

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство»

(наименование кафедры)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Оценка влияния водного раствора хлорида кальция
на прочность бетона

Студент

С.Н. Новиков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

Д.С. Тошин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

д.т.н., доцент, В.А. Ерышев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ___ » _____ 2019 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент, Д.С. Тошин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ___ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Теоретические данные о коррозии и восстановлении железобетонных элементов конструкций здания	8
1.1 Целесообразность изучаемого вопроса	8
1.2 Реакция гидратации цемента	9
1.3 Коррозия бетона и железобетона	13
1.3.1 Карбонизация	17
1.3.2 Коррозия выщелачивания	19
1.3.3 Взаимодействие цементного камня с кислотами и кислыми солями	20
1.3.4 Коррозия кристаллизации	22
1.3.4.1 Сульфатная коррозия	22
1.3.4.2 Кристаллизация солей в порах бетона	23
1.3.4.3 Щелочная коррозия	24
1.4 Другие виды коррозии бетона и железобетона	25
1.4.1 Биологическая коррозия	25
1.4.2 Масляная коррозия	26
1.4.3 Термическая коррозия	26
1.5 Химическая коррозия бетона под воздействием водного раствора хлорида кальция	26
1.6 Защита железобетонных конструкций от коррозии	30
1.7 Выводы по разделу 1	32
2 Обследование железобетонных конструкций после воздействия водного раствора хлорида кальция	33
2.1 Описание объекта обследования	33
2.2 Обследование объекта	35
2.3 Сложности, возникшие при обследовании объекта	42

2.4 Выводы по разделу 2	43
3 Экспериментальная оценка воздействия водного раствора хлорида кальция на бетон.....	45
3.1 Первый этап экспериментальной работы	45
3.1.1 Программа испытаний.....	45
3.1.2 Изготовление образцов-кубов	50
3.1.3 Испытания образцов-кубов.....	52
3.1.4 Повреждения образцов-кубов.....	56
3.1.5 Обработка результатов испытаний образцов-кубов	57
3.2 Второй этап экспериментальной работы.....	58
3.2.1 Программа испытаний.....	58
3.2.2 Изготовление образцов-призм.....	61
3.2.3 Испытания образцов-призм	62
3.2.4 Обработка результатов испытаний образцов-призм.....	72
3.3 Выводы по разделу 3	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	77
ПРИЛОЖЕНИЕ А	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ В	99

ВВЕДЕНИЕ

Хлорид кальция представляет собой вещество белого цвета, нашел свое применение в различных сферах, таких как лабораторная практика (сырье для получения кальция, наполнитель для эксикаторов), пищевая промышленность (консервант, смягчитель баранины), медицине, дорожном хозяйстве (компонент противогололедных добавок) и инженерных коммуникациях зданий (теплоноситель в системах охлаждения).

Водный раствор хлорида кальция нашел свое применение в качестве теплоносителя в системах хладоснабжения по следующим причинам: низкая температура замерзания, высокий температурный диапазон использования, сравнительно высокая теплопроводность, малая вязкость при низких температурах, экологическая чистота при возможных утечках, взрыво- и пожаробезопасность.

Теплоноситель может использоваться в системах холодоснабжения ледовых катков, в холодильных установках, в специальных системах охлаждения продукции пищевых и иных производств.

Актуальность работы: При эксплуатации указанных инженерных систем возможно возникновение утечек теплоносителя, что является фактором, оказывающим влияние на прочность и надежность несущих конструкций зданий и сооружений. Утечки при открытой прокладке трубопроводов не вызывают сложности в локализации и устранении, однако при скрытой прокладке трубопроводов возникает сложность в локализации участка трубопровода и ее ликвидации, что может привести к длительному замачиванию несущих конструкций.

Несущие железобетонные конструкции подверженные замачиванию теплоносителем требуют технического обследования для принятия решения о возможности дальнейшей эксплуатации без проведения ремонтно-восстановительных мероприятий или с необходимостью их выполнения.

Техническое обследование определенных железобетонных конструкций может быть осложнено их геометрией (малое сечение элемента), доступностью к инструментальному контролю (скрытие другими элементами, например: верхняя полка ригеля, как правило, скрыта плитами перекрытия).

Решение поставленной цели и задач исследования позволит решать задачи технической эксплуатации зданий и сооружений при повреждении конструкций в части быстрого и точного определения категории технического состояния конструкций, методов их защиты, возможности и способа усиления (восстановления).

Цель исследования: Экспериментальное обоснование зависимости изменения прочностных и деформативных характеристик бетона от периода воздействия водного раствора хлорида кальция, определяемого по визуальным признакам.

Объект исследования: Тяжелый бетон класса по прочности на сжатие В25 на крупном заполнителе из щебня карбонатных пород марки М600.

Предмет исследования: Прочностные и деформативные характеристики бетона после агрессивного воздействия водного раствора хлорида кальция (CaCl_2).

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1. Проведение визуального и инструментального обследования несущих конструкций перекрытия на отм. +4.200 в осях «Г-Ф/25-29» производственного здания предприятия, обмерные работы;
2. Определение изменения прочностных и деформативных характеристик бетона при циклическом воздействии водного раствора хлорида кальция (CaCl_2) опытным путем;

3. Определение визуальных признаков повреждения конструкции, соответствующих циклам испытаний;
4. Сопоставление изменений прочностных и деформативных характеристик бетона с визуальными признаками повреждения конструкций.

Методы исследования: Методы теоретического анализа и обобщения нормативной, учебной и научной литературы, синтеза имеющихся знаний в областях исследования.

Лабораторные опыты и экспериментальный методы при испытаниях образцов, согласно разработанным методикам автора и ГОСТ.

Научная новизна: Изучение процессов коррозии цементного камня при воздействии хлорида кальция (CaCl_2) в условиях положительных температур с получением процентных значений изменения прочностных и деформативных характеристик бетона в сопоставлении с визуальными признаками разрушения конструкций.

Практическая значимость

1. Возможность определения степени поражения конструкции коррозией в сравнении с количеством опытных циклов воздействия водного раствора хлорида кальция и их соотношением с визуальными признаками разрушения бетона;
2. Получение процентных значений изменения механических характеристик бетона по визуальным признакам повреждений конструкций, при невозможности определения прочности бетона неразрушающими методами;
3. Оценка возможности усиления конструкций после воздействия водного раствора хлорида кальция.

Апробация результатов исследования. По результатам научно-исследовательской работы опубликовано две статьи, индексируемых в РИНЦ:

- Тошин, Д.С., Новиков, С.Н., Шигаранова, Е.В. Разработка расчетной модели поврежденного железобетонного элемента / Д.С. Тошин, С.Н. Новиков, Е.В. Шигаранова // Актуальные проблемы науки XXI века: сборник статей международной исследовательской организации Cognitio по материалам XXX международной научно-практической конференции: – М., 2018. – С. 50-54.
- Тошин, Д.С., Новиков, С.Н. Оценка воздействия водного раствора хлорида кальция на прочность бетона / Д.С. Тошин, С.Н. Новиков // НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ: СОХРАНЯЯ ПРОШЛОЕ, СОЗДАЁМ БУДУЩЕЕ: сборник статей XXII Международной научно-практической конференции. В 2ч. Ч.1. – Пенза., 2019. – С. 26-30.

Промежуточные итоги исследования докладывались на конкурсе студенческих проектов на финансирование 2018 года.

Структура и объем магистерской диссертации. Магистерская диссертация включает в себя введение, три главы, заключение, список используемых литературных источников, а также трех приложений. Работа состоит из 81 страницы машинописного текста, 13 рисунков и 23 таблиц.

1 Теоретические данные о коррозии и восстановлении железобетонных элементов конструкций здания

1.1 Целесообразность изучаемого вопроса

При проведении обследований зданий и сооружений инженеры, как правило, пользуются нормативной [3, 16] и технической литературой [23-28]. В источниках приводятся сведения о методах проведения технических обследований строительных конструкций, визуальных и инструментальных методах контроля технического состояния, классификация дефектов и повреждений конструкций, их причины и возможные последствия для дальнейшей эксплуатации, методы усиления и защиты конструкций от агрессивных воздействий.

В практике обследования зданий и сооружений автор столкнулся с проблемой оценки технического состояния сборных железобетонных элементов перекрытия производственного здания после замачивания водным раствором хлорида кальция. Задачи обследования, стоящие перед автором, сводились к следующему: достоверно оценить техническое состояние конструкций, подобрать метод (способ) усиления сборных железобетонных элементов.

Применение инструментальных методов оценки прочности бетона было затруднено. Поиск информации по различным нормативным и техническим источникам показал отсутствие данных сопоставления визуальных признаков разрушения при характерном агрессивном воздействии с прочностными характеристиками бетона. Основные данные по коррозии бетонных и железобетонных элементов под воздействием хлоридов сводятся к эксплуатации сооружений в прибрежных морских зонах и воздействию противогололедных реагентов в зимний период времени: приводится механизм коррозии, протекающие химические реакции для бетона и арматуры и характерные разрушения конструкций. Преимущественно рас-

сматривается механизм коррозии железобетонных конструкций через нарушение свойств защитного слоя бетона, разрушение пассивирующей пленки на поверхности арматурных стержней с последующей коррозией арматуры, ведущей к уменьшению площади сечения армирования с последующим снижением несущей способности сечения. Данных об изменении прочностных и механических характеристик бетона выявлено не было.

Сложность возникшей ситуации для дальнейшей технической эксплуатации здания побудила автора провести соответствующие исследования для оценки влияния водного раствора хлорида кальция на прочность бетона и его механические характеристики в сопоставлении с характерными повреждениями.

1.2 Реакция гидратации цемента

Основным структурным элементов бетона является цементный камень, который обеспечивает взаимодействие всех элементов бетона в единой матрице, он же является элементом наиболее предрасположенным к коррозии.

Твердение бетона с набором прочности обеспечивается реакцией гидратации цемента. Гидратация цемента – химическая реакция цементного вяжущего с водой при которой образуются кристаллогидраты. В процессе гидратации жидкое или пластичное цементное тесто превращается в цементный камень. Первая стадия этого процесса называется загустеванием, или схватыванием, вторая - упрочнением, или твердением.

Безводные минералы клинкера при реакции с водой превращаются в гидросиликаты, гидроалюминаты и гидроферраты кальция. Реакции являются экзотермическими, т.е. протекают с выделением теплоты. На скорость реакции влияют:

- степень помола цемента и его минеральный состав;
- количество воды (водоцементное отношение);

- температура;
- добавки.

Степень гидратации зависит от водоцементного соотношения, и достигает своего максимального значения только через 1..5 лет. Степень гидратации определяется различными способами:

- по количеству гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- по тепловыделению;
- по удельному весу цементного теста;
- по количеству химически связанной воды;
- по количеству негидратированного цемента,

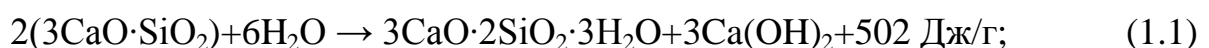
или косвенно по показателям прочности цементного камня.

Продукты гидратации цемента различаются по прочности. Основными носителями прочности являются гидросиликаты кальция. В процессе гидратации клинкеров трёхкальциевого силиката C_3S и двукальциевого C_2S помимо гидросиликатов кальция образуется гашёная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$, сохраняющаяся в цементном камне и препятствующая коррозии стали внутри цементного камня.

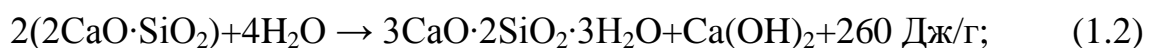
Основные составляющие портландцементного клинкера при растворении в воде диссоциируют: алит $\text{Ca}_3\cdot\text{SiO}_5$ ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) и белит $\text{Ca}_2\cdot\text{SiO}_4$ ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) - на ионы кальция и алюминатные ионы, а четырехкальциевый алюмоферрит $\text{Ca}_3(\text{AlO}_3)_2\cdot\text{Ca}(\text{FeO}_2)_2$ ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) – на кальций-ионы, алюминатные и ферритные ионы.

При затворении цемента водой, протекают следующие процессы [34]:

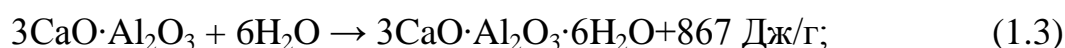
- для трёхкальциевого силиката $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)



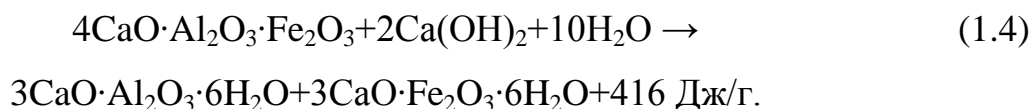
- для двукальциевого силиката $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)



– для трехкальциевого алюмината $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A)



– для четырёхкальциевого алюмоферрита $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)



При смешивании цемента и воды цементные частицы окружаются водой, которая составляет 50-70 объёмных процентов смеси. В результате химической реакции гидратации начинается образование иглообразных кристаллов. Спустя 6 часов образуется достаточное количество кристаллов и между цементными частицами формируются пространственные связи. Происходит загустевание (схватывание) цементной смеси. Процесс схватывания, обеспечивается избирательной гидратацией клинкерных минералов C_3A и C_3S , а также развитием оболочек вокруг цементных зерен и взаимной коагуляцией составных частей цементного теста. Через 8-10 часов объём цементной смеси заполняет скелет иглообразных кристаллов, образованный преимущественно продуктами гидратации алюминатов C_3A , поэтому такая структура называется алюминатной. С этого момента начинается застывание и набор прочности, которые связаны с формированием силикатной структуры, образующейся в процессе гидратации клинкерных минералов C_3S и C_2S . Результатом реакции силикатов и воды становятся очень малые кристаллы, объединяющиеся в гомогенную тонкопористую структуру, которая и определяет итоговую прочность цементного камня. Примерно через сутки силикатная структура начинает вытеснять алюминатную, а спустя 28 суток полностью вытесняет её. На практике формирование рыхлой алюминатной структуры из гидросиликата кальция в процессе схватывания отрицательно влияет на прочностные характеристики цементного камня. Поэтому в цементный клинкер вводится гипс, количество которого ограничивается допустимой концентрацией ангидрида серной кислоты SO_3 в цементе по весу. Гипсовая добавка замедляет образова-

ние гидроалюмината кальция и каркас гидратированного цементного теста формируется за счёт гидросиликата кальция.

Гидратация цемента в период схватывания характеризуется выделением теплоты: в начале схватывания происходит быстрый подъём температуры, а в конце схватывания наблюдается температурный максимум. Скорость схватывания находится в зависимости от температуры окружающей среды. При низких температурах схватывание замедляется. При повышении температуры скорость схватывания увеличивается, однако при значениях температуры выше 30°C может наблюдаться обратный эффект.

Для полной гидратации цементного зерна необходимо количество воды, составляющее 40% от его массы. При этом из указанного количества воды 60% (или 25% от массы цемента) будут химически связаны с цементом, а 40% (или 15% от массы цемента) останутся в порах геля. Средняя величина удельного веса продуктов гидратации в насыщенном водой состоянии составляет 2,16 г/см³. Часть воды (25% от массы цемента), которая вступает в химическую реакцию с цементом, претерпевает объёмную контракцию (сжатие) в процессе реакции, составляющую примерно 25% от ее объема. В итоге образующийся цементный камень частично уменьшается в объёме. Этот процесс называется усадкой, а величина уменьшения объема объемом усадки.

При полной гидратации цементного теста объём пор будет составлять примерно 28-30% от объёма образующейся структуры геля. При этом величина пористости геля в основном не зависит от водоцементного отношения смеси и степени гидратации, а является характерным показателем для марки цемента. Размер гелевых пор составляет примерно 1,5-2 (1-3) нм в диаметре. Часть общего объёма цементного теста, которая не заполнена продуктами гидратации, образует взаимосвязанную систему капиллярных пор, беспорядочно распределённых по всему цементному камню. Капиллярная пористость цементного камня находится в прямой зависимости от

водоцементного отношения смеси и в обратной зависимости от степени гидратации. Чем больше величина водоцементного отношения, тем больше капиллярных пор. В то же время по мере роста степени гидратации цемента будет уменьшаться объём капиллярных пор. Размер капиллярных пор составляет примерно 1,27 мкм.

Структурно продукты гидратации представляет собой гель, а сам процесс гидратации классифицируется как гелеобразование. В процессе гидратации значительно увеличивается площадь поверхности твёрдой фазы цементного геля, что влечёт за собой повышение адсорбции свободной воды. При этом сохраняется расход воды в реакциях гидратации. Следствием этих двух процессов становится самовысушивание - явление уменьшения относительной влажности в цементном тесте. Самовысушивание снижает степень гидратации, поэтому для нормального протекания процессов твердения цементного теста необходимо поддерживать уровень влажности, как одно из условий нормального набора прочности. Процесс самовысушивания также компенсируется избытком воды при затворении цементной смеси (при значениях водоцементного отношения 0,5 и более).

При изготовлении бетона в результате растворения содержащихся в цементе известковых частиц образуется щелочной раствор с показателем рН более 12. В процессе твердения бетона не происходит никаких особых изменений, т.к. содержащаяся в порах цементного камня вода имеет высокий показатель рН. При таком показателе рН на поверхности арматурной стали образуется слой из окиси трехвалентного железа, который защищает арматуру от коррозии. Коррозионная защита сохраняется до тех пор, пока показатель рН окружающего сталь бетона не снизится ниже 8,3.

1.3 Коррозия бетона и железобетона

В течение жизненного цикла здания его конструкции подвергаются различным агрессивным (атмосферные осадки, технологические протечки,

грунтовые воды и т.п.) и механическим (повреждения элементов подвижным оборудованием, аварии и т.п.) воздействиям, в результате чего неизбежно происходят повреждения железобетонных конструкций, приводящие к нарушению свойств защитного слоя бетона с последующей коррозией арматурных стержней.

Защитный слой бетона выполняет три функции:

1. Восприятие нагрузки – восприятие растягивающих напряжений арматурной сталью происходит в результате сцепления арматуры с бетоном. В этом случае нагрузку воспринимает весь бетон, окружающий сталь. При отслоении защитного слоя бетона воспринимает напряжения в зоне армирования в лучшем случае 50% бетона на боковой поверхности стальной арматуры.
2. Коррозионная защита – обеспечение минимального необходимого для защиты от коррозии арматуры слоя бетона, соответствующего условиям окружающей среды. Коррозионная защита стали в бетоне обеспечивается большим количеством гидроксида кальция, образующейся при гидратации цементной массы и растворяющейся в поровых водах цементного камня.
3. Защитные функции при воздействии высоких температур – запас прочности здания при пожаре зависит от воздействия огня на детали строительных элементов. Огнестойкость может быть обеспечена для железобетонных деталей лишь в том случае, если защита арматурной стали от быстрого нагревания обеспечена достаточным слоем бетона.

Способность материалов образовывать новые химические соединения зависит как от их химического состава, так и от плотности. Предрасположенным к образованию новых химических соединений, в первую очередь, является цемент, в то время как существующий уже в течение многих миллионов лет естественный камень значительно меньше расположен к этому. Цементный камень особенно чувствителен к кислотным воздей-

ствиям. Почти все составные части различных цементов являются щелочными, поэтому цементный камень не обладает сопротивляемостью против органических или неорганических кислот.

При воздействии кислот на содержащиеся в цементе известняк и глинозем происходит образование солей, сопровождающееся сильным увеличением начального объема. Это вызывает нарушение структуры бетона и разрыв внутренних связей.

Слишком мягкая вода вымывает из бетона известковые соединения и делает его структуру более рыхлой. Это возможно в том случае, если бетон обладает малой плотностью и вода может фильтроваться через него.

Таким образом, кислоторастворимые заполнители и составные части бетона (известняк, диабаз и т.п.) при воздействии на них кислот разрушаются, а восприимчивые к щелочам составные части (опал, кремний и т. п.) размываются щелочными водами и бетон разрушается изнутри.

Химические реакции, как правило, проходят в водной среде, поэтому бетон, на который воздействуют химически агрессивные воды, подвергается с одной стороны, агрессивным веществам, которые содержатся в воде и проникают в бетон, с другой – вода необходима для протекания химической реакции.

Можно выделить следующие виды коррозии бетона, возникающие при эксплуатации зданий и сооружений [14]:

1. Карбонизация

- Агрессивный фактор: углекислый газ (CO_2);

Коррозионный процесс: нейтрализация гидроксида кальция, потеря бетоном защитных свойств;

2. Выщелачивание

- Агрессивный фактор: растворяющая способность воды;

Коррозионный процесс: растворение гидрата окиси кальция и гидролиз гидросиликатов и других минералов цементного камня;

3. Растворение, усиленное химическими реакциями (взаимодействие цементного камня с кислотами и кислыми солями)

– Агрессивный фактор: содержание ионов водорода;

Коррозионный процесс: Растворение минералов цементного камня, усиленное воздействие кислот;

– Агрессивный фактор: содержание солей;

Коррозионный процесс: растворение минералов цементного камня, сопровождающееся обменными реакциями с солями;

4. Образование в структуре бетона новых веществ с увеличением объема (коррозия кристаллизации);

– Агрессивный фактор: содержание сульфатов;

Коррозионный процесс: образование гидросульфатоалюмината кальция со значительным увеличением объема;

– Агрессивный фактор: содержание сульфатов при одновременном содержании хлоридов;

Коррозионный процесс: образование водного гипса со значительным увеличением объема;

– Агрессивный фактор: высокое содержание солей при наличии испаряющейся поверхности;

Коррозионный процесс: накопление в порах бетона солей, способных переходить в другие кристаллогидратные формы с изменением объема;

– Агрессивный фактор: содержание щелочи;

Коррозионный процесс: нарушение контакта заполнителя с цементным камнем.

Скорость коррозии бетона зависит от следующих факторов:

– от природы и химического состава агрессивной среды;

– агрегатного состояния (твердое, жидкое, газообразное);

- химической концентрации и состава агрессивных веществ;
- температуры и значений влажности окружающей среды;
- скорости притока к поверхности изделий агрессивных веществ и устранения продуктов коррозии;
- особенностей проектного состава бетона (проницаемости, теплопроводности и др.);
- характера изделий и внутренней структуры материала (толщина защитного слоя, форма, наличие трещин, густота армирования и т.д.);
- вида физического или термического воздействия на железобетон (замораживание, нагрев, механические нагрузки и пр.).

1.3.1 Карбонизация

Затвердевший бетон состоит из различных заполнителей, связанных между собой цементным камнем, содержащим химические вещества, которые в определенных случаях могут образовывать новые соединения. Эти соединения с течением времени могут ухудшать первоначальные свойства бетона.

Процесс, из-за которого снижаются защитные свойства бетона (его способность в течение длительного времени предохранять от коррозии уложенную в него арматурную сталь), называется карбонизацией.

Защита от коррозии арматурной стали, расположенной в бетоне, осуществляется благодаря тонкой защитной пленке, которая образуется в результате реакции стали с содержащимися в бетонной массе щелочными растворами (гидроокиси кальция). При схватывании цементной массы и превращении ее в бетон, около 25% цемента переходит в гидроксид кальция (CaOH), которая, растворяясь, оседает в поровых водах. Образование гидроксидов кальция является важнейшей предпосылкой применения железобетона при изготовлении долговечных конструкций, так как только

наличие свободной гидроокиси кальция обеспечивает защиту от коррозии арматуры.

В результате реакции углекислого газа (CO_2), имеющегося в воздухе, с гидроокисью кальция запас последней с течением времени истощается. Этот процесс (карбонизация) распространяется постепенно с внешней поверхности в глубь бетонного слоя. В карбонизированном бетоне коррозионная защита перестает действовать как только фронт карбонизации достигает арматурной стали.

Плотность бетона играет определенную роль, поскольку она влияет на скорость протекания процесса карбонизации, так как реакция между CaOH и CO_2 происходит тем быстрее, чем меньше сопротивление бетона прониканию углекислого газа. Темпы карбонизации зависят не только от диффузионной сопротивляемости бетона прониканию углекислого газа, но и от содержания углекислого газа в воздухе, и от содержания гидроокиси кальция в бетоне. Диффузионная сопротивляемость с удалением от наружной поверхности увеличивается.

Таким образом, карбонизация является естественным процессом, который развивается с момента изготовления бетона. Карбонизация не является дефектом бетона, так как он сам по себе не претерпевает никаких разрушений. Однако бетон теряет способность коррозионной защиты, и при наличии достаточного количества кислорода и воды, находящаяся в карбонизированном слое сталь начинает корродировать.

В нормальных условиях карбонизация протекает очень медленно и продвигается с внешней поверхности в глубину. Трещины в защитном слое бетона ускоряют процесс карбонизации. Углекислый газ (CO_2), в этом случае может проникать в глубь бетона не только с его внешней поверхности, но и через боковые трещины.

Обусловленные трещинами пики фронта карбонизации оказывают более вредное воздействие, если через эти трещины к стали имеют доступ

пары воды, кислород и другие вещества, ускоряющие процесс коррозии. В результате образуются участки с ослабленным поперечным сечением арматуры.

1.3.2 Коррозия выщелачивания

Способность растворения продуктов процесса гидратации цемента в водной среде и вымывание их из структуры цементного камня значительно влияет на прочностные характеристики бетонных сооружений. Наиболее растворимым компонентом структуры цементного раствора, приготовленным на портландцементе, является известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Под выщелачиванием понимают процесс растворения и выноса гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из тела бетона фильтрующейся через его толщину водой.

Протекание процесса растворения (выщелачивания) компонентов можно разделить на два периода:

1. в процессе выщелачивания гидроксида кальция в раствор перемещается свободный $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
2. в результате снижения количества CaO , образующего соединение с цементным камнем, происходит гидролиз (разрушение) остальных гидратов, устойчивое состояние которых возможно только в соединениях гидроксида кальция обусловленной концентрации.

Способность гидроксида кальция растворяться даже в дистиллированной воде, отрицательно влияет на деструктивные процессы способствующие коррозии.

Наиболее благоприятная температура для развития процесса растворения гидроксида кальция 20°C . При дальнейшем повышении температуры растворимость падает.

При продолжительном воздействии воды на цементный камень возможно полное удаление данного компонента из структуры бетона с пол-

ным разложением других гидратных составляющих – глинозема, оксида железа и кремнезема до аморфного рыхлого состояния.

Интенсивность процесса выщелачивания прямо пропорциональна плотности материала и количеству минеральных заполнителей, имеющих в своем составе гидроксид кальция.

Наиболее опасно, когда вода фильтруется через тело бетона под напором. В зависимости от жесткости фильтрующейся воды и интенсивности фильтрации процесс выщелачивания развивается в одном или двух направлениях.

При сильно фильтрующемся бетоне и постоянном притоке воды фильтрация идет с незатухающей скоростью, что резко снижает плотность бетона, а следовательно, и его прочность.

При бетонах нормальной плотности, высокой временной жесткости фильтрующейся воды, медленном ее поступлении к открытой поверхности конструкции и т.п. в бетоне часто происходит постепенное затухание процесса фильтрации ввиду явлений самоуплотнения бетона и отложения в его порах мельчайших взвешенных в воде минеральных частиц (кальматации пор). Этот процесс (направление) не представляет опасности для устойчивости конструкции, но снижает защитные свойства бетона по отношению к арматуре.

Характерные признаки коррозии выщелачивания - образование белых потеков, хлопьев или сталактитов на внутренней, не соприкасающейся с водой поверхности бетона.

1.3.3 Взаимодействие цементного камня с кислотами и кислыми солями

Между кислотами и кислыми солями, содержащимися в агрессивной среде, и цементным камнем протекают химические реакции, в результате которых образуются легкорастворимые соли и аморфные малораствори-

мые продукты. Данные продукты коррозии не обладают вяжущей способностью, нарушается сцепление между компонентами бетона, последний становится рыхлым, теряет свою прочность.

Состояние водных растворов (кислый, нейтральный, щелочной) оценивается через концентрацию ионов водорода с помощью водородного показателя рН.

Оценка степени кислотности или щелочности (значение рН) водных растворов имеет большое значение для распознавания вида, направления и скорости коррозионных процессов, а также при оценке степени агрессивности природных вод, содержащих кислоты и кислые соли.

Особенность воздействия отдельных кислот на обычный бетон состоит в том, что они образуют с гидратом окиси кальция (в свободном виде или в виде силикатов и алюминатов) цементного камня кальциевые соли, различные по растворимости и свойствам. Поэтому стойкость обычного бетона в кислотах зависит от степени растворимости этих солей.

Например, сульфаты и особенно хлористый кальций, образующиеся при воздействии на цементный камень соответственно серной и соляной кислот, рыхлые, нестойкие и легко вымываемые водой продукты, значительно ослабляют бетон и способствуют его быстрому разрушению.

Визуально пораженный кислотами бетон имеет шероховатую и рыхлую структуру вследствие потери вяжущих свойств, чаще всего бурого или грязно-белого цвета. Наружные поверхности конструкций шелушатся и отслаиваются от основной массы бетона кусками или лещадками.

Практически степень и глубину поражения бетона кислотными (и другими) средами определяют с помощью индикаторов - веществ, меняющих свой цвет в зависимости от относительной концентрации ионов H^+ и OH^- . Например, индикатор лакмус окрашивается при избытке H^+ (т.е. в кислой среде) в красный цвет, при избытке OH^- (т.е. в щелочной среде) - в синий и

в нейтральной среде имеет фиолетовую окраску. Из других индикаторов чаще всего используют фенолфталеин и метилоранж.

С помощью специального набора различных индикаторов можно весьма точно определить значение рН среды.

1.3.4 Коррозия кристаллизации

Под коррозией кристаллизации понимают механическое разрушение неметаллических строительных материалов (в частности, бетонных и железобетонных конструкций) от внутренних напряжений, возникающих при увеличении объема твердой фазы материалов, вследствие отложения продуктов коррозии, замерзания вод или кристаллизации солей в порах.

1.3.4.1 Сульфатная коррозия

Особый вид коррозии возникает при действии на бетон природных вод, содержащих сульфаты. В бетоне под действием агрессивных вод, содержащих сульфаты - сернокислые соединения (CaSO_4 , Na_2SO_4 , MgSO_4 и др.), разрушение проявляется в виде разбухания и искривления конструктивных элементов. В этом случае не только не происходит удаления составляющих из объема цементного камня, а наоборот, в результате химических реакций между ним и веществами, поступающими из внешней среды, образуются новые соединения, объем которых превышает объем твердой фазы компонентов цементного камня. Типичный пример такой коррозии - образование «цементной бациллы» - гидросульфоалюмината кальция. Гидросульфоалюминаты кальция занимают объем, в два с половиной раза больший, чем исходный алюминат кальция. В результате появляются внутренние напряжения, которые могут превысить предел прочности бетона при растяжении и тем самым вызвать появление трещин.

Результатом этого вида коррозии иногда бывают образования на поверхности бетона пузырей - явление местного расслаивания. Оно состоит в том, что от бетона начинают отскакивать плоские круглые осколки.

Наиболее интенсивно процесс коррозии идет при наличии сернокислого магния ($MgSO_4$) или другой соли магния.

Особенность воздействия растворов солей магния на цементный камень - их химическое взаимодействие не только с известью, но и с гидроалюминатами и гидросиликатами, составляющими структуру цементного камня, что приводит к увеличению объема и сильному трещинообразованию. Низкая плотность бетона, наличие трещин, пустот, могут привести к быстрому разрушению бетона при этом виде коррозии.

1.3.4.2 Кристаллизация солей в порах бетона

При постоянном воздействии на бетон и железобетон, имеющих открытую испаряющую поверхность, минерализованных растворов в порах бетона накапливаются и кристаллизуются соли. В дальнейшем они переходят из безводной или маловодной формы в кристаллогидраты с высоким содержанием воды и увеличением объема, что создает значительное кристаллизационное давление.

Например, накопление хлористого натрия в порах бетона в дальнейшем приводит к образованию двуводного кристаллогидрата ($NaCl \cdot 2H_2O$), занимающего объем, в 2-3 раза больший, чем безводная соль. Следовательно, в бетоне достаточно содержания 43,5% соли от объема его пор, чтобы появилась возможность развития напряжений.

Вода считается агрессивной по этому виду коррозии, если содержание растворимых солей в ней превышает 10 г/л для бетона нормальной плотности, 20 г/л для бетона повышенной плотности и 50 г/л для бетона особо плотного.

1.3.4.3 Щелочная коррозия

Этот вид коррозии, возникающий в результате взаимодействия заполнителей со щелочными металлами или их солями, исследован сравнительно недавно.

Причиной разрушения являются процессы, происходящие в зоне контакта поверхности заполнителя из некоторых пород и щелочей, содержащихся в цементе, введенных в состав бетона при затворении или при увлажнении бетона в процессе эксплуатации щелочными растворами.

Разрушениям были подвержены бетоны, в которых в качестве заполнителя были применены породы, содержащие аморфный кремнезем и прежде всего опал, а также халцедон, кремний, вулканическое стекло и т.д.

Разрушение характеризуется увеличением объема бетона в результате процессов, возникающих при взаимодействии кремнезема заполнителя и щелочей цемента, дополнительно введенных при затворении или при увлажнении щелочами.

Природа процесса разрушения полностью не выяснена, но можно предположить, что происходит набухание гелевой составляющей цементного камня; возможно и развитие осмотического давления в порах.

Разрушение при щелочной коррозии проявляется в виде сетки трещин и белых налетов в этих трещинах. При более значительном поражении бетона наблюдаются изменения состояния породы на контакте с цементным камнем.

В сравнении с повреждениями при выщелачивании, когда происходит постепенное растворение веществ, получаемых в результате гидролиза цемента, схема негативных воздействий при взаимодействии с щелочами или кислотами иная и проходит в верхних слоях бетона, непосредственно соприкасающихся с агрессивной средой.

Новообразования на поверхности, полученные в результате реакций обмена и не обладающие достаточной плотностью и вяжущими свойствами смываются водой, обнажая тем самым следующий слой бетона и уже в этом слое начинают происходить реакции разрушения.

Этот слой также растворяется и удаляется. По этой схеме, и в такой последовательности протекают последующие этапы коррозии второго вида вплоть до полного разрушения конструкции.

1.4 Другие виды коррозии бетона и железобетона

Дополнительно можно выделить биологическую, масляную и термическую коррозии бетона.

1.4.1 Биологическая коррозия

Биологическая коррозия бетонов – это прямое или косвенное влияние микроорганизмов, бактерий на технические характеристики материалов. К такому виду организмов относятся различные грибковые образования, морские водоросли, лишайники, плесень и др.

Биоповреждения бетонных конструкций заключаются в нарушении плотности бетона под действием различных кислот микробного происхождения.

Микроорганизмы, реагируя в период своей жизнедеятельности с окружающей средой и загрязнениями, на поверхности конструкций выделяют кислоты, аммиак и другие агрессивные вещества. Вступая в реакцию с цементным камнем, они способствуют разрушению структурных связей и нарушению прочности конструкций.

1.4.2 Масляная коррозия

Под действием минеральных масел прочность бетона постепенно снижается на 20-25%, что связано с изоляцией воды бетона от его составляющих и расклинивающим действием тонких масляных пленок.

Изоляция воды от составляющих бетона возможна после окончательной пропитки бетона маслами, в то время как снижение прочности бетона за счет расклинивающего действия масляных пленок проявляется через довольно продолжительное время.

1.4.3 Термическая коррозия

Под действием высоких температур (более 150°C) бетон обезвоживается, в конструкциях происходит усадка и температурные деформации, расшатывается структура бетона, понижается модуль упругости (примерно на 30%), снижается сцепление арматуры с бетоном (примерно на 50%) и конструкции разрушаются.

Предельная температуростойкость железобетона составляет: в сжатых элементах 150°C, в изгибаемых с обычным армированием 100°C, в предварительно напряженных со стержневым армированием 80°C и проволочным 60°C. Длительное воздействие на бетон высоких температур, постоянных и переменных, вызывает в нем различные по физической природе процессы, суммарный эффект которых приводит к постепенному снижению структурной прочности (коррозии) и разрушению бетона.

1.5 Химическая коррозия бетона под воздействием водного раствора хлорида кальция

Подробно рассмотрим процесс коррозии бетона при воздействии водного раствора хлорида кальция. В конкретном случае – хладоноситель в системе охлаждения емкостей с удельным весом 1,28 г/см³ и температурой замерзания -45÷-48°C.

Хлорид кальция (CaCl_2) - кальциевая соль соляной кислоты (Соли - сложные вещества, которые в водных растворах диссоциируют на катионы металлов и анионы кислотных остатков). Белые кристаллы плотностью $2,15 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}} 772^\circ\text{C}$. Обладает высокими гигроскопическими свойствами. Растворимость (г на 100 г H_2O): 74 (20°C) и 159 (100°C). Водные растворы хлорида кальция замерзают при низких температурах (20%-ный при $-18,57^\circ\text{C}$, 30%-ный - при -48°C).

Хлорид кальция получают как побочный продукт в производстве соды (в процессе рекуперации аммиака):



Процесс коррозии при воздействии указанного хладоносителя можно отнести к коррозии от воздействия соляных растворов.

Недостаточная плотность отдельных участков бетонных конструкций приводит к тому, что раствор достигает арматуры. Процесс коррозии при данном агрессивном воздействии распространяется на оба материала [34]:

- В результате реакции хлоридов с цементным камнем образуются хлористо-кальциевые соединения. Из-за повторяющихся во времени химических воздействий может произойти распад вяжущих или разрыв структуры вследствие внутреннего давления, обусловленного образованием соединений большого объема в поровых пространствах бетона.
- При проникновении хлоридов к поверхности стали, разрушается пассивный слой и происходит непосредственное воздействие на сталь. Хлориды могут накапливаться в порах бетонного камня в виде раствора и воздействовать через капилляры. Процесс коррозии определяется концентрацией хлоридов в порах бетона, окружающего сталь.

При изготовлении бетона в результате растворения содержащихся в цементе известковых частиц образуется щелочной раствор со щелочным показателем рН более 12. В процессе твердения бетона не происходит никаких особых изменений, так как содержащаяся в порах цементного камня вода имеет высокий показатель рН.

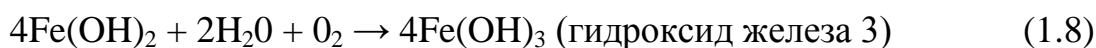
При таком показателе рН на наружной поверхности арматурной стали образуется слой из окиси трехвалентного железа, который защищает наружную поверхность стали от коррозии. Коррозионная защита сохраняется до тех пор, пока щелочной показатель рН окружающего сталь бетона не снизится ниже 8,3.

В большинстве литературных и технических источников агрессивное воздействие хлоридов разделяют на две составляющие: воздействие на бетон и воздействие на арматуру, при этом выделяется разрушение защитного слоя бетона, в основном, за счет увеличения объема арматуры при выпадении гидроксида железа и гидроксида железа 3 на ее поверхности при коррозионной реакции:

При разнице в электрическом потенциале вдоль стали в бетоне, электрохимическая ячейка состоит из анодных и катодных зон соединенных водой (электролитом) в форме поровой воды цементного камня. Положительно заряженные ионы двухвалентного железа Fe^{2+} с анода переходят в раствор, в то время как отрицательно заряженные свободные электроны e^- переходят через сталь в катодную зону, где поглощаются составляющими электролита соединяются с водой и кислородом воздуха с образованием гидроксидных ионов OH^- . Через электролит происходит соединение с ионами двухвалентного железа в виде гидроксида железа, который преобразуется путем дальнейшего окисления ржавчины.

анодная реакция





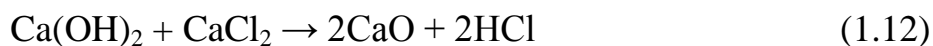
катодная реакция



При реакции стали с ионами хлора происходит образование ржавчины и соляной кислоты.



При воздействии раствора хлорида кальция на бетон происходит реакция с гидроксидом кальция, в результате которой образуется соляная кислота.



В результате реакции хлоридов с цементным камнем образуются хлористо-кальциевые соединения. Из-за повторяющихся во времени химических воздействий может произойти распад вяжущих или разрыв структуры вследствие внутреннего давления, обусловленного образованием соединений большого объема в поровых пространствах бетона.

Длительное или повторное попадание хлоридов приводит к высокой концентрации ионов хлора на поверхности арматуры.

Когда бетон постоянно погружен в воду, хлориды проникают на значительную глубину, но без доступа кислорода реакция на катоде не происходит. В бетоне, подвергающемся попеременному воздействию замачивания-высушивания, проникновение хлоридов прогрессирует.

Сухой бетон впитывает соленую среду, при некоторых условиях процесс продолжается до насыщения. При изменении внешних условий, вода испаряется от устья пор, при этом соли остаются в бетоне. Концентрация солей увеличивается вблизи поверхности бетона. Происходит диффузионный перенос солей вглубь тела бетона. Таким образом вода движется наружу, а соль внутрь.

Движение соли зависит от продолжительности периодов смачивания и сушки. Смачивание происходит очень быстро, а сушка - медленнее. Тело бетона никогда не высыхает. Диффузия ионов во влажные периоды протекает довольно медленно.

Не только смачивание и сушка поверхностной зоны бетона влияет на попадание хлоридов: сушка на большую глубину позволяет последующему смачиванию хорошо переносить хлориды в бетон, тем самым ускоряя попадание ионов хлора.

1.6 Защита железобетонных конструкций от коррозии

Сопrotивление бетона коррозионным процессам зависит от его плотности и применения специальных добавок при изготовлении бетонной смеси. Для приготовления таких смесей требуется минимальное водоцементное отношение и применение добавок, снижающих водопроницаемость, таких как доменный шлак гранулированный, опока, диатомит, трепела.

Защита бетонных конструкций условно может быть разделена на два типа: первичная и вторичная защита.

Первичная защита предусматривает комплекс мер реализуемых на стадии проектных разработок, изготовления элементов и начала возведения строительных конструкций: конструктивные улучшения эксплуатационных свойств изделий, применение модифицирующих добавок, влияющих на специальные характеристики бетонов.

К мерам, применяемым для первичной защиты изделий и конструкций относятся:

- разработка и применение материалов устойчивых к влиянию агрессивной среды;
- использование специальных модифицирующих добавок, поднимающих коррозионную стойкость конструкций и увеличивающих защит-

ные функции по отношению к арматурному каркасу и другим металлическим элементам изделий.

- понижение проницаемости бетонов;
- разработка и соблюдение дополнительных конструктивных норм и требований при проектировании железобетонных конструкций.

Вторичная защита конструкций обязана исключить прямые контакты агрессивных сред с поверхностью материала в период эксплуатации зданий и сооружений. Подразумевается: устройство оклеечной и обмазочной изоляции; обработка поверхностей специальными пропитками и др.

К методам вторичной защиты относятся пропитки и защитные материалы, наиболее распространенные в индивидуальном строительстве:

- биоцидные пропитки искореняют и подавляют развитие грибковых образований, плесени на поверхностях конструкций. Механизм действия данных материалов заключается в проникновении химических составов в структуру бетона, заполняя микротрещины, поры и капилляры изделия.
- обмазочные и оклеечные гидроизоляционные материалы применяются для защиты фундаментов зданий, или в качестве водонепроницаемого слоя в многослойных облицовочных покрытиях (полиэтиленовая пленка, резинобитумные мастики и др.).
- уплотняющие пропитки — добавляют изделиям гидрофобные свойства, которые качественно снижают водопоглощение материала и повышают его водонепроницаемость. Применяются в местах эксплуатации конструкций в условиях повышенной влажности или с целью придания покрытиям повышенных санитарно-гигиенических свойств.
- акриловые и лакокрасочные покрытия при нанесении защитного слоя образуют на поверхности конструкций прочную атмосферостойкую пленку, которая защищает поверхность от воздействия грибков, плесени и других микроорганизмов.

1.7 Выводы по разделу 1

В Главе 1 диссертации проведен анализ имеющихся данных в открытых источниках по оценке воздействия водного раствора хлорида кальция на бетон, рассмотрены основные и дополнительные виды коррозии бетона и железобетона, подробно рассмотрен механизм коррозии бетона под воздействием водного раствора хлорида кальция. Выявлены факторы и условия, влияющие на скорость течения процесса коррозии бетона. Определены основные виды защиты бетонных и железобетонных конструкций от агрессивного воздействия.

2 Обследование железобетонных конструкций после воздействия водного раствора хлорида кальция

В рамках разработки магистерской диссертации приводится обследование элементов сборного железобетонного перекрытия и вертикальных несущих элементов производственного здания на участке замачивания конструкций водным раствором хлорида кальция с последующим образованием повреждений в виде трещин, шелушений, скалывания бетона и коррозии арматурных стержней.

На этапе подготовки диссертационного исследования выполнен повторный осмотр конструкций и дана оценка дальнейшему течению процесса коррозии.

2.1 Описание объекта обследования

Климатический район строительства – II, подрайон – II В, с расчетной температурой наружного воздуха минус 30°C;

Ветровой район – III, скоростной напор ветра – 38 кг/м²;

Снеговой район – IV, расчетная снеговая нагрузка – 240 кг/м²;

Гололедный район – III;

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта – 1,60 м.

Класс ответственности здания – II (нормальный);

Примечания:

1 Климатические параметры площадки приняты по СП [22].

2 Нагрузки и их районирование приняты по СП [17].

3 Класс ответственности здания принят по ГОСТ [2].

Обследуемое производственное здание решено по каркасной конструктивной схеме, элементы сборного железобетонного каркаса приняты по типовой серии ИИ20 [28-31]. Производственное здание на поврежденном участке по высоте двухэтажное. Колонны первого этажа расположены

по сетке осей 6,00×6,00 и 6,00×12,00 м для второго этажа. Высота первого этажа составляет 4,20 м, второго – 3,6 м.

Каркас здания состоит из поперечно расположенных рам с жесткими узлами. В поперечном направлении рамные узлы образуют стыки ригелей с колоннами, осуществляемые посредством ванной сварки выпусков арматурных стержней, сварки закладных деталей колонн и ригеля и омоноличивания всего узла. В продольном направлении устойчивость здания обеспечивается стальными порталными связями по серии ИИ-29-2, установленными в середине температурного отсека по каждому продольному ряду колонн.

Конструкции сборного железобетонного перекрытия на отм. +4.200 приняты под нагрузку 2000 кг/м².

Основными строительными конструкциями здания являются:

- Фундаменты: столбчатые монолитные железобетонные с относительной отметкой подошвы -2.500;
- Колонны: сборные железобетонные индивидуального изготовления, размерами поперечного сечения 400×400 мм, колонны изготавливались в опалубке по серии ИИ22-2;
- Перекрытие: сборные железобетонные ребристые плиты пролетом 6,00 м с высотой сечения 450 мм уложенные по сборным железобетонным таврового сечения высотой 800 мм;
- Покрытие: сборные железобетонные ребристые плиты размерами в плане 1500×6000 мм по сборным железобетонным двускатным балкам двутаврового сечения пролетом 12,0 м;
- Наружные стены: керамзитобетонные стеновые панели сплошного сечения по серии СТ-02-31;
- Перегородки: толщиной 120 мм запроектированы из кирпича марки 100 на растворе М50 с горизонтальным армированием через 5 рядов кладки по высоте;

- Лестничные марши и площадки сборные железобетонные, приняты по серии ИИ-65;
- Кровля: совмещенная, малоуклонная, рулонная с внутренним организованным водостоком.

2.2 Обследование объекта

Обследование выполнялось в период июля-августа 2015 г.

Поврежденные железобетонные конструкции расположены на участке, ограниченном осями Т-Ф/25-29 размерами в плане 12,00×24,00 м (рисунок 2.1).

В осях Т-Ф/25-29 производственное здание двухэтажное.

В объеме первого этажа расположены следующие технологические помещения:

- отделение приготовления сахарного сиропа и колера;
- склад сахара
- вентиляционные камеры,

на втором – помещение охлаждения коньяка.

В осях Т-Ф/25-29 на отм. 0.000 (первый этаж) сборные железобетонные колонны сечением 400×400 мм расположены с шагом 6,00×6,00 м, на отм. +4.200 (второй этаж) – с шагом 6,00×12,00 м.

Сборное железобетонное перекрытие на отм. +4.200 (см. рисунок 2.1) выполнено из сборных железобетонных ребристых плит размерами в плане 1500×6000 мм (рядовые и связевые плиты между колоннами, имеют обозначение П1-# и П2-# на рис. 2.1) и 750×6000 мм (связевые плиты по оси «Ф», имеют обозначение П3-# и П4-# на рисунок 2.1) по сборным железобетонным ригелям таврового сечения пролетом 6,0 м (между осями).

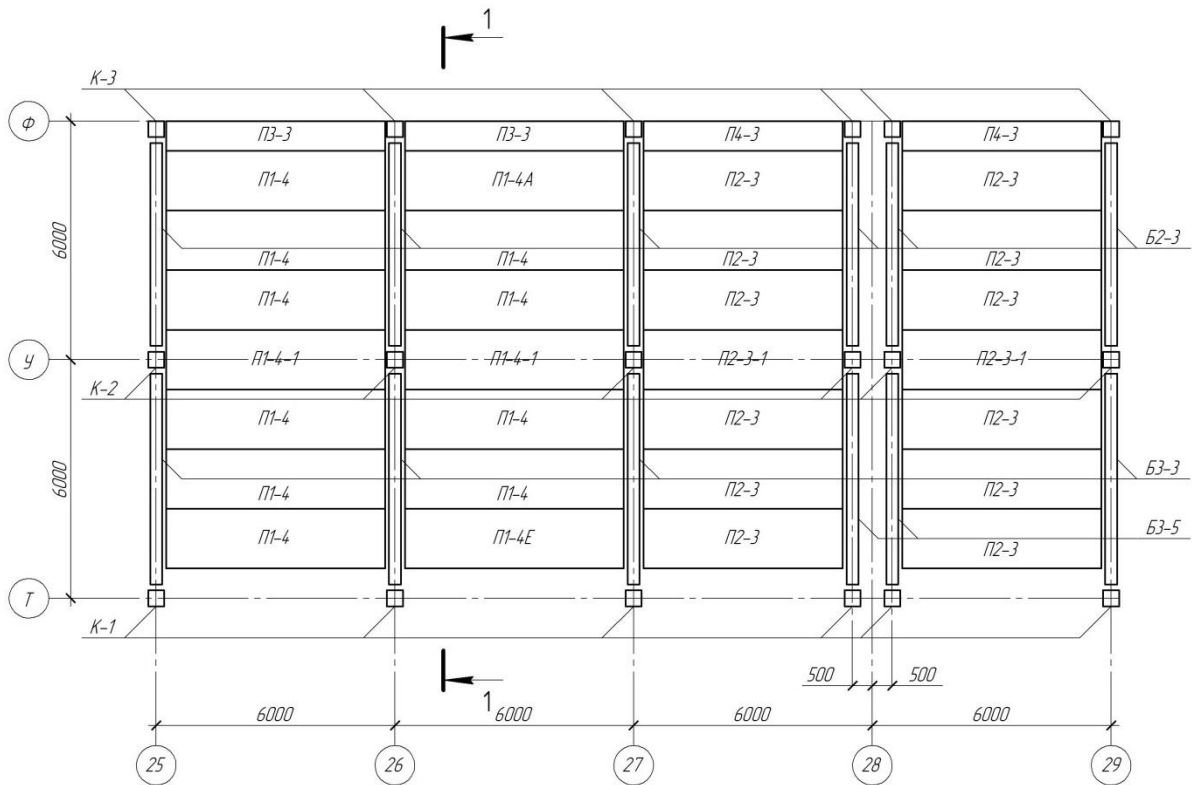


Рисунок 2.1 – Схема расположения несущих элементов каркаса здания на отм. +4.200

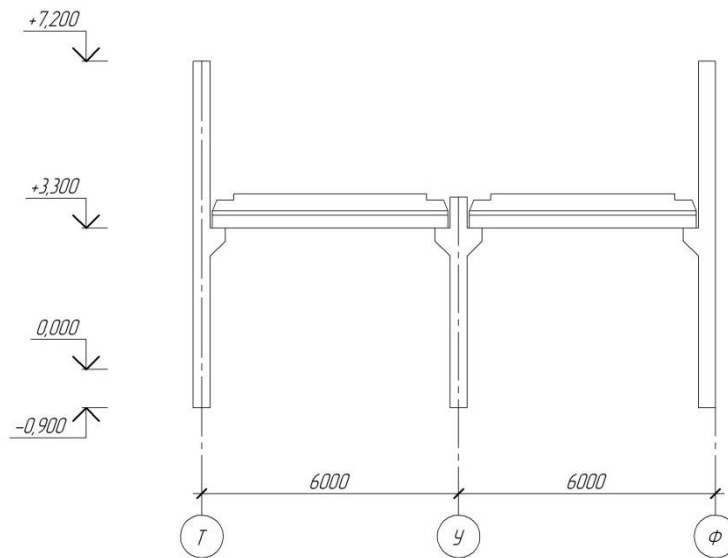


Рисунок 2.2 – Разрез 1-1

Покрытие здания на отм. +7.800 выполнено из сборных железобетонных ребристых плит размерами в плане 1500×6000 мм по сборным железобетонным балкам двутаврового сечения пролетом 12,0 м.

В объеме помещения охлаждения коньяка (в осях Т-Ф/25-29) на отм. +4.200 расположено 6 (шесть) технологических емкостей объемом 20,0 м³ и технологические трубопроводы. Опираение емкостей на перекрытие выполнено через сварную стальную раму из прокатных широкополочных двутавров. Между балками рамы, уложенными в продольном направлении, выполнен лоток из нержавеющей стали для сбора протечек из технологических трубопроводов и емкостей.

Передача нагрузки со стальной рамы в осях 26-28 осуществлена точно на ригели, в осях 25-26 и 28-29 точно на плиты перекрытия. По оси 28 сварная рама разделена деформационным швом (см. рисунок А.4) на две части, в соответствии с деформационным швом по зданию.

В напольном покрытии по перекрытию на отм. +4.200, из метлахской плитки, выявлены выпирания плиток из плоскости пола в осях 25-26 (см. рисунок А.2), что свидетельствует о прогибе перекрытия под нагрузкой.

В объеме помещения второго этажа зафиксированы незначительные протечки атмосферной влаги через конструкцию покрытия, что свидетельствует о негерметичности гидроизоляционного ковра и примыканий выступающих частей над кровлей.

В объеме помещений приготовления сахарного сиропа и колера и склада сахара на первом этаже (отм. 0.000, оси 25-27) расположены емкости объемом 20,0 м³, мешалки и другое технологическое оборудование. Оборудование не позволило выполнить съемку прогибов конструкций перекрытия в полном объеме, съемка выполнена на участках с возможностью доступа. Результаты определения значений прогибов приведены в таблице 2.1, схема измерений представлена на рисунке 2.3.

В помещениях первого этажа зафиксированы следы протечек водного раствора хлорида кальция. На участках замачивания конструкций, на их поверхности, произошло разрушение цементного камня с последующим выветриванием и обнажение крупного заполнителя (см. рисунок А.9).

Таблица 2.1 – Прогибы конструкций перекрытия

Конструкция	Привязка	Отсчет, мм					Фактический прогиб, мм	Допустимый прогиб, мм
		1	2	3	4	5		
Плита П1-4	У-Ф/25-26	932	942	941	-	-	9	27.75
Плита П1-4	У-Ф/25-26	930	938	948	-	-	18	27.75
Плита П1-4	У-Ф/25-26	926	933	924	914	892	15	27.75
Плита П1-4	У-Ф/25-26	928	930	922	915	894	11	27.75
Ригель	У-Ф/26	1333	1342	1348	1356	1357	3	26.40

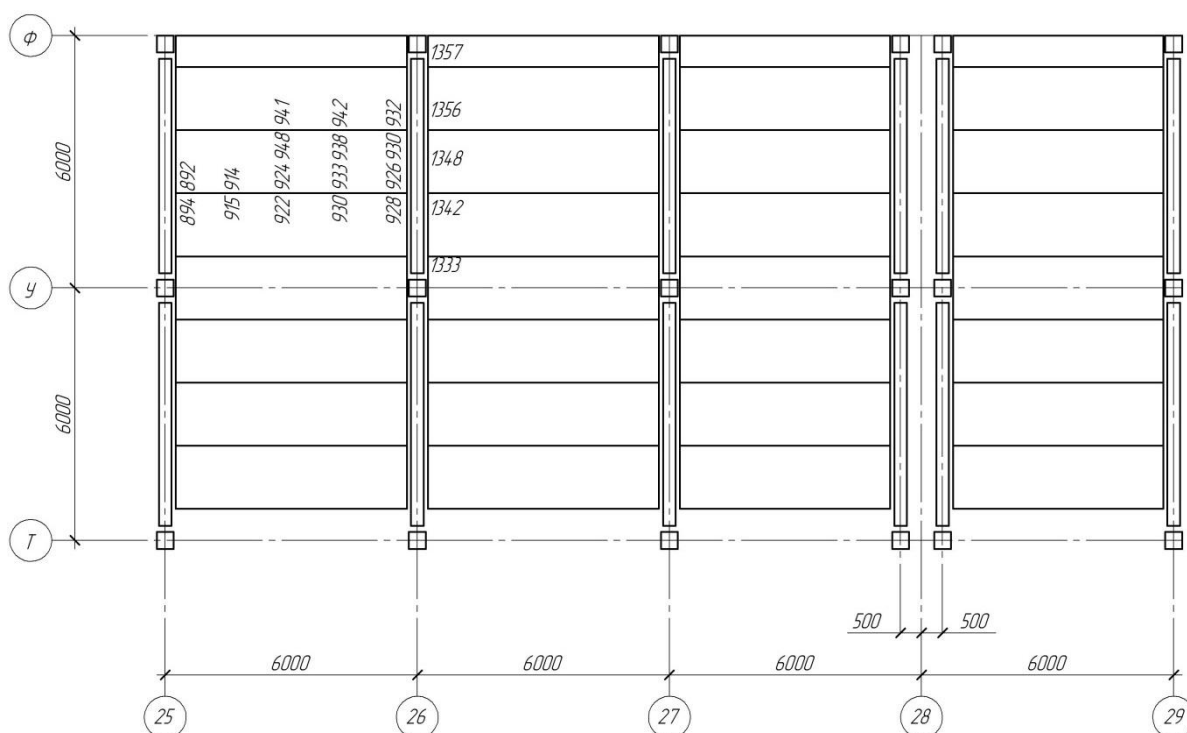


Рисунок 2.3 – Схема определения прогибов конструкций перекрытия на отм. +4.200

Воздействие водного раствора хлорида кальция привело к нарушению щелочной среды бетона, которая обеспечивает сохранность арматурных стержней и стальных закладных изделий в теле конструкции. Нарушение защитной щелочной среды бетона способствует проникновению агрессивных веществ, воды и воздуха к стальным элементам и активации процессов коррозии. Коррозия стали сопровождается увеличением ее объ-

ема, ввиду образования продуктов коррозии. Увеличение объема арматуры или закладных деталей приводит к разрушению защитного слоя бетона и нарушению совместной работы арматуры с бетоном (нарушаются склеивание бетона с арматурой и механическое защемление арматурных стержней в бетоне). Нарушение совместной работы бетона с арматурой является особенно критичным при эксплуатации конструкций с предварительно напряженной арматурой, т.к. происходит потеря усилия предварительного обжатия, что ведет к увеличению прогибов конструкций и снижению трещиностойкости.

Наибольшему разрушению подверглись сборные железобетонные ребристые плиты и ригели перекрытия, так же замачиванию подверглась часть колонн.

Сборные железобетонные плиты перекрытия на отм. +4.200 выполнены по серии ИИ24-1. Ширина рядовых и связевых плит по колоннам составляет 1500 мм, межколонных связевых плит – 750 мм; длина плит в средних шагах составляет 5550 мм (оси 25-27), в крайних – 5050 мм (оси 27-29).

Плиты перекрытия в осях 27-29 изготовлены из бетона марки М200, в осях 25-27 – из бетона марки М300.

По ребристым плитам перекрытия зафиксировано разрушение защитного слоя бетона продольных ребер (см. рисунок А.5-А.8), в том числе на опорной зоне. Разрушение защитного слоя зафиксировано почти по всем плитам, по всей длине ребер. Выявлены участки со сколами защитного слоя бетона и глубокой коррозией арматуры.

По полкам плит перекрытия (плитная часть между главными и второстепенными ребрами) отмечены следы замачивания раствором и коррозия арматурной сетки (см. рисунок А.5-А.6).

Вертикальных и наклонных трещин по ребрам плит перекрытия не выявлено, т.е. признаки силового разрушения отсутствуют. Отсутствие

трещин можно объяснить передачей нагрузки от емкостей непосредственно на ригели перекрытия.

В помещении венткамеры (оси 27-29) выявлены плиты перекрытия с коррозией поперечных каркасов в главных ребрах. Данное повреждение объясняется несоблюдением величины защитного слоя бетона при заводском изготовлении конструкций и замачивания плит агрессивным раствором.

В помещении венткамеры выявлены трещины по кирпичным перегородкам. Причиной образования трещин является установка перегородок в распор между полом и конструкциями перекрытия (без технологического зазора).

Опирающие плиты перекрытия выполнены на сборные железобетонные ригели таврового сечения. Полки ригелей высотой 400 мм, общая высота сечения составляет 800 мм, длина ригелей составляет: 5480 мм в осях Т-У, 5280 мм в осях У-Ф.

Ригели перекрытия выполнены из бетона марки М300, без применения арматуры с предварительным напряжением. Наибольшим повреждением подверглись ригели в осях У-Ф/26-28 и Т-У/27.

По сборным железобетонным ригелям отмечено уменьшение защитного слоя бетона вследствие химической коррозии и разрушения цементного камня, разрушение защитного слоя бетона ввиду коррозии арматуры и закладных деталей (см. рисунок А.9-А.10).

Коррозии подверглись закладные детали крепление ребристых плит к ригелям, и каркасы полок ригеля. Признаков повреждения рабочих арматурных стержней не выявлено.

Признаков силового разрушения ригелей, в виде наклонных трещин и прогибов, превышающих нормативные, не зафиксировано.

Сборные железобетонные колонны индивидуального изготовления, трех марок, выполнены по аналогии с колоннами серии ИИ22-2, с анало-

гичными узлами сопряжения конструкций. Колонны в осях Ф/26-28 и У/26-27 подверглись замачиванию агрессивным раствором.

Все марки колонн армированы 8-ю стержнями диаметром 25 мм класса АШ (А400), по 4 стержня на рабочую грань.

Выявлены сколы защитного слоя бетона по углам сечения колонн и коррозия рабочих арматурных стержней (см. рисунок А.11-А.12).

В осях У/28 колонны имеют повреждения по надконсольной части.

Стоит отметить, что наблюдений за протечками со стороны служб Заказчика не велось. Невозможно установить дату начала протечек водного раствора хлорида кальция из системы хладоснабжения, периодичность протечек и длительность воздействия.

По результатам технического обследования установлено, что общее техническое состояние конструкций здания в осях 25-29/Т-Ф, в соответствии с СП [16], оценивается как ограниченно-работоспособное - категория технического состояния конструкций, при которой имеются дефекты и повреждения, приведшие к некоторому снижению несущей способности, но отсутствует опасность внезапного разрушения и функционирование конструкции возможно при контроле ее состояния, продолжительности и условий эксплуатации.

Заказчику для дальнейшей безаварийной эксплуатации рекомендовано выполнить работы усилению конструкций перекрытия. Запрещена эксплуатация емкостей у деформационного шва, нагрузка с которых через стальную распределительную раму передается на плиты перекрытия.

В ноябре 2017 г. выполнен повторный визуальный осмотр конструкций здания в осях 25-29/Т-Ф. Повреждения, выявленные в июле-августе 2015 г. прогрессируют:

- наблюдается дальнейшее разрушение и обрушение защитного слоя бетона ригелей, плит перекрытия и колонн;
- нарастание прогибов плит перекрытия;

- дальнейшее развитие коррозии арматуры – увеличение объема продуктов коррозии

При отсутствии усиления конструкций и мероприятий по мониторингу технического состояния, Заказчику рекомендовано проведение противоаварийных мероприятий.

2.3 Сложности, возникшие при обследовании объекта

При повреждениях конструкций, выявленных обследованием, согласно требованиям ГОСТ [3] и СП [16], необходимо выполнить поверочный расчет с использованием фактических геометрических, прочностных и механических параметров сечений железобетонных элементов.

Оценить прочность бетона, армирование и геометрические параметры сечения элемента (на примере ригеля таврового сечения серии ИИ20), возможно в нижней его части с помощью методом неразрушающего контроля по методикам ГОСТ [12, 13] – нижняя часть элемента, как правило, является доступной для осмотра и проведения измерений. Оценить прочность бетона и сохранность элемента остова здания после агрессивного воздействия в верхней его части из-за отсутствия доступа, не представляется возможным, так же как и проведение инструментальных измерений.

В условиях действующего пищевого производства, как правило, возникают трудности с обеспечением доступа к конструктивным элементам зданий. Сложности обусловлены действующим производством, расположением стационарного оборудования, технологических трубопроводов, наличием напольных и иных покрытий и т.д.

Вскрытие конструкции влечет за собой частичную или полную остановку производства, связанного с демонтажными работами, при демонтажных и ремонтных работах происходит значительное образование пыли.

При определении прочности элементов конструкции здания с малой толщиной полок, стенок и т.п., в данном случае сборных железобетонных

плит перекрытия по серии ИИ20, возникает сложность с определением прочности по методикам ГОСТ [12] (см. табл. 2). Малая толщина элементов (менее 96 мм) не позволяет выполнить построение градуировочной зависимости для применения косвенных методов: упругого отскока, пластической деформации, ударного импульса, отрыва, или проведения прямых измерений методами отрыва со скалыванием и скалывания ребра.

Косвенные методы ударного импульса, пластической деформации и отрыва (отрыв дисков) можно применять при толщине элемента конструкции от 50 до 70 мм, однако без построения градуировочной зависимости для конкретного вида бетона их применение невозможно.

Нижняя грань железобетонного элемента является растянутой, а верхняя грань – сжатой, в общем случае, соответственно, наличие механических повреждений (уменьшение площади сечения), изменение физико-механических свойств бетона в сечении, в сжатой зоне несут в себе большую опасность для надежной эксплуатации, чем повреждения в растянутой зоне, т.к. при расчете элемента в растянутой зоне учитывается только арматура.

Из выше приведенного следует, что оценить снижение прочности бетона конструкции во времени, при воздействии водного раствора хлорида кальция, возможно путем натуральных испытаний образцов бетона с моделированием агрессивного воздействия. Натурные испытания позволят получить данные о количественном и качественном изменении физико-механических характеристик бетона сжатой зоны.

2.4 Выводы по разделу 2

В рамках обследования производственного здания установлены повреждения, возникшие после замачивания конструкций водным раствором хлорида кальция. Указаны обстоятельства, не позволяющие выполнить достоверную оценку возможности дальнейшей эксплуатации поврежденных

конструкций. В отсутствии данных эксплуатации о возникновении протечек, их интенсивности, времени воздействия, ремонтных работах, возникает сложность с оценкой снижения прочности бетона и глубины проникновения водного раствора хлорида кальция в бетон.

В объеме экспериментальной части ставятся задачи определения изменения следующих параметров:

1. снижение кубиковой прочности бетона от времени агрессивного воздействия;
2. снижение призмочной прочности бетона от времени агрессивного воздействия;
3. снижение модуля деформаций бетона от времени агрессивного воздействия;
4. развитие коррозии бетона от времени агрессивного воздействия;
5. визуальные признаки повреждений от времени агрессивного воздействия;
6. капиллярное проникновение раствора в бетон.

3 Экспериментальная оценка воздействия водного раствора хлорида кальция на бетон

Экспериментальная часть магистерской диссертации разбита на два этапа. На первом этапе осуществляются испытания образцов-кубов размерами $10 \times 10 \times 10$ см из бетонной смеси заданного состава. Изготовленные образцы-кубы разделены на эталонные (не подвергающиеся воздействию агрессивной среды) и экспериментальные (подвергающиеся воздействию агрессивной среды согласно программе испытаний).

На первом этапе изучается влияние агрессивной среды на параметры: кубиковая прочность бетона, развитие коррозии бетона под воздействием водного раствора хлорида кальция, капиллярное проникновение водного раствора хлорида кальция в тело бетона, образование характерных повреждений.

По результатам испытаний первого этапа определены характерные периоды коррозионного воздействия при испытаниях на втором этапе образцов-призм.

На втором этапе изготовлены бетонные образцы-призмы размерами $40 \times 10 \times 10$ см для проведения механических испытаний для изучения влияния агрессивной среды на призмную прочность и модуль деформаций бетона.

3.1 Первый этап экспериментальной работы

3.1.1 Программа испытаний

На основании данных технических и нормативных источников, а также публикаций в периодических изданиях, по теме коррозии бетона при воздействии водного раствора хлорида кальция, для исследования по теме магистерской диссертации разработана следующая методика испытаний с

делением образцов-кубов, изготовленных из бетонной смеси заданного состава на 8 групп (см. рисунок Б.1).

1 группа:

Образцы-кубы выдерживаются в емкости (см. рисунок Б.2) с водным раствором хлорида кальция ($CaCl_2$, удельный вес 1,26 г/см³) в течение 1 суток, после чего образцы извлекаются из раствора и выдерживаются 2 суток в воздушной среде при температуре +25°C в проветриваемом помещении (см. рисунок Б.3).

Цикл замачивания-высушивания в агрессивной среде повторяется 4 (Четыре) раза.

Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора - фенолфталеина.

2 группа:

Цикл замачивания-высушивания в агрессивной среде повторяется 8 (Восемь) раз.

Количество образцов в группе – 3 (Три).

Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора - фенолфталеина.

3 группа:

Цикл замачивания-высушивания в агрессивной среде повторяется 12 (Двенадцать) раз.

Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора - фенолфталеина.

4 группа:

Цикл замачивания-высушивания в агрессивной среде повторяется 16 (Шестнадцать) раз.

Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора - фенолфталеина.

5 группа (контрольная):

Образцы-кубы выдерживаются в емкости с дистиллированной водой в течение 1 суток, после чего образцы извлекаются из воды и выдерживаются 2 суток в воздушной среде при температуре +25°C в проветриваемом помещении.

Цикл замачивания-высушивания в дистиллированной воде повторяется 8 (Восемь) раз.

Количество образцов в группе – 3 (Три). Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора - фенолфталеина.

6 группа (контрольная):

Цикл замачивания-высушивания в дистиллированной воде повторяется 16 (Шестнадцать) раз.

Количество образцов в группе – 3 (Три). Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора – фенолфталеина.

7 группа (контрольная):

Образцы-кубы выдерживаются в эксикаторе в неагрессивной среде, изолированной от окружающего микроклимата в течение 16 (Шестнадцати) циклов, до завершения испытаний.

Количество образцов в группе – 3 (Три). Два образца испытываются на прочность до разрушения по ГОСТ [9] с определением средней прочности в группе. Один образец распиливается на две равные части сухим способом, опиленные поверхности увлажняются дистиллированной водой с последующим нанесением спиртового раствора индикатора – фенолфталеина.

8 группа:

1 (Один) образец-куб помещается в чашку с дистиллированной водой с высотой уровня 10 мм.

1 (Один) образец-куб помещается в чашку с водным раствором хлорида кальция ($CaCl_2$) с высотой уровня 10 мм.

Количество образцов в группе – 2 (Два).

Приведенное деление образцов-кубов на группы призвано решить следующие задачи при проведении эксперимента.

Группы образцов 1-4 выявляют количественные показатели коррозии бетона выражающиеся в снижении кубиковой прочности бетона и глубине развития коррозии.

Группы образцов 5-6 позволяют ввести корректировку при возможном наборе прочности бетоном при проникновении воды в тело кубов (возобновление реакции гидратации цемента).

Группа образцов 7 используется для корректировки результатов испытаний при возможном наборе прочности бетоном. Спил поверхности куба данной группы является эталонным по интенсивности окрашивания раствором индикатора.

Группа образцов 8 показывает капиллярное поднятие (всасывания) различных растворов бетоном.

Таблица 3.1 – Группировка образцов-кубов

№ группы	Кол-во циклов	Среда	Параметры	Кол-во образцов в группе
1	4	CaCl ₂	Прочность, глубина коррозии	3
2	8	CaCl ₂	Прочность, глубина коррозии	3
3	12	CaCl ₂	Прочность, глубина коррозии	3
4	16	CaCl ₂	Прочность, глубина коррозии	3
5	8	H ₂ O	Прочность, глубина коррозии	3
6	16	H ₂ O	Прочность, глубина коррозии	3
7	-	эксикатор	Набор прочности за время испытаний	3
8	-	CaCl ₂ / H ₂ O	Капиллярное поднятие раствора	2

После выдерживания образцов-кубов по приведенным выше схемам испытаний, соответствующих группам, на следующий день выполняются испытания по определению классовой прочности и степени коррозии бетона. Степень коррозии бетона выявляется по цветовой картине окрашивания спила – по интенсивности окрашивания определяется изменение рН показателя цементного камня. Проводится осмотр всех кубов с фиксацией возникающих повреждений (см. рисунок Б.4).

Для прекращения реакции гидратации цемента, а именно устранения условий для набора прочности бетоном образцов, выполнено их высушивание в сушильных шкафах до постоянной массы при температуре 105 °С.

3.1.2 Изготовление образцов-кубов

Для изготовления образцов-кубов для исследования, согласно ГОСТ [5-7] принят состав бетонной смеси на 1 м³:

- цемент марки ПЦ500 – 340 кг;
- песок речной – 680 кг;
- щебень карбонатных пород фракции 5-20 мм марки М600 – 1130 кг;
- вода – 250 кг.

Для реализации программы испытаний требуется 28 (Двадцать восемь) образцов-кубов размерами 10×10×10 см. При пересчете масс компонентов смеси на 28 дм³ получаем следующую потребность в материалах:

- цемент марки ПЦ500 – 10,2 кг;
- песок речной – 20,4 кг;
- щебень карбонатных пород фракции 5-20 мм марки М600 – 33,9 кг;
- вода – 7,5 кг.

Из бетонной смеси фактически изготовлено 28 бетонных образцов-кубов в тарированных стальных формах по ГОСТ [9] (см. рисунок Б.1). Образцы выдержаны в течение 28 суток в камере нормальных условий при температуре +25±2 °С и влажности 98±2%.

После набора прочности (28 суток), образцы-кубы пронумерованы, обмерены и взвешены. Линейных отклонений образцов от нормативных размеров 10×10×10 см не выявлено, т.е. все кубы имеют объем 1 дм³ и раз-

меры всех граней 10×10 см. Результаты измерения массы и плотности приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерения массы и плотности образцов-кубов

№ куба	№ группы	Масса, г	Плотность, г/см ³	Масса в сухом состоянии, г	Масса воды, г	Влажность, %
1		2321	2.321	2306	15	0.65
2	2	2343	2.343	2298	45	1.92
3	2	2346	2.346	2299	47	2.00
4	1	2343	2.343	2309	34	1.45
5		2330	2.330	2265	65	2.79
6	5	2331	2.331	2297	34	1.46
7	1	2336	2.336	2305	31	1.33
8	8	2340	2.340	2307	33	1.41
9	7	2347	2.347	2287	60	2.56
10	5	2335	2.335	2302	33	1.41
11		2334	2.334	2270	64	2.74
12	3	2321	2.321	2258	63	2.71
13	3	2329	2.329	2271	58	2.49
14		2347	2.347	2283	64	2.73
15	6	2331	2.331	2265	66	2.83
16	5	2315	2.315	2281	34	1.47
17	-	2306	2.306			
18	2	2313	2.313	2280	33	1.43
19	1	2318	2.318	2282	36	1.55
20		2343	2.343	2289	54	2.30
21	6	2321	2.321	2290	31	1.34
22	-	2341	2.341			
23	6	2347	2.347	2288	59	2.51
24	3	2324	2.324	2281	43	1.85
25		2320	2.320	2266	54	2.33
26	7	2315	2.315	2251	64	2.76
27		2324	2.324	2270	54	2.32
28	8	2326	2.326	2268	58	2.49
		ср. знач.	2.330	2283	47	2.03

Максимальное отклонения образцов по массе (минимальное значение 2306 г, максимальное значение 2347 г) составляет 41 г, что отвечает требованиям ГОСТ [6]. Средняя плотность образцов-кубов составляет 2,330 г/см³.

Образцы-кубы 17 и 22 испытаны до разрушения в прессе для определения прочности бетона образцов и класса бетона. Результаты испытаний приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Определение прочности бетона

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
17	2306	2.306	38000	380	375,25
22	2341	2.341	41000	410	

Средняя прочность бетона составила 375,25 кг/см² (37,5 МПа). Фактический класс бетона соответствует классу В29.32. Класс бетона определен по схеме Г, ГОСТ [8].

Оставшиеся образцы высушены в сушильных шкафах до постоянной массы при температуре 105°С. Средняя влажность образцов составила 2,03%. Высушивание образцов выполнено для остановки реакции гидратации цемента. Далее образцы подверглись различным условиям хранения для реализации методики испытаний.

3.1.3 Испытания образцов-кубов

При проведении испытаний использовано оборудование:

- 1) пресс гидравлический WMP-60 (точность измерения нагрузки 200 кг);
- 2) весы электронные ПВ-6 (точность измерения 1/2 г);
- 3) линейка металлическая 0..300 мм (точность измерения 1 мм);
- 4) лупа Ли-3-10х (точность измерения 0,1 мм).

Результаты испытания 1 группы (4 цикла)

По образцам наблюдается изменение цвета образцов в сторону затемнения.

Образцы имеют массу, превышающую массу образцов после формирования и набора прочности в течение 28 суток.

На всех образцах наблюдаются волосяные трещины вдоль пересечения граней.

Внутренняя структура образцов, после испытания в прессе, имеет темную текстуру, образцы не имеют пористости.

Наблюдается начальная коррозия цементного камня (см. рисунок Б.12). Малые разрушения цементного камня вблизи крупного заполнителя у граней.

Глубина коррозии бетона от 1 до 3 мм (среднее значение 2 мм).

Таблица 3.4 – Результаты определения прочности, 1 группа

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
4	-	-	27200	258,4	273,6
7	-	-	30400	288,8	
19	распил				

Потеря прочности бетона составила $100\% - 273,6/375,25 = 27,09\%$, в сравнении с первичными испытаниями.

Результаты испытания 2 группы (8 циклов)

Образцы приобретают более темное окрашивание.

На поверхности образцов наблюдается появление белого налета.

При испытании на прессе структура образцов имеет пористую структуру у граней. Наблюдается образование белого налета внутри образца на границе цементного камня с крупным заполнителем.

Развитие коррозии бетона продолжается (см. рисунок Б.13-Б.15).

Происходит разрушение цементного камня вблизи крупного заполнителя. Разрушение крупного заполнителя (образование трещин), разрыхление.

Глубина коррозии бетона составляет от 5 до 6 мм (среднее значение 5,5 мм).

Таблица 3.5 – Результаты определения прочности, 2 группа

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
2	2446	2,446	23600	224,2	219,45
3	2457	2,457	22600	214,7	
18	2402	2,402	распил		

Процент потери прочности бетоном составил 100%-219,45/375,25=41,52%, в сравнении с первичными испытаниями.

Результаты испытания 5 группы (8 циклов, дистиллированная вода)

По образцам наблюдается изменение цвета в сторону осветления.

Дефекты и повреждения по образцам отсутствуют.

Прочность бетона увеличилась на 6%, в сравнении с первичными испытаниями.

Наблюдается незначительный рост массы образцов, в сравнении с массой образцов после формования и набора прочности в течение 28 суток.

Таблица 3.6 – Результаты определения прочности, 5 группа

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
10	2383	2,383	42000	399,0	399,0
16	2372	2,372	42000	399,0	
6	2378	2,378	распил		

Результаты испытания 3 группы (12 циклов)

Наблюдаются значительные разрушения образцов со сколами граней бетона, Объем образцов увеличился.

Наблюдается продолжение развития коррозии бетона (см. рисунок Б.16-Б.20).

Разрушение цементного камня у крупного заполнителя.

Таблица 3.7 – Результаты определения прочности, 3 группа

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
12	2448	2,448	22400	212,8	225,15
13	2450	2,450	25000	237,5	
24	-	-	распил		

Разрушение крупного заполнителя (образование трещин), разрыхление.

Глубина коррозии бетона составляет от 7 до 10 мм (среднее значение 8,5 мм).

Процент потери прочности бетона составил $100\% - 225,15/375,25 = 40,00\%$, в сравнении с первичными испытаниями.

После 14 циклов образцы имеют значительные разрушения и значительное увеличение объема с раскрытием трещин до 3 мм (см. рисунок Б.9-Б.11). Испытания остановлены.

Результаты испытания 6 группы (16 циклов, дистиллированная вода)

По образцам наблюдается изменение цвета в сторону осветления.

Дефекты и повреждения по образцам отсутствуют.

Прочность бетона увеличилась на 6,33%, в сравнении с первичными испытаниями.

Наблюдается незначительный рост массы образцов, в сравнении с массой образцов после формования и набора прочности в течение 28 суток.

Таблица 3.8 – Результаты определения прочности, 6 группа

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
21	2299	2,299	42000	399,0	399,0
23	2324	2,324	42000	399,0	
15	2305	2,305	распил		

Результаты испытания 7 группы (эксикатор)

Прочность образцов не изменилась.

Таблица 3.9 – Результаты определения прочности, 7 группа

№ куба	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²	Средняя прочность бетона, кг/см ²
9	2285	2,285	40000	380,0	375,25
26	2253	2,253	39000	370,5	

Результаты испытания 8 группы

Испытание направлено на определение сил капиллярного поднятия и впитывания растворов бетоном. Результаты испытаний сведены в таблицу 10.

Таблица 3.10 – Результаты определения капиллярного поднятия

Время начала	Время завершения	Вода, мм	Соль, мм
00:00	-	8,7	6,3
00:30	00:30	13,8	10,5
01:15	00:45	18,3	12,0
02:15	00:60	21,5	15,0
03:15	00:60	23,6	17,2
04:15	00:60	28,0	22,8
20:45	16:30	57,5	27,0
24:00	03:15	50,83	28,75

После завершения всех испытаний образцы, подверженные воздействию агрессивной среды, некоторое время сохранялись на открытом воздухе, при этом произошло обильное образование налета белого цвета с последующим увеличением объема образцов.

3.1.4 Повреждения образцов-кубов

При проведении испытаний зафиксированы повреждения образцов-кубов (см. рисунок Б.5-Б.7), которые возможно зафиксировать визуально. Повреждения в зависимости от периода воздействия, с характерным выделением циклов, сведены в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 – Повреждения образцов-кубов

Кол-во циклов	Повреждения
0	Повреждения отсутствуют
4	Раскрытие трещин до 0,1 мм
8	Раскрытие трещин от 0,2 мм до 0,8 мм. Появление искривлений по граням элементов с увеличением объема у пересечений граней. Выветривание компонентов цементного камня, слабое обнажение крупного заполнителя
12	Раскрытие трещин до 2,0 мм. Явное искривление по граням элементов с увеличением объема у пересечений граней. Выветривание компонентов цементного камня, обнажение крупного заполнителя. Поверхностное разрушение крупного заполнителя из щебня карбонатных пород
14	Разрушение образцов

3.1.5 Обработка результатов испытаний образцов-кубов

На основании результатов испытаний построены графики:

- 1) снижение прочности – количество циклов (Рис. 3.1);
- 2) глубина коррозии – количество циклов (Рис. 3.2);
- 3) проникновение раствора – время (Рис. 3.3).

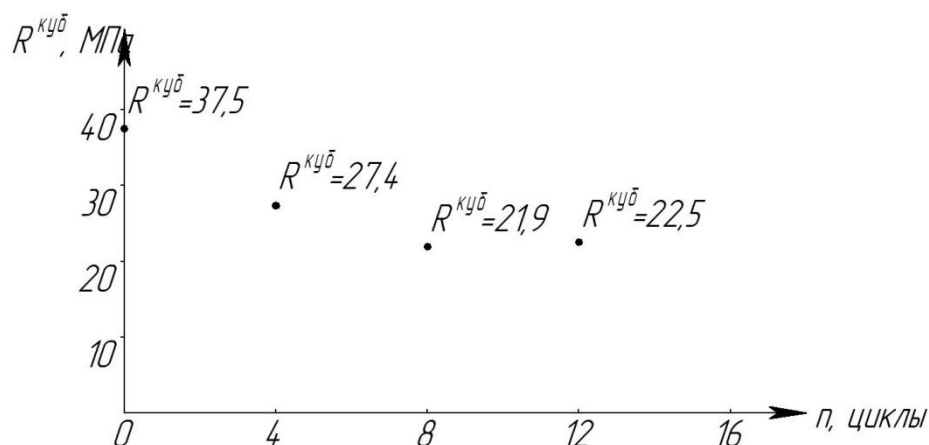


Рисунок 3.1 – Снижение прочности бетона с ростом циклов агрессивного воздействия

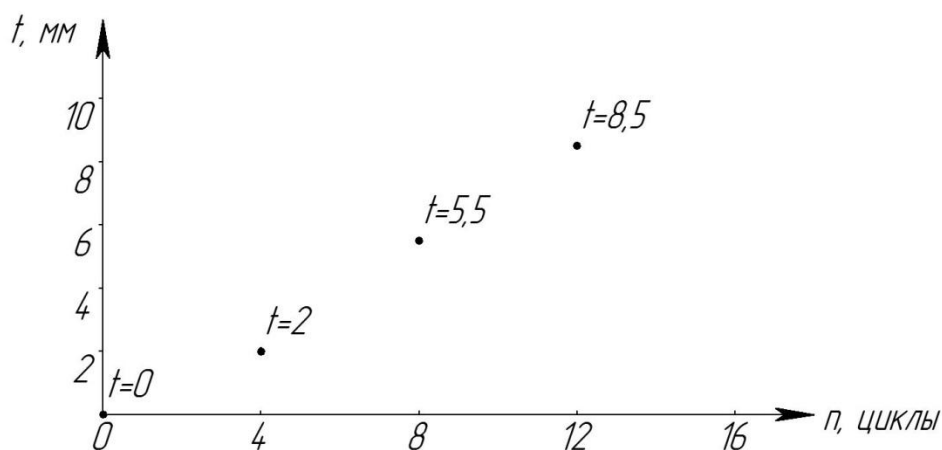


Рисунок 3.2 – Увеличение глубины коррозии бетона с ростом циклов агрессивного воздействия

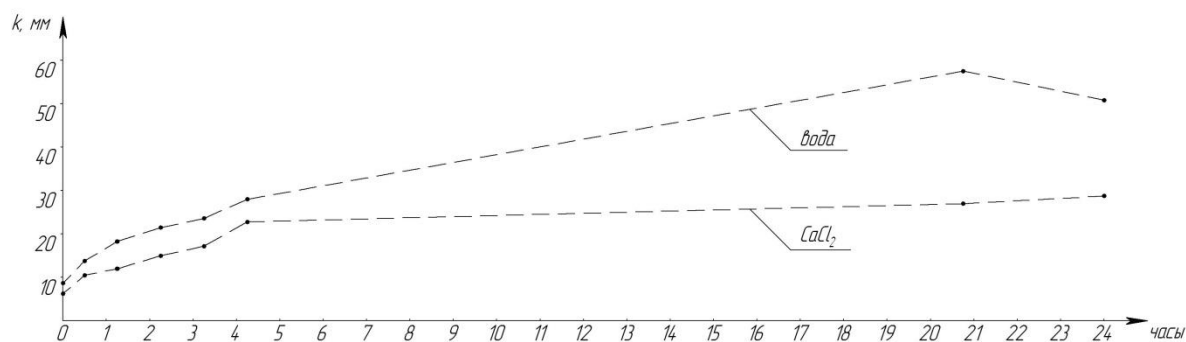


Рисунок 3.3 – Зависимость капиллярного проникновения воды и водного раствора хлорида кальция в тело бетона от времени

3.2 Второй этап экспериментальной работы

3.2.1 Программа испытаний

На основании результатов настоящего исследования о влиянии водного раствора хлорида кальция на бетон, изложенных в разделе 3.1 магистерской диссертации, принято решение провести испытания образцов-призм при следующих условиях:

- испытание на сжатие образца-призм без воздействия агрессивной среды;
- испытание на сжатие образца-призмы после воздействия 4 циклов замачивания в водном растворе хлорида кальция;

- испытание на сжатие образца-призмы после воздействия 8 циклов замачивания в водном растворе хлорида кальция.

Для сохранения масштабного фактора при воздействии агрессивной среды, к испытаниям приняты образцы-призмы размерами 40×10×10 см (см. рисунок В.2), отвечающие требованиям п.1.1 ГОСТ [10].

Решение по испытаниям образцов при 4 (Четырех) и 8 (Восьми) циклах принято, т.к. при количестве циклов более 8 (Восьми) наблюдаются значительные деструктивные изменения бетона, а так же значительное снижение кубиковой прочности (более 40%) от базовой, что не позволит провести испытания образцов-призм.

Испытания образцов и обработка полученных результатов производятся по методике, аналогичной ГОСТ [10], Глава 6.

Для определения модуля деформаций бетона по образцам-призмам изготовлены стальные рамки для измерения продольных деформаций, согласно п.3.6 ГОСТ [10]. Индикаторы часового типа ИЧ-10 закреплены согласно схеме, приведенной на рис. 3.4.

При воздействии водного раствора хлорида кальция на бетонные образцы с ростом циклов агрессивного воздействия увеличивается разрушение их граней (см. рисунок В.3-В.4). Для обеспечения надежности и неподвижности крепления стальных рамок на образцах-призмах, а так же снижения влияния степени разрушения торцов на результат измерений, принято решение уменьшить базу измерения продольных деформаций призмы до 200 мм (*l*).

При испытании образцов-призм принята следующая методика испытаний, которая базируется на методике определения модуля деформация, приведенной в ГОСТ [10].

Методика испытаний образцов-призм

1. На образце-призме устанавливаются стальные рамки, обеспечивающие измерение продольных деформаций на базе равной 200 мм. Рамки отстоят от торцов призм на 100 мм;
2. На торцы призм наносится гипсовый раствор с последующим обжатием образца в прессе при нагрузке, равной 1,0 т. После чего призма разгружается. Ожидается твердение гипсового раствора;
3. Нагружение призмы осуществляется ступенями, равными 2,0 т с выдержкой 4..5 мин. до нагрузки равной 10,0 т. Фиксируются показания индикаторов ИЧ-10 по четырем граням. При отклонении показаний индикаторов от их среднего арифметического значения более чем на 15%, призму необходимо разгрузить и центрировать по плитам прессы.
4. Далее нагружение образца-призмы осуществляется ступенями равными 2,0 т с выдержкой 4..5 мин.;
5. Нагружение образца-призмы ведется до ее разрушения;

Снятие показаний индикаторов ИЧ-10 осуществляется в начале и конце ступени.

Исходя из средней кубиковой прочности бетона $375,25 \text{ кг/см}^2$ ($37,5 \text{ МПа}$), определенной при испытаниях первого этапа ранее, см. табл. 3.3 (фактический класс испытываемого бетона соответствует классу В29.32 (схема Г, ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности»), определим по ф. 3.1 предполагаемые разрушающие напряжения.

$$R_{bn} = R_n \cdot 0.77 - 0.0001R_n, \quad (3.1)$$

$$R_{bn} = 375.25 \cdot 0.77 - 0.0001 \cdot 375.25 = 274.86, \text{ кг/см}^2,$$

Умножив напряжение на площадь поперечного сечения призмы (100 см^2) получим ориентировочную разрушающую нагрузку, равную 27486 кг ($27,5 \text{ т}$).

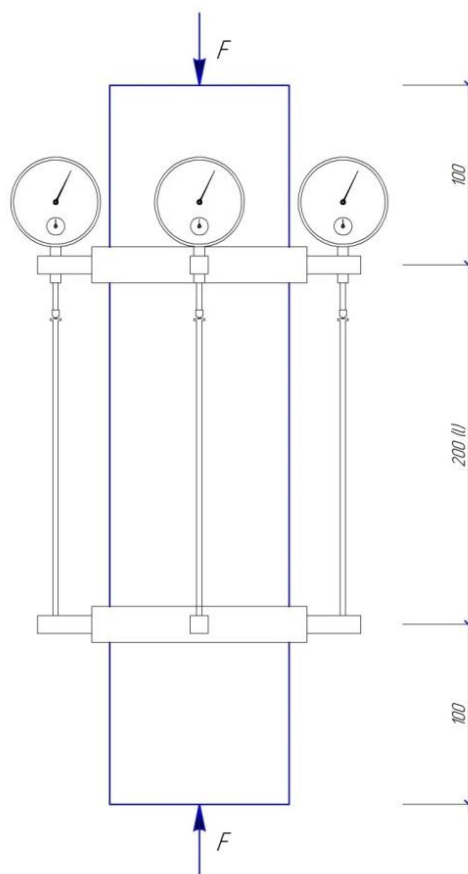


Рисунок 3.4 – Схема расположения индикаторов часового типа на образце-призме

3.2.2 Изготовление образцов-призм

Для изготовления образцов-призм принят состав бетонной смеси по п. 3.1.2 настоящей диссертации. Для проведения исследования требуется 3 (Три) образца размерами 40×10×10 см. При пересчете масс компонентов смеси на 16 дм³ получаем следующую потребность в материалах:

- цемент марки ПЦ500 – 5,4 кг;
- песок речной – 10,9 кг;
- щебень карбонатных пород фракции 5-20 мм марки М600 – 18,08 кг;
- вода – 4 кг.

Из бетонной смеси фактически изготовлено 3 бетонных образца-призмы в тарированных стальных формах по ГОСТ [9]. Образцы выдержива-

ны в течение 28 суток в камере нормальных условий при температуре $+25\pm 2^\circ\text{C}$ и влажности $98\pm 2\%$.

После набора прочности (28 суток), образцы-кубы пронумерованы, обмерены и взвешены. Линейных отклонений образцов от нормативных размеров $40\times 10\times 10$ см не выявлено, т.е. все призмы имеют объем 4 дм^3 . Результаты измерения массы и плотности приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Результаты измерения массы и плотности образцов

№ образца	Масса, г	Плотность, г/см ³
1	9108	2.277
2	9105	2.276
3	9110	2.278
	сред. знач.	2.277

Максимальное отклонения образцов по массе (минимальное значение 2276 г, максимальное значение 2278 г) составляет 2 г, что отвечает требованиям ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия». Средняя плотность образцов составляет $2,277\text{ г/см}^3$.

3.2.3 Испытания образцов-призм

При проведении испытаний использовано следующие приборы и средства измерений:

- 1) пресс гидравлический ПСУ-250 по шкале 120 т (точность приложения нагрузки 200 кг);
- 2) весы электронные AD-10Н (точность измерения 1 г);
- 3) индикаторы часового типа ИЧ-10 с ходом поршня 10 мм (точность измерения 0,01 мм).

Обработка результатов испытаний выполняется в соответствии с ГОСТ [10] Глава 5. При обработке результатов, фиктивные деформации, согласно ф.1 и ф.2 ГОСТ [10] приведены к фактическим деформациям по крайним волокнам граней призм.

При выдерживании призм в агрессивной среде наблюдается возникновение повреждений, соответствующих образцам-кубам в аналогичные периоды воздействия.

Результаты испытаний образца-призмы
без агрессивного воздействия

Значения фиктивных деформаций, зафиксированные в ходе проведения эксперимента, сведены в таблицу 3.13, по четырем граням. Фиктивные деформации приведены к фактическим деформациям по крайнему волокну граней образцов-призм в таблице 3.14.

Фактическая разрушающая нагрузка при испытаниях образца-призмы составила 30,0 т.

Фрагменты испытаний приведены на рисунках В.5-В.6.

Таблица 3.13 – Фиктивные деформации по граням призмы

Степень нагружения, т	Фиктивные деформации по граням, 10^{-2} мм			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00
4.0	3.00	3.00	3.00	3.00
4.0	3.00	3.00	3.00	3.00
6.0	4.00	4.00	4.00	5.00
6.0	4.00	4.00	4.00	5.00
8.0	5.00	5.00	6.00	5.00
8.0	5.00	5.00	6.00	5.00
10.0	6.00	6.00	6.00	6.00
10.0	6.00	6.00	6.00	6.00
12.0	7.00	8.00	8.00	7.00
12.0	7.00	8.00	8.00	7.00
14.0	8.00	10.00	11.00	8.00
14.0	8.00	10.00	11.00	8.00
16.0	9.00	12.00	12.00	9.00
16.0	10.00	12.00	13.00	10.00
18.0	11.00	14.00	14.00	10.00
18.0	11.00	14.00	14.00	10.00
20.0	12.00	15.00	15.00	11.00
20.0	13.00	16.00	16.00	12.00
22.0	14.00	18.00	17.00	13.00

Продолжение таблицы 3.13

1	2	3	4	5
22.0	15.00	19.00	18.00	14.00
24.0	17.00	20.00	19.00	15.00
24.0	17.00	20.00	20.00	16.00
26.0	20.00	24.00	24.00	20.00
26.0	20.00	20.00	25.00	21.00
28.0	24.00	26.00	26.00	22.00
28.0	25.00	28.00	28.00	23.00
30.0	27.00	30.00	30.00	24.00
30.0	31.00	33.00	34.00	28.00

Таблица 3.14 – Фактические деформации по граням призмы

Степень нагружения, т	Фактические деформации по граням, 10^{-2} мм			
	1	2	3	4
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00
4.0	3.00	3.00	3.00	3.00
4.0	3.00	3.00	3.00	3.00
6.0	4.00	4.19	4.00	4.81
6.0	4.00	4.19	4.00	4.81
8.0	5.19	5.00	5.81	5.00
8.0	5.19	5.00	5.81	5.00
10.0	6.00	6.00	6.00	6.00
10.0	6.00	6.00	6.00	6.00
12.0	7.19	7.81	7.81	7.19
12.0	7.19	7.81	7.81	7.19
14.0	8.56	9.63	10.44	8.38
14.0	8.56	9.63	10.44	8.38
16.0	9.56	11.44	11.44	9.56
16.0	10.56	11.63	12.44	10.38
18.0	11.56	13.25	13.44	10.75
18.0	11.56	13.25	13.44	10.75
20.0	12.56	14.25	14.44	11.75
20.0	13.56	15.25	15.44	12.75
22.0	14.56	17.06	16.44	13.94
22.0	15.56	18.06	17.44	14.94
24.0	17.38	19.06	18.63	15.94
24.0	17.56	19.25	19.44	16.75
26.0	20.75	23.25	23.25	20.75
26.0	20.94	20.19	24.06	20.81
28.0	24.38	25.25	25.63	22.75
28.0	25.56	27.06	27.44	23.94
30.0	27.56	28.88	29.44	25.13
30.0	31.56	32.06	33.44	28.94

Призменная прочность бетона определена по формуле 3.2:

$$R = \frac{P_p}{A}, \quad (3.2)$$

где P_p - фактическая разрушающая нагрузка, полученная при испытаниях образца-призмы, кг;

A – площадь поперечного сечения образца-призмы, равная 100 см^2 .

$$R = \frac{30000}{100} = 300, \text{ кг/см}^2,$$

указанная призменная прочность принята за базовую при расчете снижения прочности по образцам, подвергнутым агрессивному воздействию водного раствора хлорида кальция.

Таблица 3.15 – Определение призменной прочности бетона

№ образца	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²
3	9110	2.278	30000	300

Предельные относительные деформации $\varepsilon = 158 \cdot 10^{-5}$.

Относительные деформации ε_1 при уровне 30% от P_p составляют 0,00028.

Модуль деформации определим по формуле 3.3:

$$E = \frac{0.3P_p}{\varepsilon_1}, \quad (3.3)$$

где P_p – то же, что и в ф. 3.2;

ε_1 – относительные деформации бетона при уровне нагружения 30% от фактической разрушающей нагрузки.

$$E = \frac{0.3P_p}{\varepsilon_1} = \frac{0.3 \cdot 30}{0.00026} = 34283.70, \text{ МПа.}$$

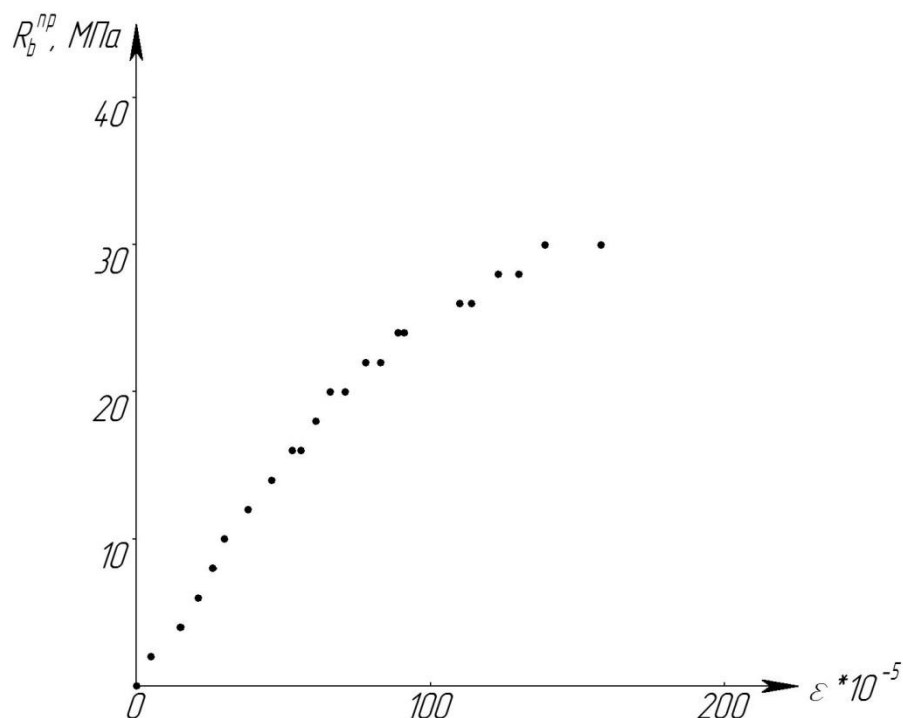


Рисунок 3.5 – Диаграмма сжатия бетона

Результаты испытаний образца-призмы (4 цикла)

Значения фиктивных деформаций, зафиксированные в ходе проведения эксперимента, сведены в таблицу 3.16, по четырем граням. Фиктивные деформации приведены к фактическим деформациям по крайнему волокну граней образцов-призм в таблице 3.17.

Фактическая разрушающая нагрузка при испытаниях образца-призмы составила 28,0 т.

Фрагменты испытаний приведены на рисунках В.7-В.9.

Таблица 3.16 – Фиктивные деформации по граням призмы

Степень нагружения, т	Фиктивные деформации по граням, 10^{-2} мм			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	1.00	1.00
4.0	1.00	1.00	2.00	2.00
4.0	2.00	2.00	2.00	2.00
6.0	3.00	3.00	3.00	3.00
6.0	3.00	3.00	3.00	3.00
8.0	4.00	4.00	4.00	4.00

Продолжение таблицы 3.16

1	2	3	4	5
8.0	5.00	5.00	4.00	4.00
10.0	6.00	6.00	5.00	5.00
10.0	7.00	6.00	5.00	6.00
12.0	8.00	7.00	6.00	7.00
12.0	8.00	7.00	6.00	7.00
14.0	9.00	8.00	8.00	7.00
14.0	10.00	10.00	8.00	8.00
16.0	11.00	10.00	10.00	10.00
16.0	10.00	10.00	10.00	10.00
18.0	12.00	12.00	11.00	11.00
18.0	12.00	13.00	11.00	11.00
20.0	13.00	13.00	13.00	13.00
20.0	13.00	14.00	13.00	13.00
22.0	16.00	16.00	14.00	14.00
22.0	16.00	17.00	15.00	16.00
24.0	18.00	18.00	16.00	16.00
24.0	19.00	18.00	17.00	17.00
26.0	20.00	20.00	19.00	18.00
26.0	21.00	21.00	20.00	20.00
28.0	23.00	23.00	22.00	22.00
28.0	26.00	25.00	25.00	25.00

Таблица 3.17 – Фактические деформации по граням призмы

Степень нагружения, т	Фактические деформации по граням, 10^{-2} мм			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.19	0.19	0.81	0.81
4.0	1.19	1.19	1.81	1.81
4.0	2.00	2.00	2.00	2.00
6.0	3.00	3.00	3.00	3.00
6.0	3.00	3.00	3.00	3.00
8.0	4.00	4.00	4.00	4.00
8.0	4.81	4.81	4.19	4.19
10.0	5.81	5.81	5.19	5.19
10.0	6.63	6.00	5.38	6.00
12.0	7.63	7.00	6.38	7.00
12.0	7.63	7.00	6.38	7.00
14.0	8.81	7.81	8.19	7.19
14.0	9.63	9.63	8.38	8.38
16.0	10.81	10.00	10.19	10.00
16.0	10.00	10.00	10.00	10.00

Продолжение таблицы 3.17

1	2	3	4	5
18.0	11.81	11.81	11.19	11.19
18.0	11.81	12.63	11.19	11.38
20.0	13.00	13.00	13.00	13.00
20.0	13.00	13.81	13.00	13.19
22.0	15.63	15.63	14.38	14.38
22.0	15.81	16.81	15.19	16.19
24.0	17.63	17.63	16.38	16.38
24.0	18.63	17.81	17.38	17.19
26.0	19.81	19.63	19.19	18.38
26.0	20.81	20.81	20.19	20.19
28.0	22.81	22.81	22.19	22.19
28.0	25.81	25.00	25.19	25.00

Призменная прочность бетона определена по формуле 3.2:

$$R = \frac{28000}{100} = 280, \text{ кг/см}^2.$$

Таблица 3.18 – Определение призменной прочности бетона

№ образца	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²
1	9108	2.277	28000	280

Снижение призменной прочности составляет 6,67%.

Предельные относительные деформации $\varepsilon = 126 \cdot 10^{-5}$.

Снижение предельных относительных деформаций составляет 20,25%

Относительные деформации ε_1 при уровне 30% от P_p составляют 0,00023.

Модуль деформации определим по формуле 3.3:

$$E = \frac{0.3P_p}{\varepsilon_1} = \frac{0.3 \cdot 28}{0.00023} = 37327.11, \text{ МПа}$$

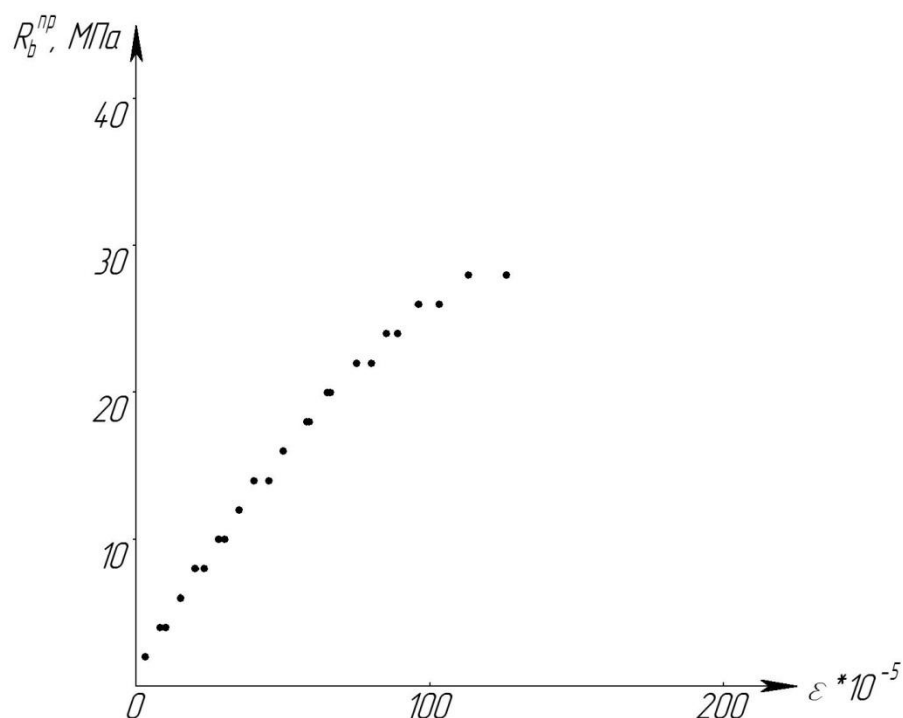


Рисунок 3.6 – Диаграмма сжатия бетона

Результаты испытаний образца-призмы (8 циклов)

Значения фиктивных деформаций, зафиксированные в ходе проведения эксперимента, сведены в таблицу 3.19, по четырем граням. Фиктивные деформации приведены к фактическим деформациям по крайнему волокну граней образцов-призм в таблице 3.20.

Фактическая разрушающая нагрузка при испытаниях образца-призмы составила 20,0 т.

Фрагменты испытаний приведены на рисунках В.10-В.11.

Таблица 3.19 – Фиктивные деформации по граням призмы

Степень нагружения, т	Фиктивные деформации по граням, 10^{-2} мм			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00
4.0	2.00	3.00	3.00	2.00
4.0	2.00	3.00	3.00	2.00
6.0	3.00	4.00	4.00	3.00
6.0	3.50	4.00	4.00	3.00

Продолжение таблицы 3.19

1	2	3	4	5
8.0	4.50	6.00	6.00	4.00
8.0	5.00	6.00	6.00	4.50
10.0	6.00	8.00	8.00	5.50
10.0	6.00	8.00	8.00	6.00
12.0	7.00	9.00	9.00	7.00
12.0	7.00	10.00	10.00	7.00
14.0	8.00	11.00	11.00	8.00
14.0	8.00	11.00	11.00	8.00
16.0	9.00	13.00	13.00	9.00
16.0	10.00	14.00	14.00	10.00
18.0	11.00	15.00	15.00	11.00
18.0	11.00	15.00	16.00	11.00
20.0	12.00	17.00	18.00	13.00

Таблица 3.20 – Фактические деформации по граням призмы

Ступень нагружения, т	Фактические деформации по граням, 10^{-2} мм			
	1	2	3	4
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00
4.0	2.18	2.82	2.82	2.18
4.0	2.18	2.82	2.82	2.18
6.0	3.18	3.82	3.82	3.18
6.0	3.59	3.82	3.91	3.18
8.0	4.78	5.63	5.72	4.37
8.0	5.18	5.72	5.82	4.78
10.0	6.37	7.54	7.63	5.96
10.0	6.37	7.63	7.63	6.37
12.0	7.37	8.63	8.63	7.37
12.0	7.55	9.45	9.45	7.55
14.0	8.55	10.45	10.45	8.55
14.0	8.55	10.45	10.45	8.55
16.0	9.73	12.27	12.27	9.73
16.0	10.73	13.27	13.27	10.73
18.0	11.73	14.27	14.27	11.73
18.0	11.92	14.27	15.08	11.73
20.0	13.10	16.27	16.90	13.73

Призменная прочность бетона определена по формуле 3.2:

$$R = \frac{20000}{100} = 200, \text{ кг/см}^2.$$

Таблица 3.21 – Определение призмной прочности бетона

№ образца	Масса, г	Плотность, г/см ³	Разрушающая нагрузка, кг	Прочность бетона, кг/см ²
2	9105	2.276	20000	200

Снижение призмной прочности составляет 33,33%.

Предельные относительные деформации $\varepsilon = 75 \cdot 10^{-5}$.

Снижение предельных относительных деформаций составляет 52,53%.

Относительные деформации ε_1 при уровне 30% от P_p составляют 0,00018.

Модуль деформации определим по формуле (см. ф. 3.2):

$$E = \frac{0.3P_p}{\varepsilon_1} = \frac{0.3 \cdot 20}{0.00018} = 33103.45, \text{ МПа}$$

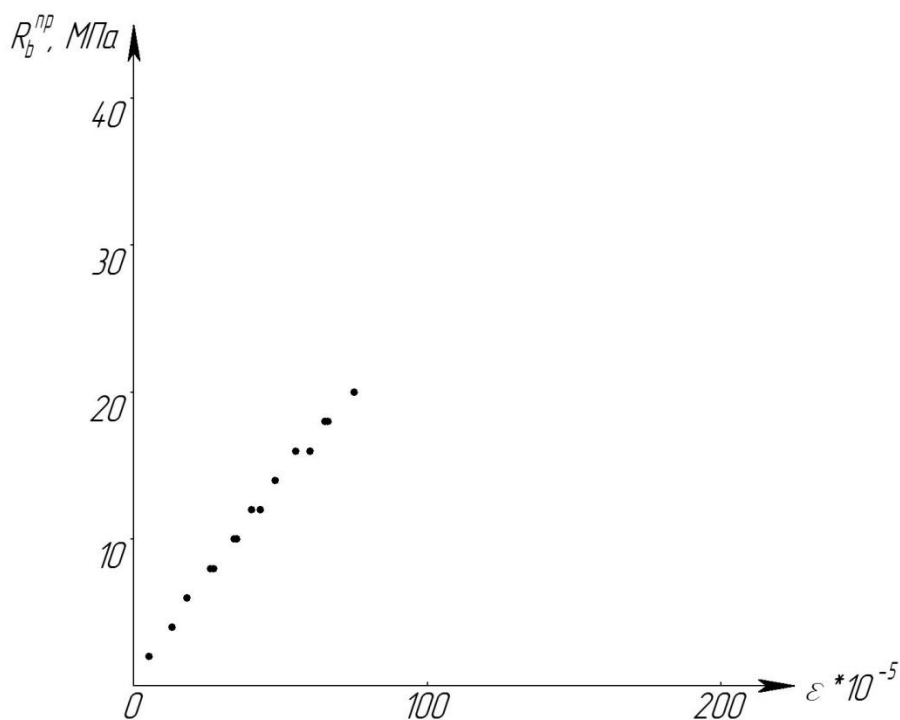


Рисунок 3.7 – Диаграмма сжатия бетона

3.2.4 Обработка результатов испытаний образцов-призм

На основании результатов испытаний образцов-призм построены графики:

1. снижение призмочной прочности – количество циклов (Рис. 3.8);
2. изменение модуля деформаций – количество циклов (Рис. 3.9);
3. наложение диаграмм сжатия бетона (Рис. 3.10);
4. снижение предельных относительных деформаций – количество циклов (Рис. 3.11).

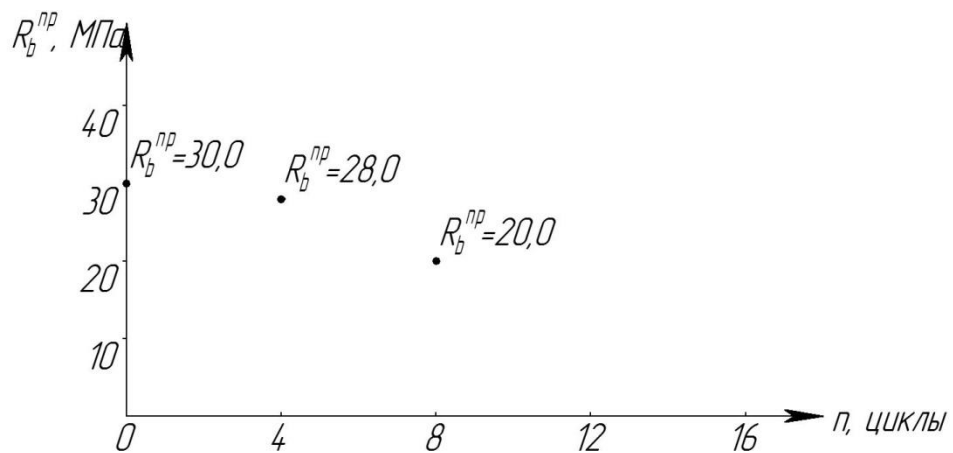


Рисунок 3.8 - Изменение призмочной прочности бетона в зависимости от циклов агрессивного воздействия

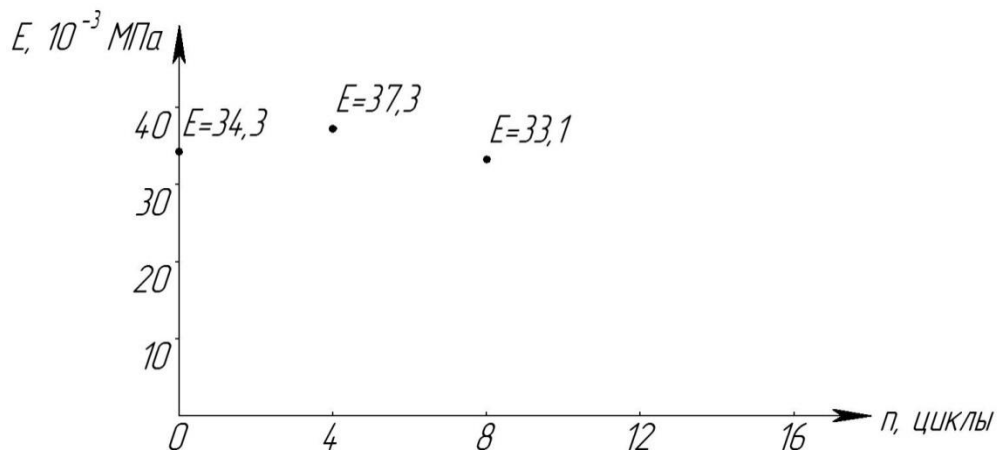


Рисунок 3.9 – Изменение модуля деформаций бетона в зависимости от циклов агрессивного воздействия

Увеличение значения модуля деформаций бетона образца-призмы после 4-ех циклов агрессивного воздействия можно объяснить увеличени-

ем плотности образца ввиду накопления продуктов химических реакций водного раствора хлорида кальция с цементным камнем и их кристаллизацией.

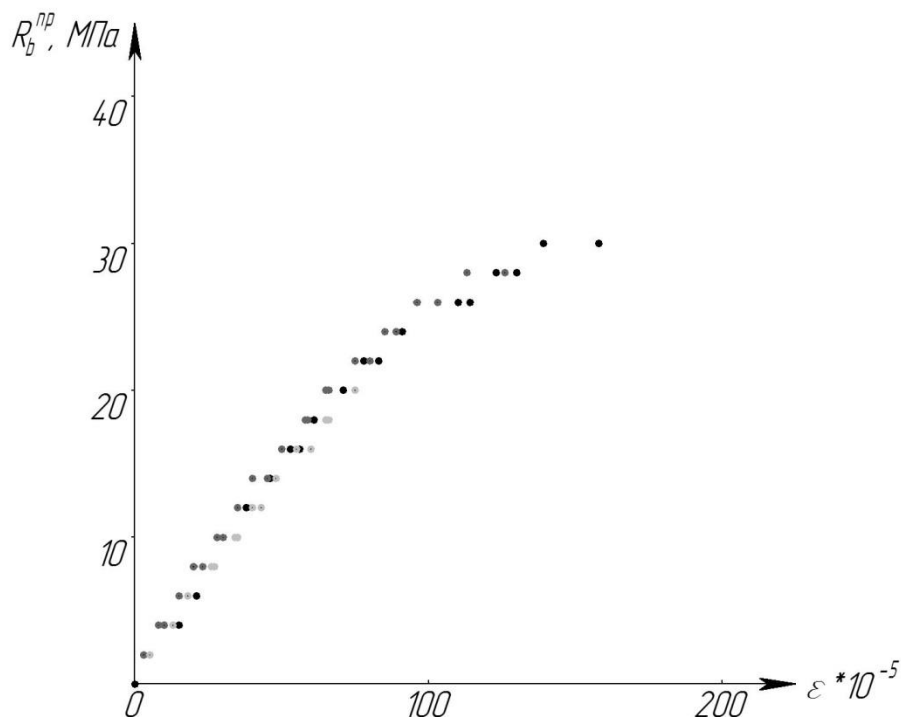


Рисунок 3.10 – Сравнение диаграмм сжатия бетона для образцов-призм

3.3 Выводы по разделу 3

При обработке результатов испытаний в объеме Главы 3 сделаны следующие выводы.

Испытаниями установлено появление и развитие трещин на всех кубах из групп 1-4 вблизи пересечения граней перед началом 3-го цикла испытаний образцов-кубов. При воздействии циклов замачивания-высушивания водного раствора хлорида кальция наблюдается деструкция цементного камня, выражающаяся в частичном оголении крупного заполнителя, местное разрушение крупного заполнителя (щебень карбонатных пород) в зоне коррозии бетона.

Снижение прочности бетона по образцам-кубам достигло 27,09% на 4-ом цикле испытаний, 41,52% - на 8-ом цикле и 40% на 12-ом цикле испытаний. На 14-ом цикле испытываемые образцы-кубы разрушились.

Таблица 3.22 – Изменение механических характеристик бетона при воздействии водного раствора хлорида кальция

Кол-во циклов	Признаки разрушения	Снижение кубиковой прочности	Снижение призмной прочности бетона	Изменение модуля деформаций бетона	Снижение предельных относительных деформаций
0	Повреждения отсутствуют	0%	0%	0%	0
4	Раскрытие трещин до 0,1 мм	27,09%	6,67%	+8,75%	20,25%
8	Раскрытие трещин от 0,2 мм до 0,8 мм. Появление искривлений по граням элементов с увеличением объема у пересечений граней. Выветривание компонентов цементного камня, слабое обнажение крупного заполнителя	40%	33,33%	-3,50%	52,53%
12	Раскрытие трещин до 2,0 мм. Явное искривление по граням элементов с увеличением объема у пересечений граней. Выветривание компонентов цементного камня, обнажение крупного заполнителя. Поверхностное разрушение крупного заполнителя из щебня карбонатных пород	40%	-	-	-

На образцах-кубах из групп 5 и 6, замоченных в дистиллированной воде, повреждения отсутствуют; по указанным образцам установлено увеличение кубиковой прочности бетона до 6%.

На образцах, сохранных после 14-ти циклов испытаний, отмечается дальнейшее развитие процессов коррозии, выражающееся в увеличении объемов образцов и увеличении ширины раскрытия трещин, образовавшихся при химических реакциях и кристаллизации продуктов реакций.

По образцам-призмам отмечено снижение призмной прочности бетона до 6,67% на 4-ом цикле испытаний и на 33,33% на 8-ом цикле.

Модуль деформаций бетона возрастает на 8,75% на 4-ом цикле испытаний и снижается на 3,50% на 8-ом цикле.

По образцам-призмам наблюдается явление ползучести начиная с третьей ступени нагружения (6 т), по образцу-призме без агрессивного воздействия явления ползучести проявляются с девятой ступени нагружения (18 т).

По результатам исследований составлена таблица 3.22, характеризующая изменение механических характеристик бетона, в зависимости от циклов воздействия. Цикличность воздействия можно определить визуально с применением средств измерений по признакам разрушения конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено негативное воздействие водного раствора хлорида кальция на бетон железобетонных конструкций, в дальнейшем приводящее к его разрушению. Длительное воздействие агрессивной среды выражается в снижении прочностных и деформативных характеристик бетона, деструкции цементного камня, коррозии цементного камня с увеличением объема, образовании трещин в элементах, усиленной коррозии арматуры, коррозии и деструкции крупного заполнителя карбонатных пород.

Исследования показали резкое снижение прочности бетона при увеличении циклов воздействия водного раствора хлорида кальция.

По итогам работы составлено соотношение визуальных признаков повреждений бетона с количеством циклов экспериментального воздействия водного раствора хлорида кальция и изменением прочностных и деформативных характеристик бетона в табличной форме.

Усиление железобетонных конструкций возможно при наличии повреждений, соответствующих количеству циклов до 4-х включительно. При указанных повреждениях по конструкциям необходимо выполнить защитное покрытие, препятствующее проникновению воздуха к конструкции.

Наличие признаков деструкции бетона железобетонных конструкций, соответствующих 4-м и более циклам воздействия, усиление конструкций возможно только путем устройства дополнительных элементов, воспринимающих полную нагрузку, передаваемую на данные элементы и их собственный вес.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (ред.): Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ // Собрание законодательства. – 2009. – №384-ФЗ.
2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Общие положения; введ. с 01.07.2015 – Москва: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
3. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния; введ. с 01.01.2014 – Москва: Стандартинформ, 2014. – 59 с.
4. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Взамен ГОСТ 25192-82; введ. с 01.07.2013 – Москва: Стандартинформ, 2013. – 10 с.
5. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава; введ. с 01.01.1987 – Москва: Стандартинформ, 2006 – 7 с.
6. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Взамен ГОСТ 26633-2012; введ. с 01.09.2016 – Москва: Стандартинформ, 2017. – 15 с.
7. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – Взамен ГОСТ 7473-94; введ. с 01.01.2012 – Москва: Стандартинформ, 2018. – 23 с.
8. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – Взамен ГОСТ Р 53231-2008, ГОСТ 18105-86; введ. с 01.09.2012 – Москва: Стандартинформ, 2012. – 15 с.
9. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Взамен ГОСТ 10180-90; введ. с 01.07.2013 – Москва: Стандартинформ, 2016. – 36 с.;

10. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона; введ. с 01.01.1982 г. – Москва: Издательство стандартов, 1980 г. – 14 с.
11. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. – Взамен ГОСТ 10060.0-95, ГОСТ 10060.1-95, ГОСТ 10060.2-95, ГОСТ 10060.3-95, ГОСТ 10060.4-95; введ. с 01.01.2014 – Москва: Стандартинформ, 2018. – 23 с.
12. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – Взамен ГОСТ 22690-2008; введ. с 01.04.2016. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
13. ГОСТ 22904-93. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры. – Взамен ГОСТ 22904-78; введ. с 01.01.1995 г. – Москва: Издательство стандартов, 1994. – 18 с.
14. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – Взамен ГОСТ 31384-2008; введ. с 01.03.2018 г. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 53 с.
15. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия (с Изменениями №1, 2, 3, 4, 5). – Взамен ГОСТ 22690-2008; введ. с 01.04.2016 – Москва: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
16. Строительные правила: СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений: нормативно-технический материал. – Москва: Госстрой России, 2013. – 31 с.
17. Строительные правила: СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: нормативно-технический материал. – Москва: Минрегион России, 2011. – 104 с.
18. Строительные правила: СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция

- СНиП 52-01-2003 (с Изменениями №1 и 2): нормативно-технический материал. – Москва: Минрегион России, 2012. – 152 с.
19. Строительные правила: СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-85 (с Изменением №1): нормативно-технический материал. – Москва: Минрегион России, 2012. – 293 с.
 20. Строительные правила: СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями №1 и 2): нормативно-технический материал. – Москва: Минрегион России, 2012. – 99 с.
 21. Строительные правила: СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования: нормативно-технический материал. – Москва: Минстрой России, 2014. – 76 с.
 22. Строительные правила: СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с Изменениями №1 и 2): нормативно-технический материал. – Москва: Минрегион России, 2012. – 113 с.
 23. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов / В.Н. Сигалов, Э.Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с., илл.
 24. Лужин, О.В. Обследование и испытание сооружений: Учеб. для вузов / О.В. Лужин, А.Б. Злочевский, И.А. Горбунов и др.; под. ред. О.В. Лужина. – Москва: Стройиздат, 1987. – 263 с., илл.
 25. Землянский, А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений: Учебное пособие / А.А. Землянский. – Москва: АСВ, 2004. – 240 с., с илл.

26. Калинин, В.М. Обследование и испытание конструкций зданий и сооружений: Учебник / В.М. Калинин. С.Д. Сокова, А.Н. Топилин. – Москва: ИНФРА-М, 2011. – 336 с.
27. Калинин, В.М. Оценка технического состояния зданий: Учебник / В.М. Калинин, С.Д. Сокова. – Москва: ИНФРА-М, 2010. – 268 с.;– 268 с.
28. Руфферт, Г. Дефекты бетонных конструкций / Г. Руфферт; пер. с нем. И.Г. Зеленцова, под ред. В.Б. Семенова. – Москва: Стройиздат, 1987. – 111 с.
29. ИИ22-1. Железобетонные колонны. Высота этажей 3,6 м: типовые конструкции многоэтажных промышленных зданий – Москва: ЦНИИПромзданий, 1964.
30. ИИ22-2. Железобетонные колонны. Высота этажей 4,8 м и 6,0 м: типовые конструкции многоэтажных промышленных зданий – Москва: ЦНИИПромзданий, 1964.
31. Серия ИИ23-1. Железобетонные ригели пролетом 6 м с полками для опирания плит: типовые конструкции многоэтажных промышленных зданий – Москва: ЦНИИПромзданий, 1964.
32. Серия ИИ24-1. Железобетонные плиты для перекрытий типа I, с опиранием на полки ригелей: типовые конструкции многоэтажных промышленных зданий – Москва: ЦНИИПромзданий, 1964.
33. Smith, J.L. Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new constructions / J.L. Smith, Y.P. Virmani. – Springfield, Virginia 22161: The National Technical Information Service, 2000. – p. 82.
34. Neville, Adam. Chloride attack of reinforced concrete: an overview / Adam Neville // Materials and Structures. – 1995. – 28. – pp. 63-70;
35. Erlin, Bernard. The role of calcium chloride in concrete / Bernard Erlin, William G. Hime. – 1976.

36. Quraishi, MA. Corrosion of reinforced steel in concrete and its control: an overview / MA Quraishi, DK Nayak, R Kumar, V Kumar // Journal of steel structures & construction. – 2017. – 3.1.
37. Verma, Sanjeev Kumar. Monitoring corrosion of steel bars in reinforced concrete structures / Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singht Bhadauria, Saleem Akhtar // Hindawi Publishing Corporation The Scientific World Journal. – 2014.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Обследование объекта



Рисунок А.1 – Технологические емкости объемом 20,0 м³ на отм. +4.200



Рисунок А.2 – Выпирание плитки пола на отм. +4.200



Рисунок А.3 – Узел передачи нагрузки со стальной рамы на плиты перекрытия в осях «25-26»



Рисунок А.4 – Деформационный шов по стальной опорной раме по оси «28»



Рисунок А.5 – Коррозия арматуры. Разрушение защитного слоя бетона плит перекрытия на отм. +3.300



Рисунок А.6 – Разрушение защитного слоя ребер плит перекрытия на отм. +3.300. Коррозия арматуры плитной части



Рисунок А.7 – Разрушение защитного слоя бетона плиты перекрытия в опорной зоне



Рисунок А.8 – Разрушение защитного слоя бетона плиты перекрытия в опорной зоне



Рисунок А.9 – Коррозия ригеля в осях «У-Ф/26». Деструкция цементного камня. Обнажение крупного заполнителя



Рисунок А.10 – Коррозия ригеля и закладных деталей



Рисунок А.11 – Коррозия колонны в осях «Ф/26». Разрушение защитного слоя бетона

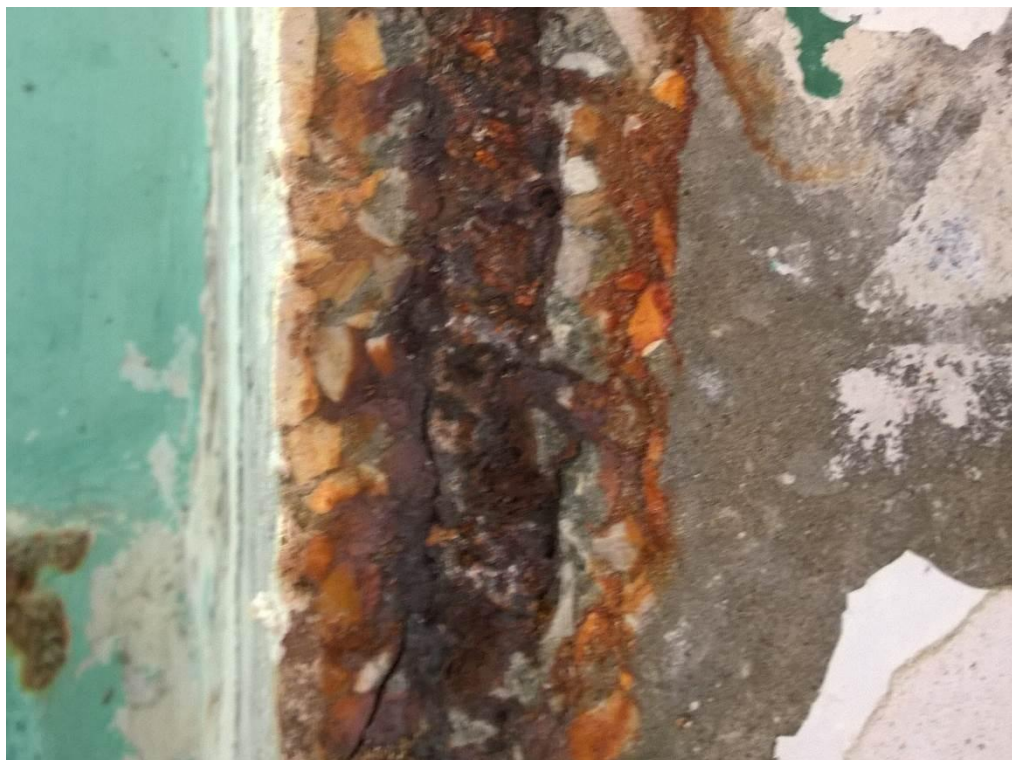


Рисунок А.12 – Коррозия рабочей арматуры колонны в осях «Ф/26»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Испытания образцов-кубов



Рисунок Б.1 – Образцы-кубы



Рисунок Б.2 – Выдерживание образцов-кубов в агрессивной среде



Рисунок Б.3 – Высушивание образцов-кубов после замачивания



Рисунок Б.4 – Осмотр образцов-кубов после высушивания

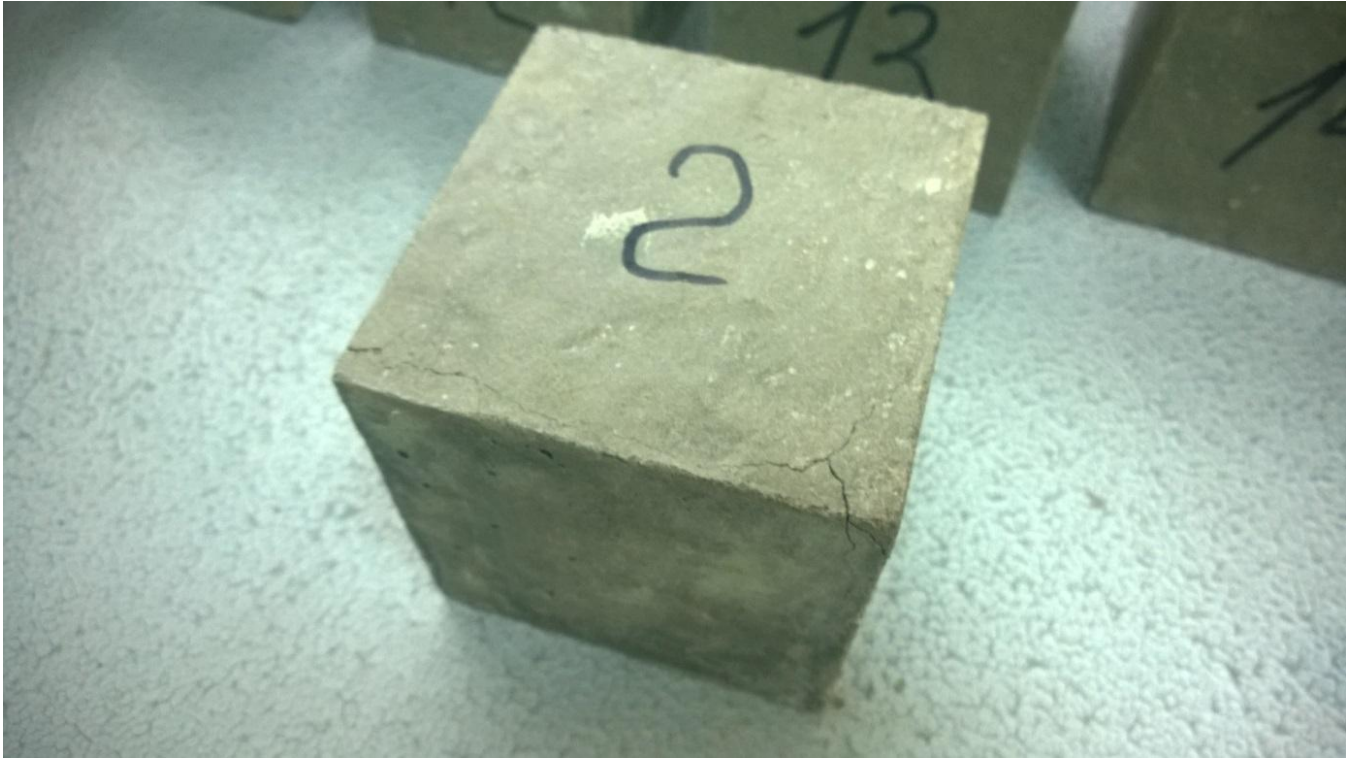


Рисунок Б.5 – Образование повреждений по образцам-кубам



Рисунок Б.6 – Образование повреждений по образцам-кубам



Рисунок Б.7 – Образование повреждений по образцам-кубам



Рисунок Б.8 – Кристаллизация продуктов коррозии



Рисунок Б.9 – Образование повреждений по образцам-кубам после 11 циклов



Рисунок Б.10 – Разрушение образца-куба после 14 циклов



Рисунок Б.11 – Разрушение образца-куба после 14 циклов



Рисунок Б.12 – Определение коррозии по образцам-кубам после 4 циклов



Рисунок Б.13 – Определение коррозии по образцам-кубам после 8 циклов



Рисунок Б.14 – Определение коррозии по образцам-кубам после 8 циклов



Рисунок Б.15 – Определение коррозии по образцам-кубам после 8 циклов



Рисунок Б.16 – Определение коррозии по образцам-кубам после 12 циклов

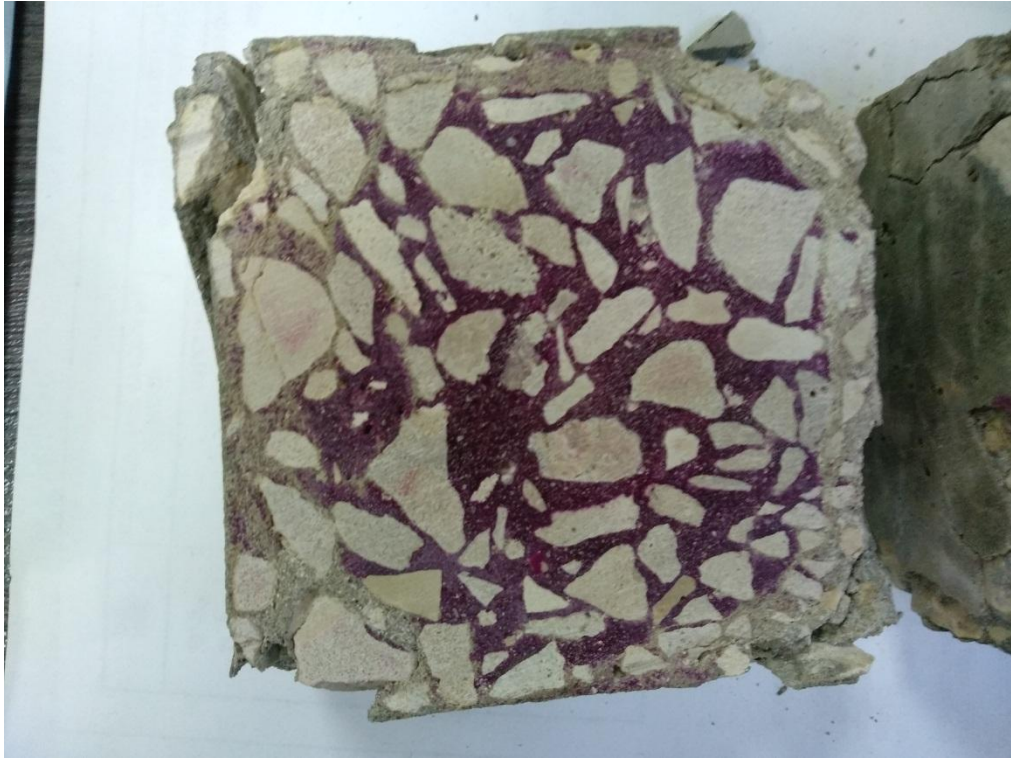


Рисунок Б.17 – Определение коррозии по образцам-кубам после 12 циклов



Рисунок Б.18 – Определение коррозии по образцам-кубам после 12 циклов



Рисунок Б.19 – Определение коррозии по образцам-кубам после 12 циклов

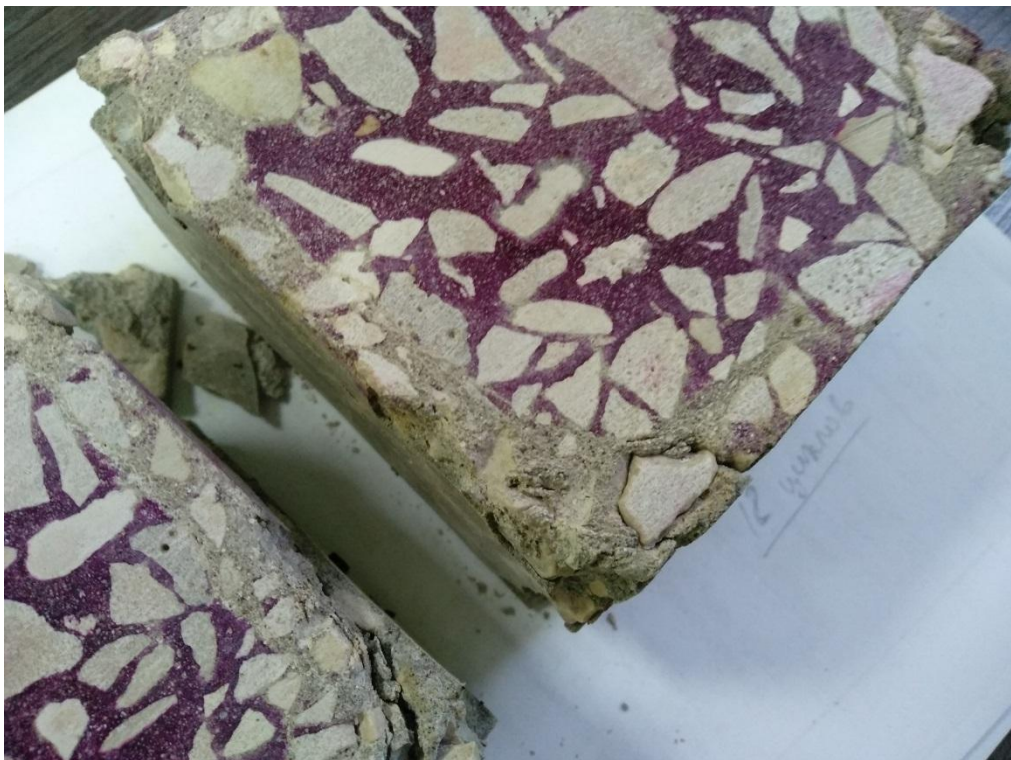


Рисунок Б.20 – Определение коррозии по образцам-кубам после 12 циклов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Испытания образцов-призм



Рисунок В.1 – Замачивание образцов-призм



Рисунок В.2 – Высушивание образцов-призм



Рисунок В.3 – Образование трещин на образцах-призмах



Рисунок В.4 – Образование дефектов на образцах-призмах



Рисунок В.5 – Испытание образца-призмы без агрессивного воздействия



Рисунок В.6 – Испытание образца-призмы без агрессивного воздействия



Рисунок В.7 – Испытание образца-призмы после 4 циклов воздействия



Рисунок В.8 – Испытание образца-призмы после 4 циклов воздействия



Рисунок В.9 – Испытание образца-призмы после 4 циклов воздействия



Рисунок В.10 – Испытание образца-призмы после 8 циклов воздействия



Рисунок В.11 – Испытание образца-призмы после 8 циклов воздействия