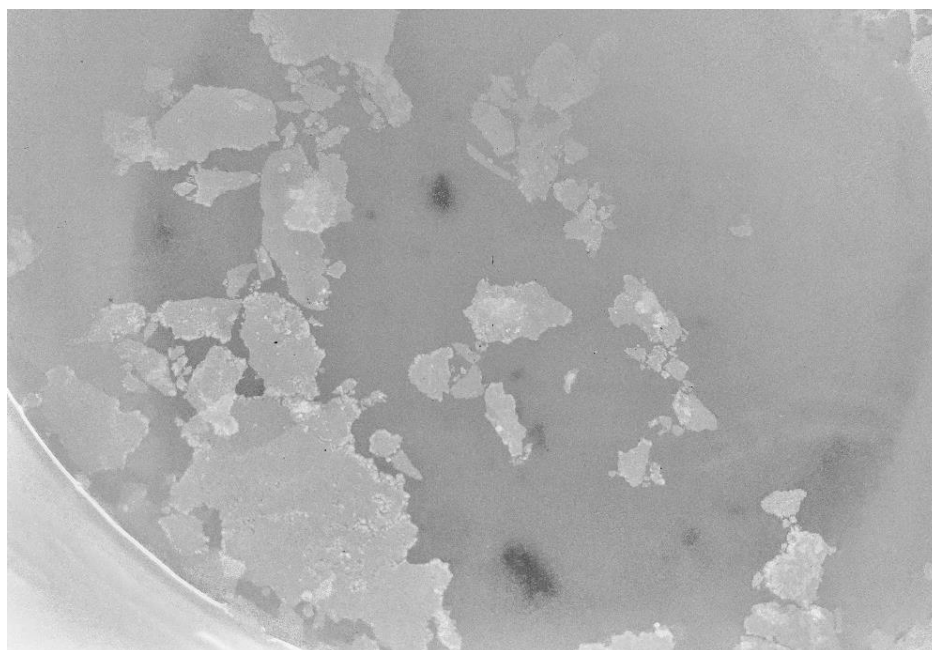


Рисунок 29 – Осадок на поверхности раствора $MgCl_2$

На рисунке 30 представлен образец, выдерживаемый 90 суток в агрессивной хлоридной среде.



Рисунок 30 – Образец, подверженный агрессивному воздействию $MgCl_2$ в течении 90 суток

На поверхности образца можно увидеть характерные для хлоридной коррозии белый налет и белая корочка (результат химической реакции солей магния и гидроксида кальция).

3.2.2 Сульфатная коррозия

Особенностью сульфатной коррозии считается преобразование в твердую фазу продуктов химической реакции в процессе кристаллизации. В процессе взаимодействия солей магния, растворенных в воде, изменяются физико-механические параметры бетона. Сульфаты, которые вызывают коррозию бетона, наблюдаются в больших количествах в природных водах. «Содержание солей в воде мирового океана составляет (в г/л): $NaCl$ - 27.2; $MgCl_2$ - 3.8; $MgSO_4$ - 1.7; $CaSO_4$ - 1.2» [1].

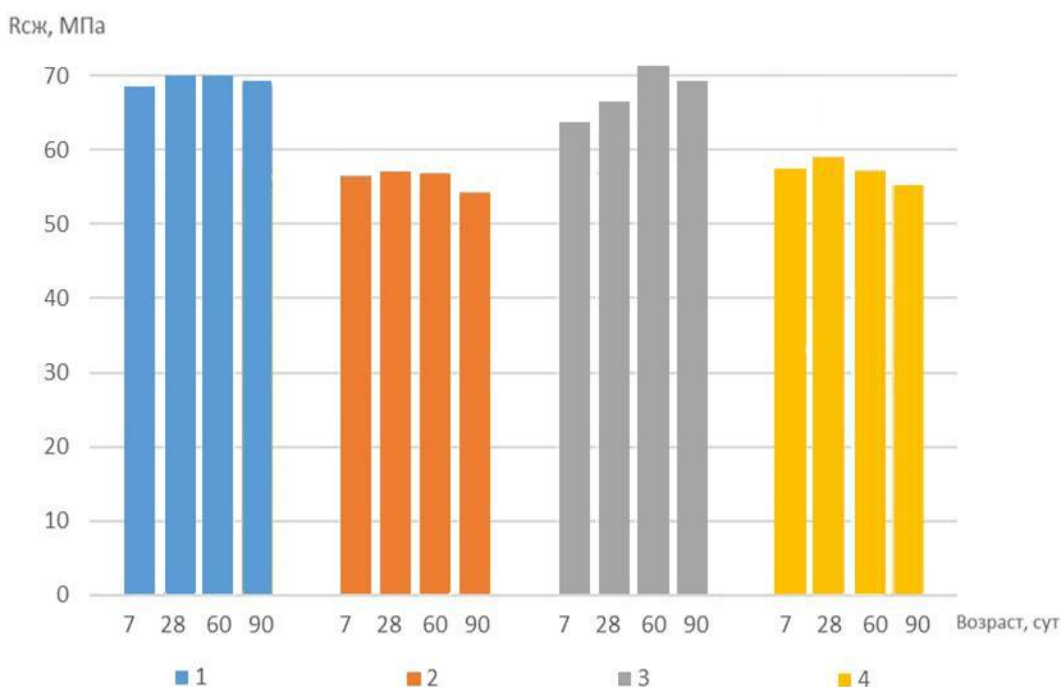
В результате первоначальной реакции (16) солей магния и $Ca(OH)_2$ образуется гидроксид магния:



По итогу данной реакции получается растворимый двуводный сульфат кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), который вымывается из цементного камня. Химическая реакция идет до полного исчерпания гидроксида магния, в виде не растворяющегося в воде бесвязного осадка.

Все образцы размерами $70 \times 70 \times 70$ мм выдерживались в нормальных условиях в течении 28 суток, а затем часть образцов каждой серии помещались в 3-х % раствор MgSO_4 и выдерживались в течении трех месяцев.

Результаты исследований на прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа, бетона, подверженного влиянию агрессивной среды MgSO_4 , представлены на рисунке 31.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 31 – Предел прочности при сжатии бетона, подверженного влиянию агрессивной среды MgSO_4

Результаты исследований на прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа, бетона, находящегося в водном растворе, представлены на рисунке 32.

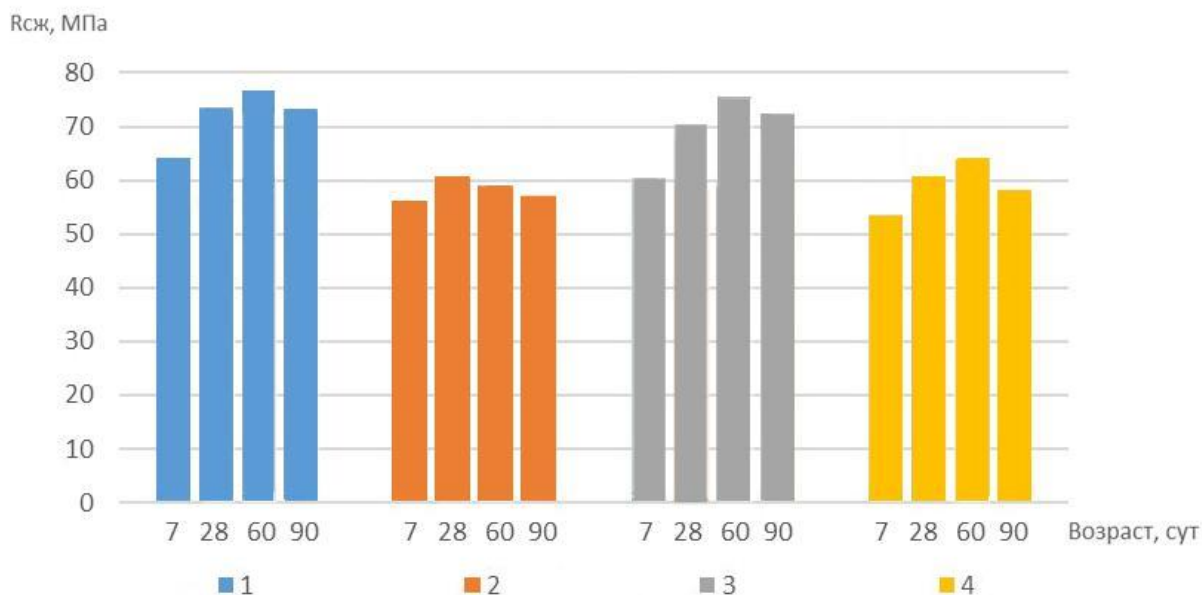


Рисунок 32 – Предел прочности при сжатии бетона, находящегося в воде

Прочность бетонных образцов, выдерживаемых в воде, в среднем на 5% выше прочности образцов, находящихся в агрессивной среде $MgSO_4$.

В таблице 16 приведены расчеты коэффициентов стойкости бетонных образцов, подверженных воздействию агрессивной хлоридной среды в возрасте 7, 28, 60 и 90 суток.

Таблица 16 – Коэффициент стойкости образцов, выдерживаемых в $MgSO_4$

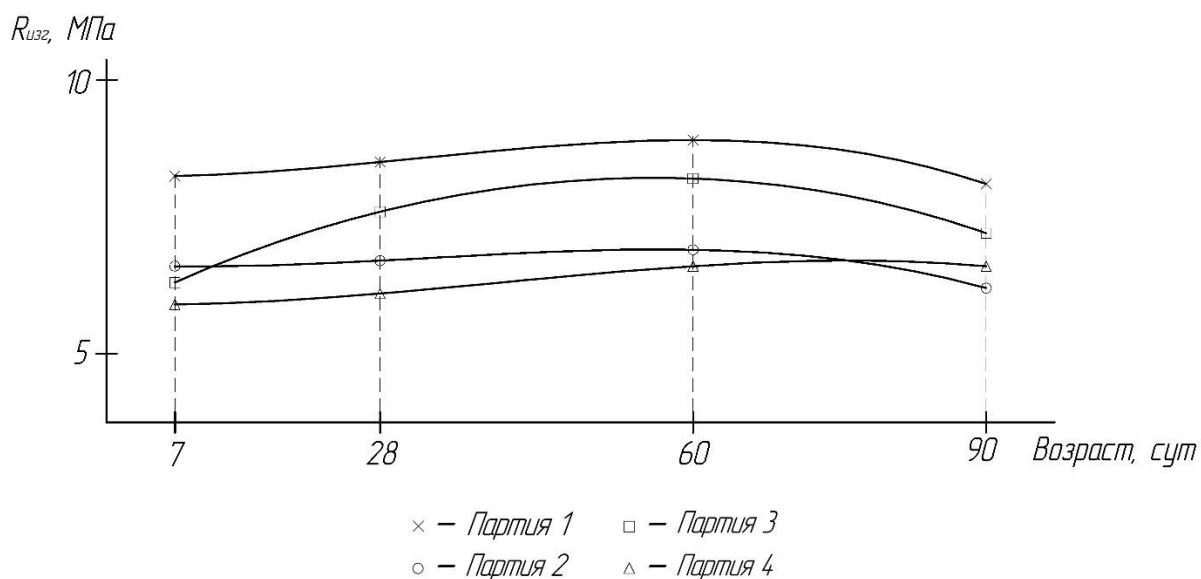
№ партии	Возраст, сут			
	7	28	60	90
Прочность при сжатии в $MgCl_2$, МПа				
1	68.60	74.70	73.10	69.20
2	56.50	57.10	56.90	54.40
3	62.90	70.60	72.80	69.10
4	57.40	59.20	60.20	58.10
Прочность при сжатии в H_2O , МПа				
1	64.10	73.5	76.7	73.2
2	56.1	60.4	59	57.4
3	60.4	70.8	75.5	72.4
4	53.7	60.8	64.3	58.1

Продолжение таблицы 16

№ партии	Возраст, сут			
	7	28	60	90
Коэффициент стойкости, K_c				
1	1.07	1.02	0.95	0.95
2	1.01	0.95	0.96	0.95
3	1.04	1.00	0.96	0.95
4	1.07	0.97	0.94	1.00

Результаты исследований на прочность при изгибе бетона, подверженного влиянию агрессивной среды $MgSO_4$, представлены на рисунке 33.

На рисунке 34 представлен график изменения коэффициента стойкости бетонных образцов, выдерживаемых в растворе $MgSO_4$ на протяжении 7, 28, 60 и 90 суток.



1 партия - СП-4+ВМК, 2 партия - СП-4, 3 партия - СП-4 +ВМК+ Goodhim 1%, 4 партия - СП-4+ Goodhim 1%.

Рисунок 33 - Предел прочности при изгибе бетона, подверженного влиянию агрессивной среды $MgSO_4$

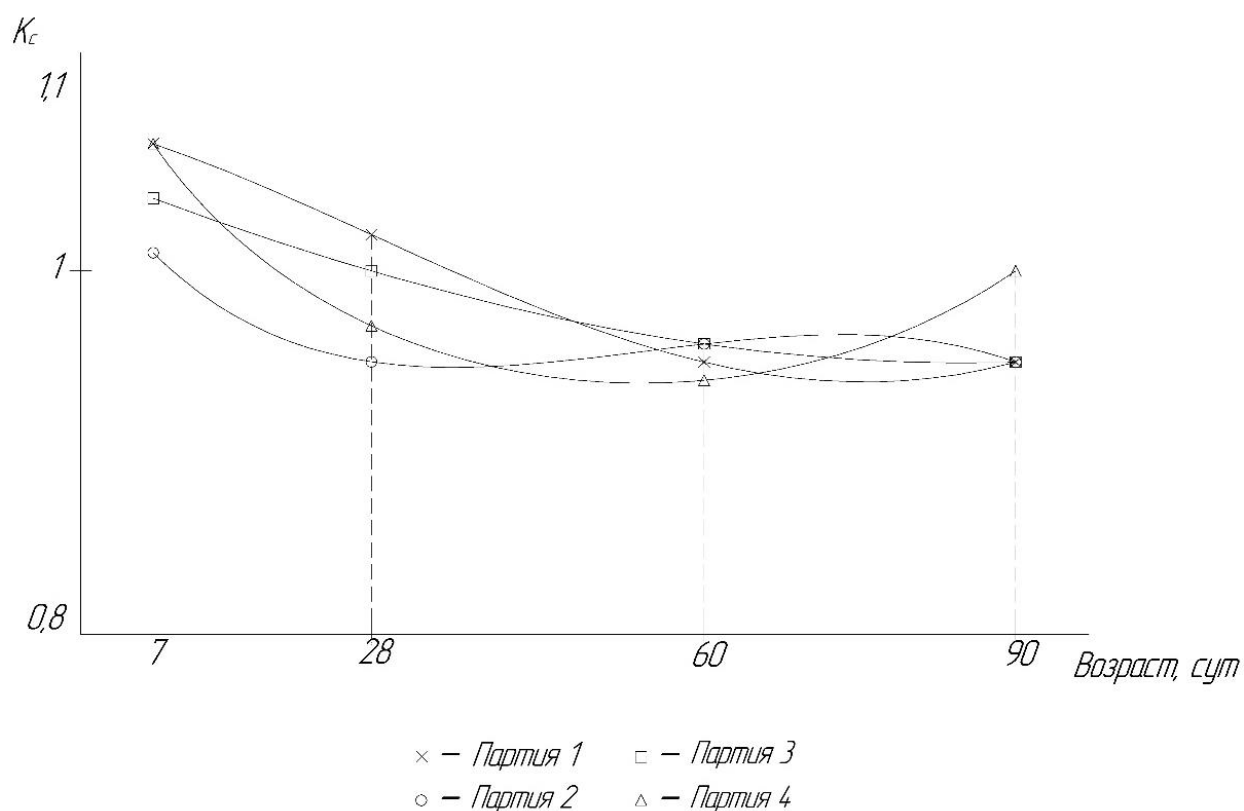


Рисунок 34 – График изменения коэффициента стойкости бетонных образцов, выдерживаемых в растворе $MgSO_4$

По данным таблицы 16 и рисунка 31, можно сделать вывод, что коэффициент стойкости образцов первой партии снижается на 11,2 %, второй партии - на 6 %, третьей партии - на 8,7 %, четвертой партии - на 6,5%.

На протяжении всего времени выдерживания образцов в 3-х процентном растворе $MgSO_4$ из тела бетона вымывался гидроксид кальция, о чем свидетельствует наличие белых частиц (осадка) на поверхности раствора (рисунок 35).

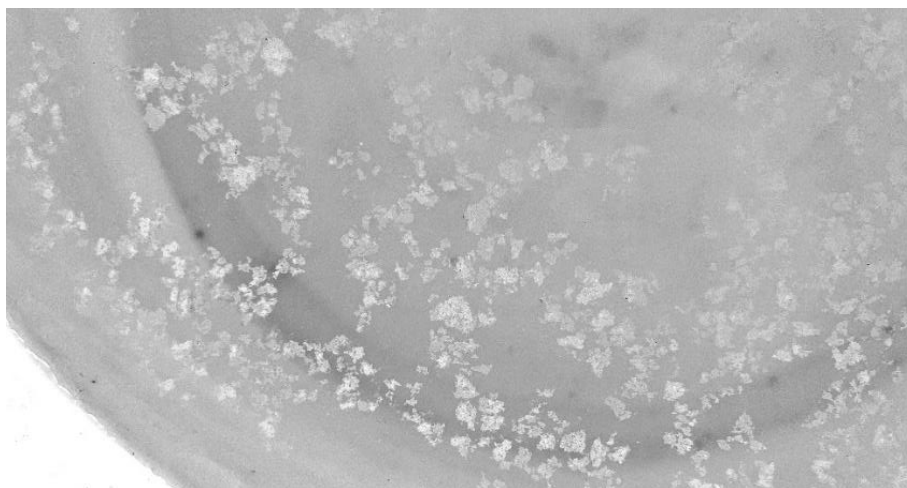


Рисунок 35 – Осадок на поверхности раствора $MgSO_4$

На рисунке 36 представлен образец, выдерживаемый 90 суток в агрессивной хлоридной среде.



Рисунок 36 – Образец, выдерживаемый в растворе $MgSO_4$ в течении 90 суток

На поверхности образца можно увидеть характерные для сульфатной коррозии белый налет, как результат химической реакции солей магния и гидроксида кальция.

Выводы по третьей главе.

По результатам раздела 3 были экспериментально определены: оптимальное количество ВМК, добавляемого в бетонную смесь; состав бетона высокой прочности и его физико-механические характеристики.

Выполнено сравнение прочностных характеристик бетонов, изготовленных с применением ВМК 8% от массы цемента, суперпластификатора СП-4 и гидрофобизатора Goodhim Interplast AT S GIDRO. Бетон с применением всех вышеперечисленных добавок имеет более высокие значения прочности в сравнении с другими исследуемыми партиями (в среднем на 3 – 7%). Экспериментально установлено, что прочность при сжатии бетона 3 партии (с применением ВМК 8% от массы цемента, суперпластификатора СП-4 и гидрофобизатора Goodhim) в возрасте 28 суток на 10% выше по сравнению с прочностью бетона 2 партии (с применением суперпластификатора СП-4).

Заключение

Из результатов проведенных экспериментальных исследований следуют следующие выводы:

- Выполнено комплексное исследование основных физико-механических свойств (пределной прочности при сжатии и изгибе, пористости, водопоглощения) бетонов, подверженных влиянию агрессивных сред.
- Выполнено сравнение физико-механических характеристик бетонов, изготовленных с применением ВМК 5 %, 8 % и 10 % от массы цемента. Бетон с применением 8% ВМК от массы цемента имеет более высокие значения прочности в сравнении с другими исследуемыми партиями. Экспериментально установлено, что прочность при сжатии бетона партии с применением ВМК 8% от массы цемента в возрасте 28 суток выше на 12% и 8% по сравнению с прочностью бетона партии с применением ВМК 5% и 10% от массы цемента, соответственно.
- Выполнено сравнение прочностных характеристик бетонов, изготовленных с применением ВМК 8% от массы цемента, суперпластификатора СП-4 и гидрофобизатора Goodhim Interplast AT S GIDRO. Бетон с применением всех вышеперечисленных добавок имеет более высокие значения прочности в сравнении с другими исследуемыми партиями (в среднем на 3 – 7%). Экспериментально установлено, что прочность при сжатии бетона 3 партии (с применением ВМК 8% от массы цемента, суперпластификатора СП-4 и гидрофобизатора Goodhim) в возрасте 28 суток на 10% выше по сравнению с прочностью бетона 2 партии (с применением суперпластификатора СП-4).
- Выполнено сравнение показателей водопоглощения и пористости бетонов. Бетон второй партии (без применения ВМК 8% от массы

цемента и гидрофобизатора Goodhim Interplast AT S GIDRO) имеет более высокие значения водопоглощения по массе и объему в сравнении с другими исследуемыми партиями (в среднем на 9 % и 10% соответственно).

- Разработан оптимальный состав бетонов с применением высокоактивного метаксаолина 8% от массы цемента, суперпластификатора СП-4 и гидрофобизатора Goodhim Interplast AT S GIDRO, что позволяет улучшить физико-механические показатели в среднем на 10-15% при одновременном улучшении коррозионной стойкости.
- Экспериментально установлено, что данные бетоны могут быть изготовлены из доступных в регионе материалов: цемента, природного песка, суперпластификатора СП-4 и гидрофобизатора Goodhim Interplast AT S Gidro. Коррозионные свойства полученного бетона улучшены введением в него ВМК и гидрофобизатора.

Список используемой литературы

1. Алексеев С.И., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. М.: Стройиздат, 1975, 205 с.
2. Баженов, Ю.М. Новому веку – новые эффективные материалы и технологии / Ю.М. Баженов // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в. – 2001. – №1. – С. 12 – 13.
3. Баженов, Ю.М., Фаликман, В.Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Материалы I Всероссийской конференции. – М., 2001. – 91 – 101 с.
4. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны / В.Г. Батраков // Теория и практика. 2–е изд., перераб. и доп. – М., 1998. – 768 с. 20. Богданова, Е.Р. Экспериментальные исследования бетона, дисперсноармированного синтетической полипропиленовой фиброй / Е.Р. Богданова // Известия Петербургского университета путей сообщения 2015 – №2 (43). – С. 91 – 98. 74
5. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М. : Стандартинформ, 2018. – 32с.
6. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2015. – 28с.
7. ГОСТ 12730.0-78. Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. М. : Стандартинформ, 2007. – 3с.
8. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. М. : Стандартинформ, 2018. – 16с.
9. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. М. : Стандартинформ, 2013. – 11с.
10. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2017. – 14с. 73

11. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава. М. : Стандартиформ, 2006. – 7с.
12. ГОСТ 31384-2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. [Электронный ресурс]. – Введ. 2018–03–01. 69 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200157129> (дата обращения 04.10.2020).
13. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. М. : Стандартиформ, 2018. – 19с.
14. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. М. : Стандартиформ, 2018. – 14с.
15. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ Методы физико – механических испытаний. М. : Стандартиформ, 2018. – 55с.
16. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. М. : Стандартиформ, 2006. – 26с.
17. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. М. : Стандартиформ, 2015. – 11с.
18. Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.Н. Шишканова. - Тольятти. : ТГУ, 2013. – 126с. - URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/383> (дата обращения 26.03.2022).
19. Железобетонные и каменные конструкции: учеб. для вузов / В. М. Бондаренко [и др.]. - М. : Высш. шк., 2008. - 887 с.
20. Кинд, В.В. Коррозия цементов и бетона в гидротехнических сооружениях/ В.В. Кинд.– М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955.– 320 с.
21. Кирсанова, А.А., Крамар, Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакаолина для цементных бетонов / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар // Строительные материалы. - №11. - 2013. - с.54-56.

22. Кирсанова, А.А., Крамар, Л.Я., Орлов А.А. Особенности гидратации и твердения цементных бетонов с добавками - модификаторами, содержащими 87 метакаолин / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар, А.А. Орлов // Цемент и его применение. - №2. - 2015. - с.130-135.
23. Коренькова, С.Ф, Анпилов, С.М., Лукоянчева, С.М., Веревкин, О.А. Современные строительные материалы. Самара / С.Ф. Коренькова, С.М. Анпилов, С.М. Лукоянчева, О.А. Веревкин. - М.: Стройиздат, 2001. 129 с.
24. Коротких, Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии) / Д.Н. Коротких // Монография. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. – 141 с.
25. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 2002. – 533 с.
26. Никитина К.В. Совершенствование способов уменьшения водопоглощения цементно-содержащих материалов / К.В. Никитина / Магистерская диссертация. – 2019 г. – 78с.
27. Розенталь Н. К. Защита бетона от внутренней коррозии // Столичное качество строительства, №2, 2008, с. 56–59.
28. Розенталь Н.К. Коррозия и ремонт железобетонных конструкций // СтройПРОФИЛЬ № 2 (72) 2009. URL: <http://stroyprofile.com/archive/3515> (дата обращения 10.11.2020).
29. Розенталь Н.К., Степанова В.Ф., Чехний Г.В. Бетоны высокой коррозионной стойкости и нормирование их характеристик // Строительные материалы, оборудование, март-апрель 2017, с.14-19.
30. Розенталь Н.К., Степанова В.Ф., Чехний Г.В. О максимально допустимом содержании хлоридов в бетоне // Строительные материалы, оборудование, январь-февраль 2017, с.1-4.
31. Рояк Г.С. Внутренняя коррозия бетона// Тр. ЦНИИС. М., 2002.

32. СП 28.13330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. [Электронный ресурс]. Свод правил – Введ. 2017–08–28. 119 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456069587>. (дата обращения 04.10.2020).

33. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М. : Минрегион России. 2013. – 175с.

34. Ущеров-Маршак, А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А.В. Ущеров-Маршак // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8-12.

35. Чернышов Е.М. Морозная деструкция бетонов часть 1. Механизм, критериальные условия управления // Construction materials. 2017. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/moroznaya-destruktsiya-betonov-chast-1-mehanizm-kriterialnye-usloviya-upravleniya> (дата обращения: 06.11.2020).

36. Ahuja H.N. et al. Project Management: Techniques in Planning and Controlling Construction Project. 2-nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2017. – pp 140 – 145.

37. Geddes D., Provis J.L., Bernal S.A. Effect of calcination method and clay purity on the performance of metakaolin-based geopolymers / D. Geddes, J.L. Provis, S.A. Bernal // International conference on alkali activated materials and geopolymers: 90 versatile materials offering high performance and low emissions. – Issue 5. - 2018. – pp 53 – 57.

38. Geddes D., Provis J.L., Bernal S.A. Effect of calcination method and clay purity on the performance of metakaolin-based geopolymers / D. Geddes, J.L. Provis, S.A. Bernal // International conference on alkali activated materials and geopolymers: versatile materials offering high performance and low emissions. – Issue 5. - 2018. - Pp 53 – 57.

39. Koval S.B. Analysis of various media concrete penetrating ability depending on different factors affecting water absorption [text] / S.B. Koval, M.N. Kagan // International conference on industrial engineering. – 2017. – P. 132-138.

40. Mideiros-Junior Ronaldo A. Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport /

A. MideirosJunior Ronaldo, G. Lima Maryagela, H.F Mideiros Marcelo // Environment Dev. Sustainability. 2015. Vol. 17, №5, pp. 1103-1119.

41. Peiliang S., Linnu L., Wei C., Shuguang H. Efficiency of metakaolin in steam cured high strength concrete / S. Peiliang, L. Linnu, C. Wei, H. Shuguang // Construction and building materials. - 2017. - Pp 357 - 366.

42. Rodrigues A. A new accelerated mortar bar test to assess the potential deleterious effect of sulfide-bearing aggregate in concrete / A. Rodrigues, J. Duchesne, B. Fournnier // Cement and Concrete Research. – 2015. Vol. 73, p. 96-110.

43. Uzawa, T. et al., «Evaluation of Structural Performance of Ultra High Performance Concrete» Proceedings of the First FIB Congress, Osaka, 2002, pp. 77 – 82.