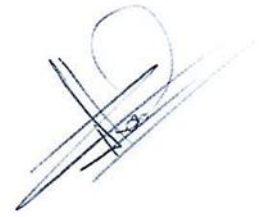


На правах рукописи



МИНАСЯН АРМАН АРАМАЙСОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ КОРРОЗИОННО-
ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ
ПЕРЕКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность: 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко» (АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко).

Научный руководитель: Доктор технических наук
Пятикрестовский Константин Пантелеевич

Официальные оппоненты: **Смоляго Геннадий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (НИУ «БелГУ»), профессор кафедры «Строительство и городское хозяйство»
Никитин Георгий Петрович
кандидат технических наук, доцент
АО «Казанский гипронеавиапром им. Б.И. Тихомирова» (АО «Казанский гипронеавиапром»), заместитель генерального директора – главный конструктор

Ведущая организация: АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений»
(АО ЦНИИПромзданий, г. Москва)

Защита состоится «16» февраля 2022 года в 11:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство» по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НИЦ «Строительство» и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В последние 10-15 лет продолжается реконструкция и завершение строительства объектов, возведение которых было остановлено в 90-е годы прошлого века. Почти все эти здания и сооружения не были законсервированы при остановке строительства, что привело к повреждениям конструкций, особенно плит перекрытия и покрытия, наиболее подвергающихся неблагоприятным внешним воздействиям в связи с попаданием на них атмосферных осадков, многоциклическим замораживанием и оттаиванием бетона, коррозией рабочей арматуры и образованием трещин в бетоне конструкций.

Задача определения остаточной несущей способности железобетонных конструкций, имеющих повреждения, является актуальной для экономии материалов при усилении и восстановлении плит перекрытия и покрытия реконструируемых зданий.

Степень разработанности темы

Экспериментальным и теоретическим исследованиям оценки несущей способности железобетонных конструкций, имеющих дефекты в виде повреждения бетона и коррозии арматуры, посвящено достаточно много работ российских и зарубежных ученых. Влияние повреждений конструкций на напряженно-деформированное состояние рассмотрено в основополагающих трудах В.Н. Байкова, О.Я. Берга, В.М. Бондаренко, А.А. Гвоздева, Г.А. Гениева, А.С. Залесова, Н.И. Карпенко, В. И. Колчунова, Т. А. Мухамедиева, А.Р. Ржаницына и др.

Дальнейшее развитие данной темы прослеживается в трудах известных ученых С.В. Босакова, Е.А. Гузеева, А.И. Звездова, Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, С.С. Каприелова, Э.Н. Кодыша, В. И. Колчунова, Вл. И. Колчунова, Корсуна В.И., С.Б. Крылова, Д. Р. Маиляна, А.Н. Мамина, С.И. Меркулова, В.М. Москвина, В.И. Морозова, В.И. Мурашева, Г. П. Никитина, К.А. Пирадова, К.П. Пятикрестовского, Н.К. Розенталя, А.Е. Саргсяна, В.П. Селяева, В.Ф. Степановой, И. Н. Серпик, Г.А. Смоляго, Б.С. Соколова, В.И. Римшина, А.Г. Тамразяна, И.Н. Тихонова, Н.Н. Трёкина, Н.В. Федоровой, В.С. Федорова и др.

Из зарубежных авторов следует отметить исследования A.W. Cordon, D.M. Farangpol, M. V. Roberts и др.

В отечественных строительных нормах приведены методы расчета сборных железобетонных конструкций без учета коррозионного повреждения в натуральных условиях.

При этом большая часть теоретических и практических исследований по данной теме основывается на решении актуальных вопросов первичной и вторичной защиты железобетонных конструкций от коррозии с целью

обеспечения длительной и без ремонтной их эксплуатации. Однако это не позволяет рационально решить вопрос ремонта конструкций, поврежденных коррозией и оценить их остаточную несущую способность.

Цель диссертационной работы: Определение остаточного ресурса коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытий на основе полученных данных натуральных наблюдений, экспериментальных исследований и совершенствование методики расчета несущей способности с использованием моделей напряжено-деформированного состояния (НДС) на конкретный период эксплуатации.

Цель работы определяет задачи исследований:

1. Систематизация коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытий в зависимости ширины раскрытия трещин, коррозии арматуры и состояния бетона конструкций.

2. Выявление характера влияния коррозионных повреждений арматуры на несущую способность и деформативность железобетонных плит перекрытий.

3. Определение величин предельных состояний и прогибов в зависимости от степени коррозионных повреждений арматуры.

4. Определение коэффициентов снижения прочности и модуля деформации бетона плит перекрытия в зависимости от продолжительности воздействий воздушно-влажной среды и НДС конструкций.

5. Определение остаточного ресурса несущей способности коррозионно-поврежденных плит с учетом трещинообразования.

6. Выполнение сопоставительного анализа данных натуральных испытаний, результатов диаграммного метода расчета и численного моделирования по оценке несущей способности и деформативности коррозионно-поврежденных плит.

Разработка предложений по уточнению метода расчёта НДС железобетонных плит перекрытий.

Объектом исследования являются сборные железобетонные многоярусные плиты перекрытий реконструируемых зданий, находившихся в открытой атмосфере города Москвы от 1 до 10 лет.

Научно-техническая гипотеза состоит в предположении наличия зависимости величины снижения несущей способности железобетонных плит перекрытий от степени коррозионных повреждений бетона и арматуры при воздействии на них воздушно-влажной среды и величины напряжённого состояния конструкций, что позволит уточнить остаточную несущую способность плит и выбрать рациональные способы ремонта.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Установлены коэффициенты снижения прочности и модуля деформаций бетона коррозионно-поврежденных плит в зависимости от ширины раскрытия

трещин, коррозионного повреждения арматуры при различной продолжительности воздействия воздушно-влажной среды и напряженно-деформированного состояния (НДС).

2. Разработан алгоритм расчета снижения прочностных и деформативных характеристик бетона коррозионно-поврежденных плит в зависимости от продолжительности воздействия воздушно-влажной среды и НДС.

3. Усовершенствована методика расчета остаточной несущей способности коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытий с учетом полученных данных натуральных наблюдений, экспериментальных исследований по изменению величины раскрытия трещин, коррозии арматуры и их влияния на деформативные характеристики бетона конструкций.

Теоретическая значимость работы:

1. Теоретически обоснована и практически подтверждена зависимость «напряжение-деформации» бетона, учитывающая продолжительность воздействия воздушно-влажной среды (открытой атмосферы).

2. Экспериментально получены зависимости «напряжение-деформация» поврежденной коррозией арматуры класса А400 и А600 на основе результатов испытаний образцов арматуры, отобранных из конструкций, реконструируемых зданий и теоретически обоснована их сходимость с основными положениями теории коррозии железобетонных конструкций.

Практическая значимость результатов исследования:

1. Разработана классификация коррозионно-поврежденных плит перекрытий реконструируемых зданий в зависимости от ширины раскрытия трещин и коррозии арматуры железобетонных конструкций.

2. Установлены зависимости «напряжения-деформация» бетона при сжатии и растяжении в зависимости от степени повреждения конструкций, а также арматуры (А400 и А600) при различной степени повреждения, что позволяет более точно определить остаточный ресурс несущей способности конструкций.

3. Установлена взаимосвязь глубины коррозионного повреждения арматуры от ширины раскрытия трещин в бетоне.

4. Разработан алгоритм для расчета остаточной несущей способности железобетонных плит перекрытий, имеющих коррозионные повреждения, позволяющий вводить необходимые данные с целью выбора метода ремонта, восстановления поврежденных конструкций и обеспечения надёжной работы здания в целом.

Методология и методы исследования

Используются экспериментальные и теоретические методы, разработанные отечественными и зарубежными учеными в области теории железобетонных конструкций, строительной механики, испытаний строительных конструкций.

Экспериментальные исследования проводились с использованием традиционных и современных методов и оборудования. При обработке экспериментальных данных применялись статистические методы обработки полученных результатов. Численное моделирование проводилось на основе метода конечных элементов.

При проведении экспериментов использовались методы, основанные на действующих нормативных документах, регламентирующих испытания железобетонных конструкций.

Личный вклад автора состоит в следующем:

- выполнение анализа отечественных и зарубежных исследований существующих методов расчета НДС железобетонных плит с учетом повреждения бетона и коррозии арматуры;
- постановка цели и задач исследования;
- анализ, систематизации данных натурных наблюдений и схем трещинообразования коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытий;
- подготовка и проведение серии экспериментальных исследований плит перекрытий с разными степенями коррозионных повреждений, а также испытание образцов бетона и арматуры, отобранных из конструкций, находящихся в открытой атмосфере;
- анализ полученных результатов исследований прочности и модуля деформаций бетона коррозионно-поврежденных плит в разные сроки воздействия на них воздушно-влажной среды и НДС конструкций;
- выполнение численного моделирования и аналитических расчетов плит перекрытий с разными степенями коррозионных повреждений бетона и арматуры с учетом полученных их прочностных и деформационных характеристик;
- проведение сопоставительного анализа данных натурных испытаний, результатов диаграммного метода расчета и численного моделирования по оценке несущей способности и деформативности коррозионно-поврежденных плит.

Положения, выносимые на защиту:

1. Классификация плит перекрытий реконструируемых зданий в зависимости от степени их повреждения (ширина раскрытия трещин, коррозия арматуры, прочность бетона)
2. Зависимости «напряжения-деформации» от степени коррозионного повреждения, полученные в результате испытаний образцов бетона и арматуры, отобранных из конструкций.
3. Определение коэффициентов снижения прочностных и деформативных характеристик конструкций в зонах сжатия и растяжения в разные сроки эксплуатации при НДС.
4. Методика расчета несущей способности коррозионно-поврежденных плит перекрытия с учётом прочности бетона при различной продолжительности воздействия воздушно-влажной среды и напряженного состояния.

Степень достоверности результатов исследований обеспечена соблюдением требований нормативных документов при подготовке и выполнении экспериментальных исследований, а также основана на сопоставительных анализах ранее выполненных работ НИИЖБ им. А.А. Гвоздева и ЦНИИСК им. В.

А. Кучеренко, а также фундаментальных работах В.М. Бондаренко, А.А. Гвоздева, Н.И. Карпенко, Т. А. Мухамедиева, В.И. Римшина, А.Р. Ржаницына и др.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях:

1. Международная конференция «Актуальные проблемы теории сооружений». ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (г. Москва, 2009);
2. III Международная научно-практическая конференция. Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. МГСУ (г. Москва, 2010);
3. Международная конференция, IPICSE-2018г. НИУ МГСУ (г. Москва, 2018);
4. «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения», КГУ (г. Курск, 2018);
5. I Научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и исследователей АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, 2019.

Внедрение результатов исследования

Результаты использованы в практике:

- при проведении работ по реконструкции БСА «Лужники» к Чемпионату мира по футболу 2018г.;
- при определении несущей способности плит перекрытий при обследовании Детских городских поликлиник №№52; 61; 118; 122 (1 и 2) и 143 (1 и 3) ГБУЗ ДЗ г. Москвы;
- при определении несущей способности плит перекрытий, повреждённых в натуральных климатических условиях, здания по адресу: г. Жуковский, ул. Гагарина, дом 3а.

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 12 научных работах по теме диссертации, из которых 7 статей входят в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК РФ, а также 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus. Общий объем публикации составляет 5,3 печатных листов, из них лично автором выполнены 3,8 печатных листов. Объем публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК, составляет 2,8 печатных листов, из них лично автором выполнены 2,1 печатных листов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы на 183 страницы, в том числе: 117 страниц текста, 79 рисунков, 28 таблиц. Список литературы содержит 164 наименования, из которых 28 иностранных.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, д. т. н. Пятикрестовскому К.П., а также д. т. н., проф. Тамразяну А.Г. и к. т. н. Пономареву О. И. за многостороннюю помощь при проведении экспериментальных и теоретических исследований. Кроме того, автор искренне благодарен д. т. н., проф. Федоровой Н.В. за ценные замечания.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, приведена общая характеристика работы и основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе приводится литературный обзор и анализ экспериментальных и теоретических исследований отечественных и зарубежных авторов по изучению работы железобетонных элементов при температурно-влажностных воздействиях. Основными причинами, вызывающими возникновение и развитие коррозии арматуры в бетоне, следует считать проницаемость бетона, изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре вследствие карбонизации бетона. Коррозионное повреждение арматурной стали приводит к негативным последствиям, в том числе: образованию трещин и разрушению защитного слоя бетона; увеличению деформативности и снижению несущей способности конструкций. Определение остаточного ресурса коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытий получившие повреждения при воздушно-влажностной атмосфере г. Москвы на конкретный период эксплуатации является актуальной для экономии материалов при ремонте.

Во второй главе описаны выбранные коррозионно-поврежденные железобетонные плиты перекрытий из объекта незавершенного строительства 34-х этажного здания. Данные плиты находились без консервации при воздействии воздушно-влажностной среды г. Москвы в течение 10 лет после остановки строительства. Перед началом исследования плит были определены характеристики бетона и сопоставлены с проектными значениями (табл. 1), далее на основании визуального и инструментального обследования проведена классификация железобетонных плит перекрытий в зависимости от характера и степени повреждения (рис. 1, табл. 2).

Таблица 1 – Среднее значение изменения R_b до и в момент обследования

	Проектное значение	t, годы			
		3	5	7	10
R_b , МПа	30	29,5	29,0	28,0	26,8

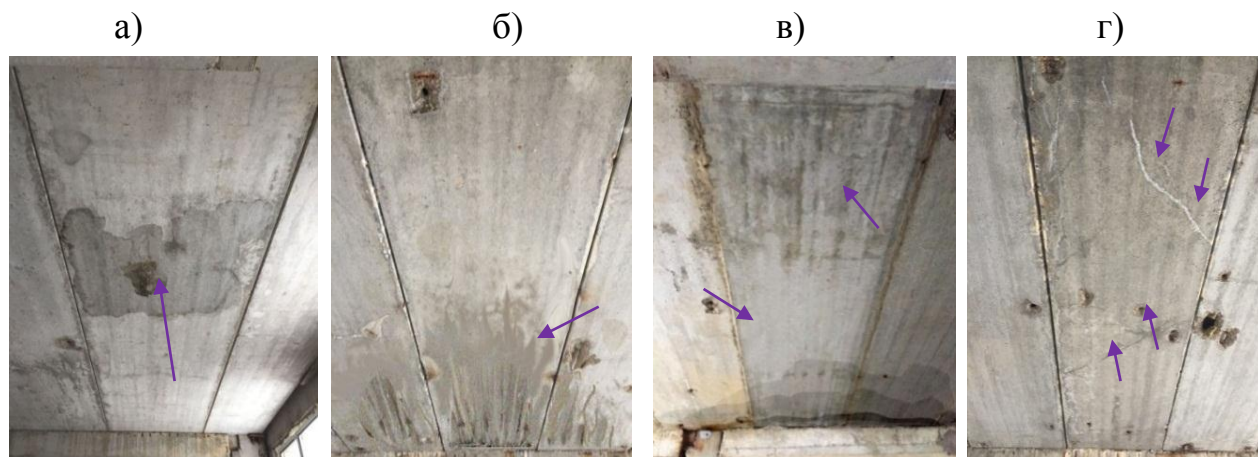



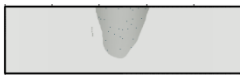





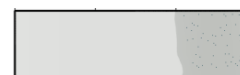

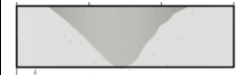














Рисунок 1 – Характер повреждения плит в соответствии с табл. 1, где а, б, в, г – степень повреждения плит перекрытия

Таблица 2 – Степени характерных коррозионных повреждений

1-я степень коррозионного повреждения					
1-я плита не имеет повреждений, считается базовой.					
2-я степень					
Степень повреждения	Вид сверху				
	Вид снизу				
	Степень	а)	б)	в)	г)
Характеристика повреждений	<p><u>Верхняя зона.</u> Повреждение защитного слоя бетона толщиной до 5мм в середине (а), по краю (б), по краям (в) или несимметричное по площади (г).</p> <p><u>Нижняя зона.</u> Повреждение защитного слоя бетона толщиной до 3мм, в середине (а), по краю (б), по краям (в) или несимметричное по площади (г).</p> <p>Ширина раскрытия трещин 0,2мм.</p>				
3-я степень					
Степень повреждения	Вид сверху				
	Вид снизу				
	Степень	а)	б)	в)	г)
Характеристика повреждений	<p><u>Верхняя зона.</u> Повреждение защитного слоя бетона поверхности толщиной до 15мм в середине (а), по краю (б), по краям (в) или несимметричное по площади (г).</p> <p><u>Нижняя зона.</u> Повреждение защитного слоя бетона поверхности толщиной до 10мм, в середине (а), по краю (б), по краям (в) или несимметричное по площади (г).</p> <p>Ширина раскрытия трещин 0,4мм.</p>				
4-я степень					
Степень повреждения	Вид сверху				
	Вид снизу				
	Степень	а)	б)	в)	г)
Характеристика повреждений	<p><u>Верхняя зона.</u> Повреждение защитного слоя бетона поверхности толщиной до 20мм в середине (а), по краю (б), по краям (в) или несимметричное по площади (г).</p> <p><u>Нижняя зона.</u> Повреждение защитного слоя бетона поверхности толщиной до 15мм, в середине (а), по краю (б), по краям (в) или несимметричное по площади (г).</p> <p>Ширина раскрытия трещин 0,8мм.</p>				

Рассмотрены два типа плит по морозостойкости (F_{150} и F_{200}) согласно проектным данным. В работе за количество циклов попеременного замораживания и оттаивания принято 70 циклов в году. Изменение прочностных и деформационных характеристик происходит во времени под влиянием климатических условий.

Для всех их степеней повреждения плит перекрытия (табл. 2) были выполнены испытания в 2-х вариантах: 1 – на контрольные нагрузки поэтапным нагружением плит, смонтированных внутри здания; 2 – поэтапным нагружением плит, установленных на испытательной площадке до полного разрушения.

Испытания плит

1-й этап. Нагружение конструкций проводилось равномерно. Шаг нагружения $0,25 \text{ кН/м}^2$.

2-й этап. Измерение прогибов конструкций проводилось после каждой стадии нагружения с помощью индикаторов часового типа и прогибомеров Максимова (с точностью $0,1 \text{ мм}$).

Вариант 1. Испытание на контрольные нагрузки. Вид здания и схема расположения испытываемых плит на типовом этаже приведены на рисунке 2. Фрагмент схемы испытания железобетонной плиты приведен на рисунке 3. Схема размещения измерительных приборов на рисунке 4.

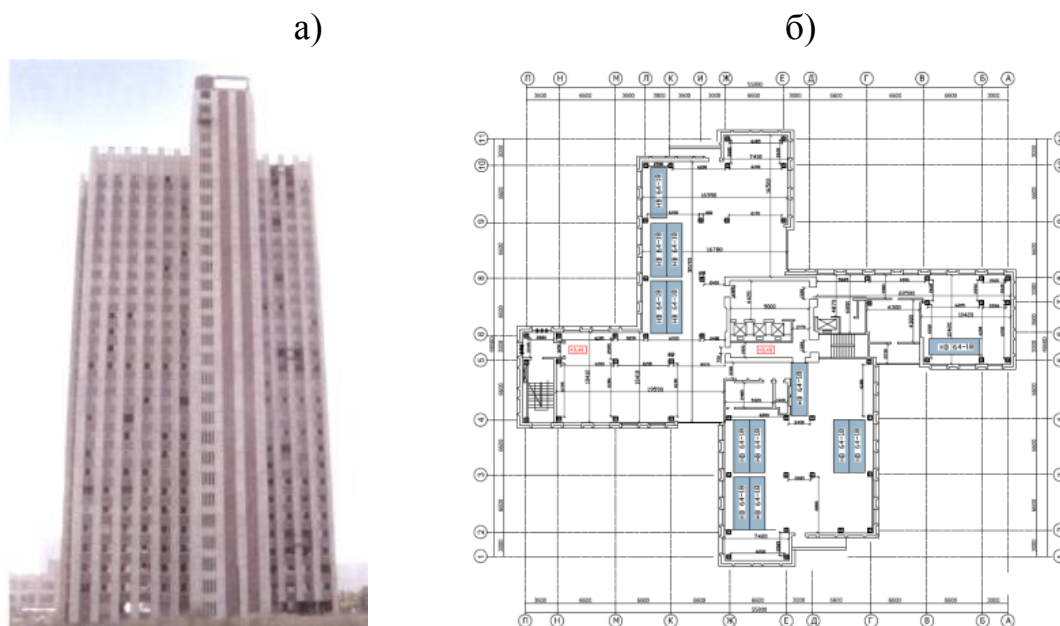


Рисунок 2 – Вид здания, плиты перекрытия которого испытаны (а), и схема расположения испытываемых плит на типовом этаже (б)



Рисунок 3 – Поэтапное нагружение (а, б); измерение прогибов плит (в)

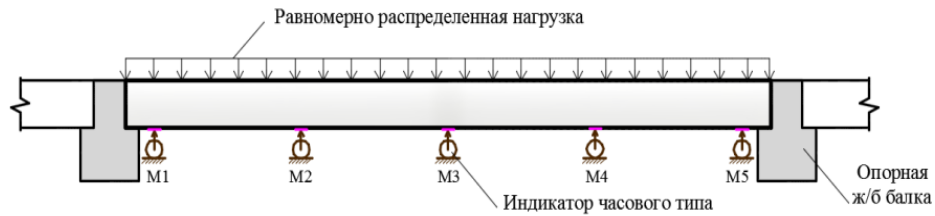


Рисунок 4 - Схема размещения измерительных приборов

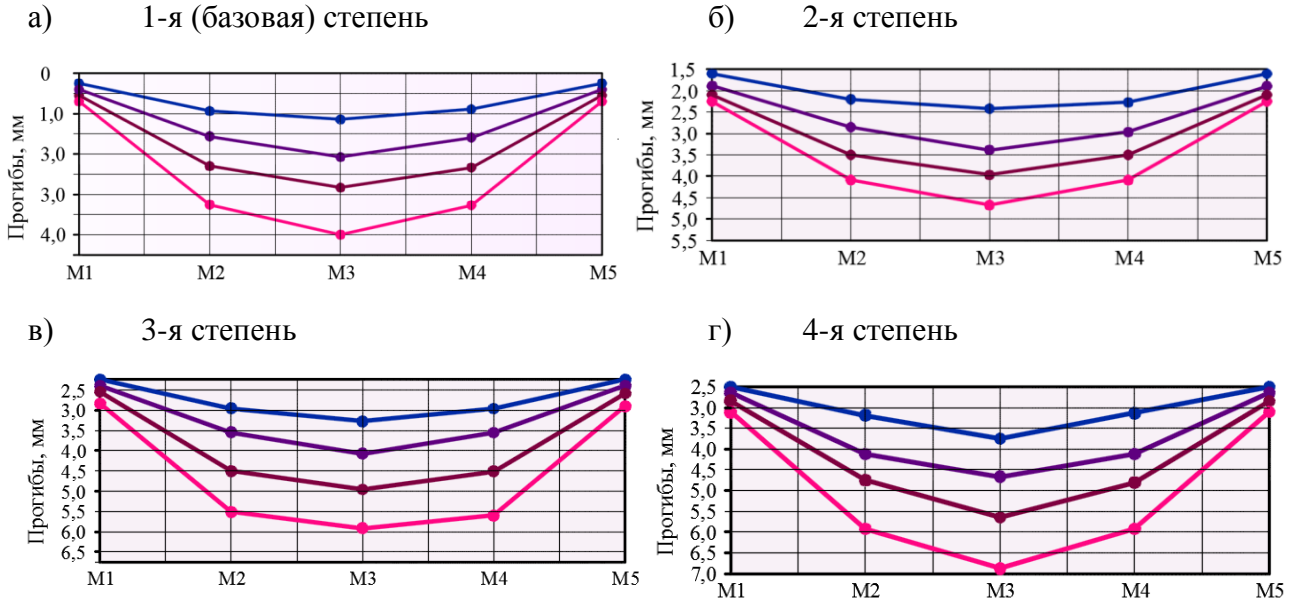


Рисунок 5 – График "Момент-прогиб" ж/б плит при разной степени коррозионных повреждений по «а»

—●— собственный вес; М, кН м —●— 17,5 —●— 35,0 —●— 50,0

Результаты испытания коррозионно-поврежденных плит по типу «а»: повреждения приведены на рисунке 5. При нагружении плит $5,0 \text{ кН/м}^2$ значение прогиба базовой плиты составляет $f_1 = 4,0 \text{ мм}$. Значения увеличения прогибов относительно прогиба базовой плиты соответственно степени повреждения «2а»; «3а» и «4а» составляют 1,15; 1,47 и 1,75 раза.

Таким образом, прогибы увеличиваются в зависимости от степени коррозионного повреждения плит.

Вариант 2. Испытания до разрушения. Для получения прогибов и моментов в стадии трещинообразования и разрушения проведены испытания плит до полного разрушения.

Были проведены статические испытания 14 плит перекрытия с разной шириной раскрытия трещин и глубиной коррозионного повреждения арматуры (табл. 2).

На рисунке 6 приведен процесс испытания плит.

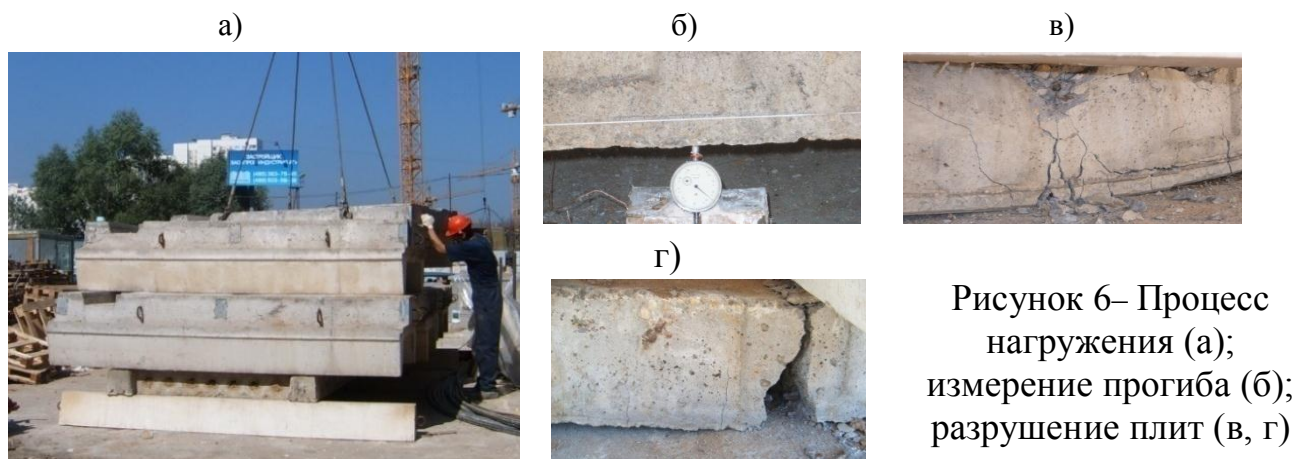


Рисунок 6– Процесс нагружения (а); измерение прогиба (б); разрушение плит (в, г)

Графики зависимости «момент-прогиб» $M - f$ конструкций представлены на рисунке 7. Последовательность графиков представлены по мере снижения несущей способности плит в зависимости от степени повреждения. Имеющиеся начальные значения прогибов зависят от ширины раскрытия трещин и степени коррозионных повреждений арматуры.

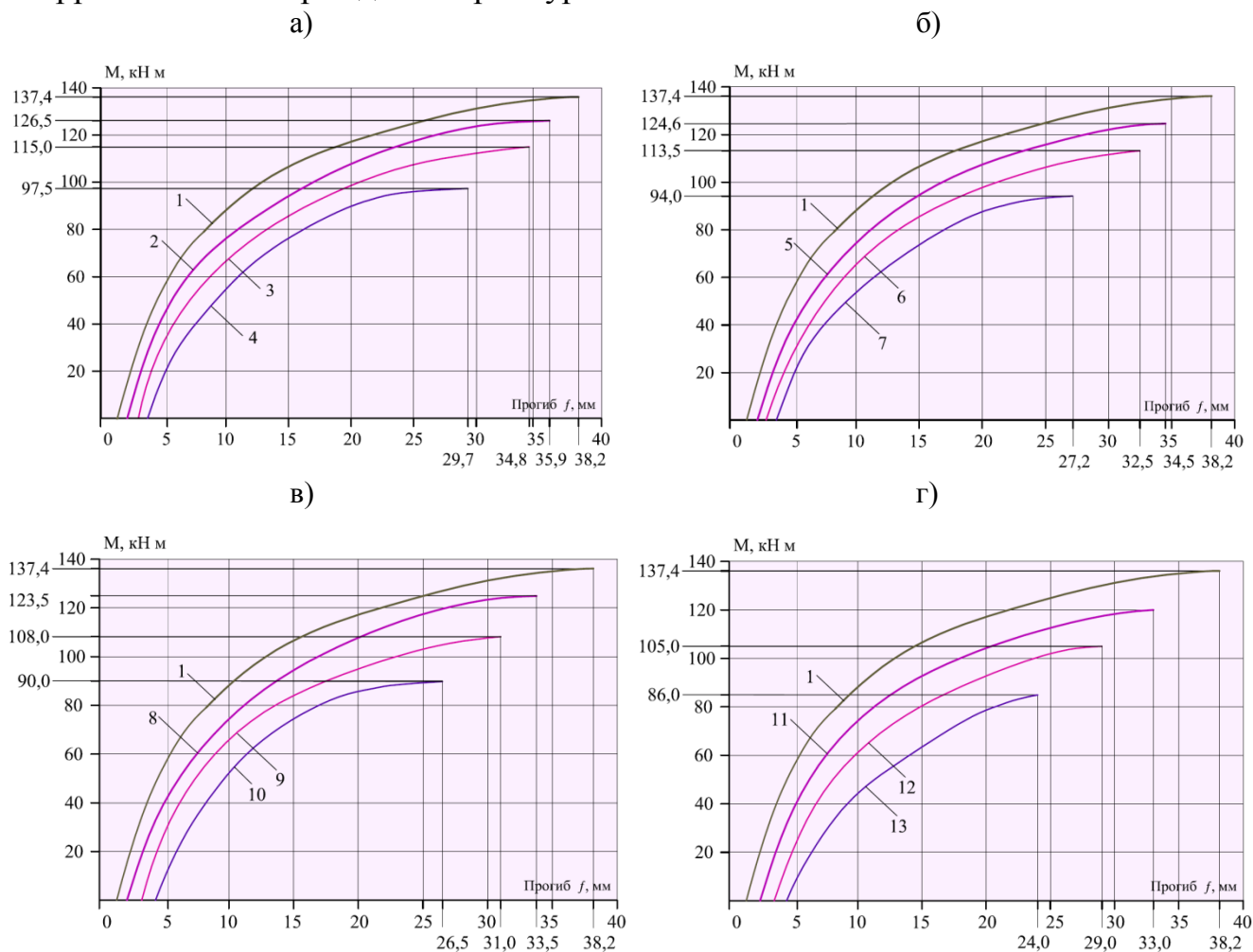


Рисунок 7– Графики зависимости « $M-f$ », «момент-прогиб». Степени повреждения приведены в таблице 1. На графиках: 1–базовая плита; 2–2-я «г»; 3–3-я «а»; 4–3-я «в»; 5–2-я «б»; 6–2-я «в»; 7–4-я «б»; 8–2-я «а»; 9–3-я «г»; 10–4-я «в»; 11–3-я «б»; 12–4-я «а»; 13–4-я «г»

При испытании получены значения величин прогибов « f » 1-й (базовой), 2-й, 3-й и 4-й степени повреждения плит.

Изгибающий момент M определяется по формуле:

$$M = \frac{48}{5} \cdot \frac{E_{b1} I_{red} f}{l^2}, \quad (1)$$

где f - прогиб плиты определяется по результатам испытаний; E_{b1} - модуль деформации сжатого бетона; I_{red} - момент инерции приведенного поперечного сечения.

Максимальный разрушающий момент базовой плиты составляет: $M_{баз} = M_1 = 137,4 \text{ кН м}$. При этом прогиб составляет 38,2мм.

На участках без трещин в растянутой зоне кривизна определяется по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - N_p e_{op}}{E_{b1} I_{red}}, \quad (2)$$

где N_p и e_{op} - усилие предварительного обжатия и его эксцентриситет относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента.

На основании обобщения многолетних наблюдений установлены степени коррозионного повреждения железобетонных плит реконструируемых незаконсервированных зданий после 10 лет нахождения на открытом воздухе. Установлено снижение несущей способности плит в зависимости от степени коррозионного повреждения арматуры и величины раскрытия трещин. Показано, что наибольшие потери соответствуют 3 и 4 степени коррозионных повреждений, т.е. при ширине раскрытия трещин более 0,5 мм и при толщине коррозионного поражения арматуры более 150 мкм.

В третьей главе на основании экспериментальных исследований определены коэффициенты снижения прочности бетона в зоне сжатия α_{Rb} и растяжения α_{Rbt} , построены графики зависимости от времени (рисунки 8 и 9). Данные коэффициенты характеризуют изменение прочности бетона конструкций в зависимости от времени и морозостойкости F_1 .

Условия критериев прочности записываются в виде неравенств и показывают, при каких значениях конструкция работает в упругой стадии, и когда происходит образование трещин и наступает разрушение.

Образование трещины в растянутой зоне не происходит, если выполняется условие:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{bt} = R_{bt}(t) = R_{bt} \cdot \gamma_{Rbt} \quad (3)$$

где σ_1 - растягивающее напряжение в бетоне; σ_{bt} – максимально допустимое растягивающее напряжение; $\gamma_{Rbt} = f(\alpha_{bt}, \omega_{bt})$ -критерий прочности.

При нарушении условия (3) происходит образование трещин.

В стадии трещинообразования условия прочности, в соответствии с работой проф. Н.И. Карпенко, записываются в виде:

$$\sigma_2 \leq \sigma = R_{bt}(t) + \sigma_s \mu_s \quad (4)$$

где σ_s – осевое напряжение в арматуре, соответствующее моменту исчерпания прочности бетона на растяжение, вычисляется через деформации арматуры ε_s по полученной диаграмме деформирования арматуры.

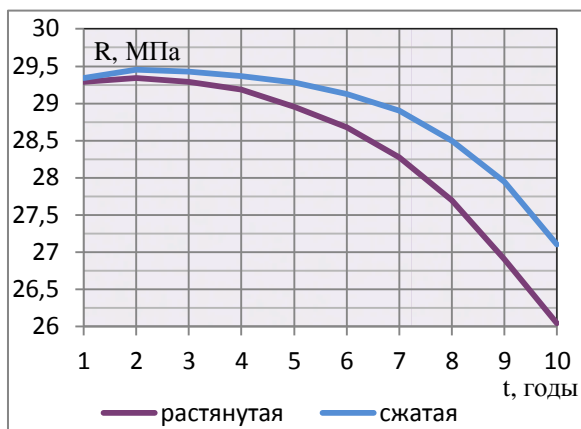


Рисунок 8 – График зависимости изменения прочности бетона от времени (годы). R-проектное значение прочности бетона.

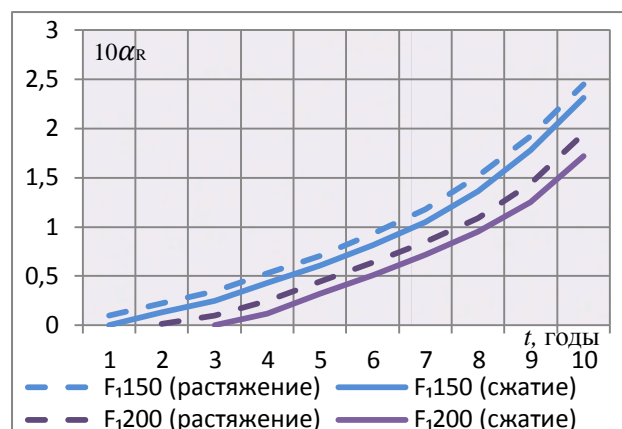


Рисунок 9 –Графики коэффициентов снижения прочности бетона во времени (годы).

В течение 10 лет наблюдались 72 железобетонных плиты. Прочностные характеристики бетона в зонах сжатия и растяжения после статистической обработки аппроксимировались следующими формулами:

$$\text{в зоне сжатия: } R_b(t) = \gamma_{Rb} R_b; \quad (5)$$

$$\gamma_{Rb} = 1 - \alpha_{Rb} \cdot \omega_b \cdot k_b; \alpha_{Rb} = e^{\lambda_{Rb}(t-T_0)} - 1; \quad (6)$$

$$\lambda_{Rb} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\delta R_b(t)}{R_b}; \delta R_b(t) = R_b - R_b(t); \quad (7)$$

$$\text{в зоне растяжения: } R_{bt}(t) = \gamma_{Rbt} R_{bt}; \quad (8)$$

$$\gamma_{Rbt} = 1 - \alpha_{Rbt} \cdot \omega_{bt} \cdot k_{bt}; \alpha_{Rbt} = e^{\lambda_{Rbt}(t-T_0)} - 1; \quad (9)$$

$$\lambda_{Rbt} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\delta R_{bt}(t)}{R_{bt}}, \delta R_{bt}(t) = R_{bt} - R_{bt}(t), \quad (10)$$

где $\delta R_b(t)$ и $\delta R_{bt}(t)$ – значения изменения прочности бетона соответственно при сжатии и растяжении в продолжение времени t ; R_b и R_{bt} – начальная прочность бетона соответственно при сжатии и растяжении; γ_{Rb} и γ_{Rbt} – критерии прочности бетона соответственно при сжатии и растяжении; α_{Rb} и α_{Rbt} – коэффициенты снижения прочности бетона в зонах сжатия и растяжения, в зависимости от продолжительности воздействия воздушно-влажной среды; ω_b и ω_{bt} – коэффициенты, характеризующие снижение прочности бетона в зонах сжатия и растяжения, зависящие от напряженного состояния $\sigma_b / R_b(t)$; k_b и k_{bt} – приведенные коэффициенты повреждения относительно базовой плиты; T_0 – начало развития коррозии, принимается время начала установки конструкций; λ_{Rb} и λ_{Rbt} – функции повреждения бетона, характеризующие скорость коррозии. Модули деформации бетона в зонах сжатия и растяжения, аппроксимировались аналогичным образом.

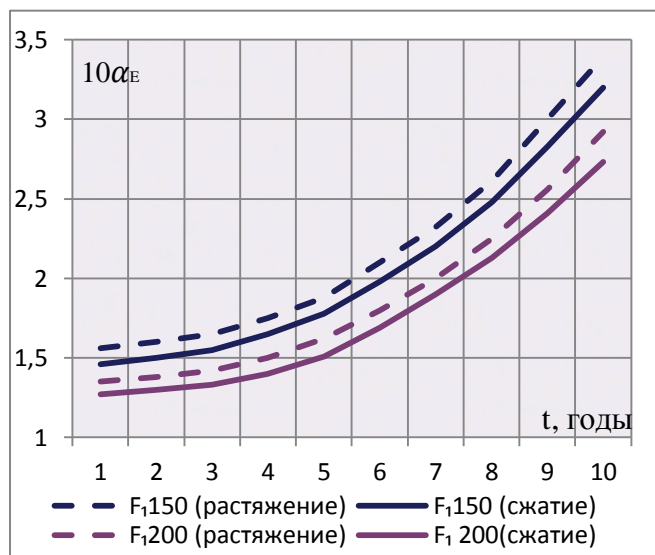


Рисунок 10 – Коэффициенты снижения модуля деформации бетона в зависимости от времени (годы) и морозостойкости (F_1)

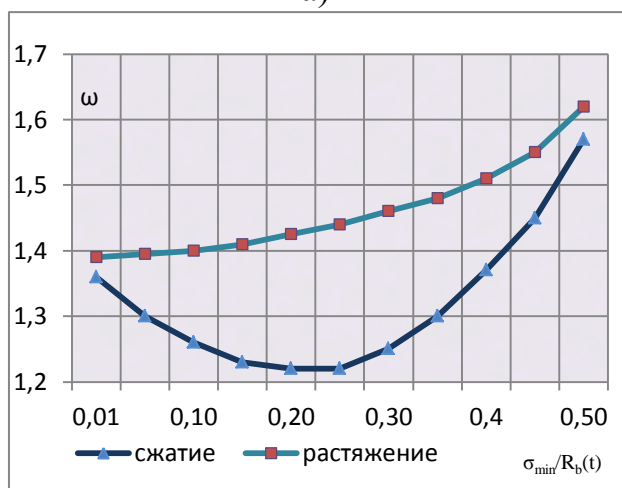
На рисунке 10 представлены графики коэффициентов снижения модуля деформаций бетона в зонах сжатия и растяжения во времени t .

На основании экспериментальных исследований определены коэффициенты, характеризующие снижение прочности бетона в зонах сжатия ω_b и растяжения ω_{bt} , зависящие от напряженного состояния $\sigma_{min}/R_b(t)$. В каждой стадии нагружения измерялись прогибы и деформации в зонах растяжения и сжатия. Напряженное состояние плиты

вычислялось методом конечных элементов (с учетом фактических изменений прочности бетона) и определялось $\sigma_b/R_b(t)$. На рисунке 11

представлены графики коэффициентов повреждения ω .

а)



б)

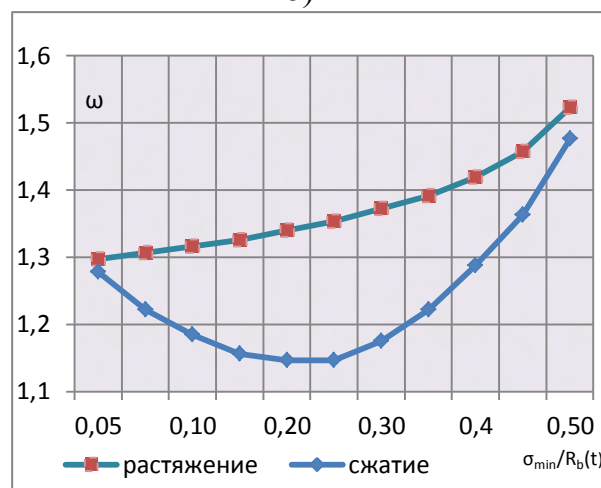


Рисунок 11 – Зависимости коэффициентов снижения прочности бетона в зоне сжатия и растяжения: а) при $F_1 150$; б) $F_1 200$

На основании экспериментальных исследований установлены коэффициенты:

– α_{Rb} ; α_{Rbt} и α_{Eb} ; α_{Ebt} – соответственно характеризуют снижение прочности и модуля деформации в зонах сжатия и растяжения в зависимости от продолжительности воздействия воздушно-влажной среды.

– ω_b и ω_{bt} – характеризуют снижение прочности и модуля деформации соответственно в зоне сжатия и растяжения в зависимости от относительных напряжений $\frac{\sigma_{min}}{R_b(t)}$.

На рисунке 12 представлены графики повреждения бетона в зависимости от времени нахождения в открытой атмосфере и график критериев прочности в натуральных климатических условиях. При увеличении времени воздействия

климатических условий изменяется предельная поверхность эллипса, соответствующая критерию прочности.

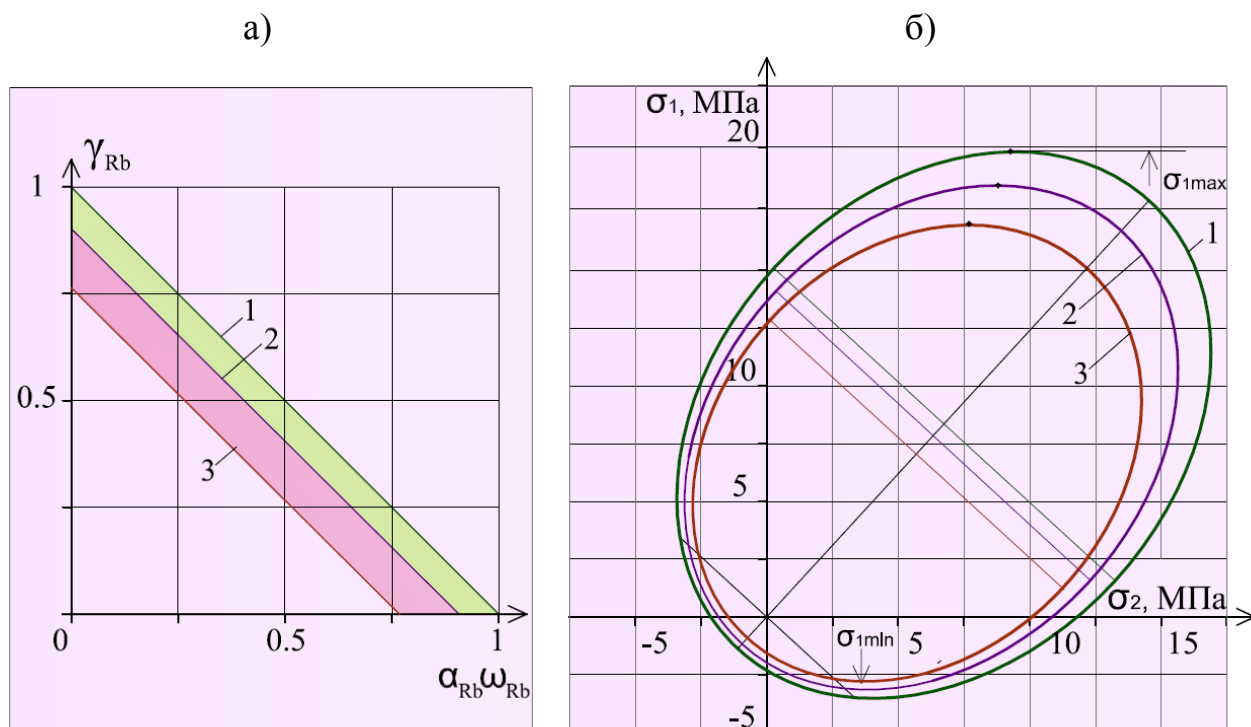


Рисунок 12 – График повреждения бетона в зависимости от времени нахождения в открытой атмосфере (а); График критерия прочности в воздушно-влажной среде (б). На рисунках 1– 1год; 2–5 лет; 3–10 лет

Глубина коррозионного повреждения $\delta(t)$ рабочей арматуры по 4-й степени повреждения плит представлена на рисунке 13.

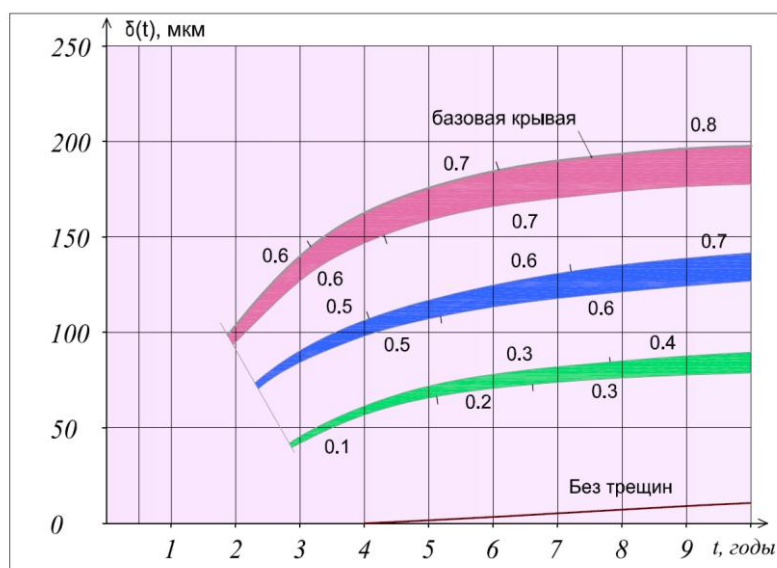


Рисунок 13 – Глубина коррозионного повреждения арматуры по 4-й степени повреждения плит в зависимости от ширины раскрытия трещин

Показано, что с увеличением ширины раскрытия трещин увеличивается степень коррозионного поражения арматуры, а в дальнейшем увеличение ширины раскрытия трещин происходит от давления продуктов коррозии арматуры.

При возрастании напряженного состояния в зоне сжатия сначала происходит увеличение прочности, а потом снижение. В зоне растяжения происходит непрерывное уменьшение прочности.

В четвертой главе приведены испытания образцов бетона и арматуры, отобранных из коррозионно-поврежденных железобетонных плит, построены диаграммы деформирования для определения несущей способности конструкций по диаграммному методу.

При аппроксимированной диаграмме (рисунок 14), сжимающие напряжения бетона σ_b в зависимости от относительных деформаций бетона ε_b , представлены в следующем виде:

$$1) \text{ При } 0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}, \quad \sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_b; \quad (17)$$

$$2) \text{ При } \varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}, \quad \sigma_b = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{b1}}{R_b(t)} \right) \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b1}} + \frac{\sigma_{b2}}{R_b(t)} \right] R_b(t); \quad (18)$$

$$3) \text{ При } \varepsilon_{b2} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b0}, \quad \sigma_b = \left[\left(1 - \frac{\sigma_{b3}}{R_b(t)} \right) \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b0}}{\varepsilon_{b3} - \varepsilon_{b2}} + \frac{\sigma_{b3}}{R_b(t)} \right] R_b(t); \quad (19)$$

$$4) \text{ При } \varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b3}, \quad \sigma_{b0} = R_b(t). \quad (20)$$

Значение напряжений σ_{b1} определяется по формуле:

$$\sigma_{b1} = k_{\text{СЖ}} \cdot R_b(t), \quad (21)$$

где $R_b(t)$ - значение изменения прочности бетона; $k_{\text{СЖ}}$ и $k'_{\text{СЖ}}$ - определяются по диаграмме деформирования для неповрежденных и поврежденных участков бетона.

Значения относительных деформаций сжатия бетона ε_b принимаются:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_{bi}}; \quad i=2; 3; 4. \quad (22)$$

Значение относительной деформации в зоне растяжения бетона принимается ε_{bt} .

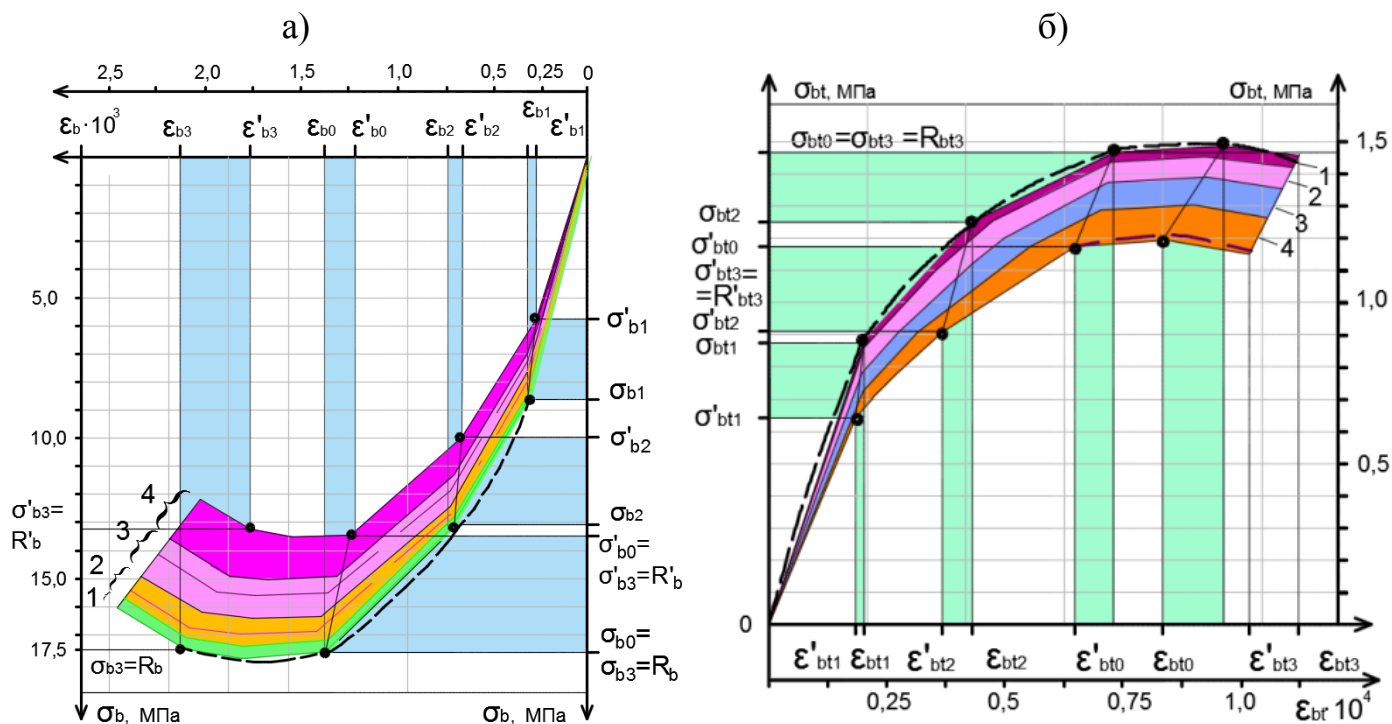


Рисунок 14 – Диаграмма деформирования бетона при сжатии (а) и растяжении (б): 1 – базовая; 2, 3, 4 – по соответствующим степеням повреждения

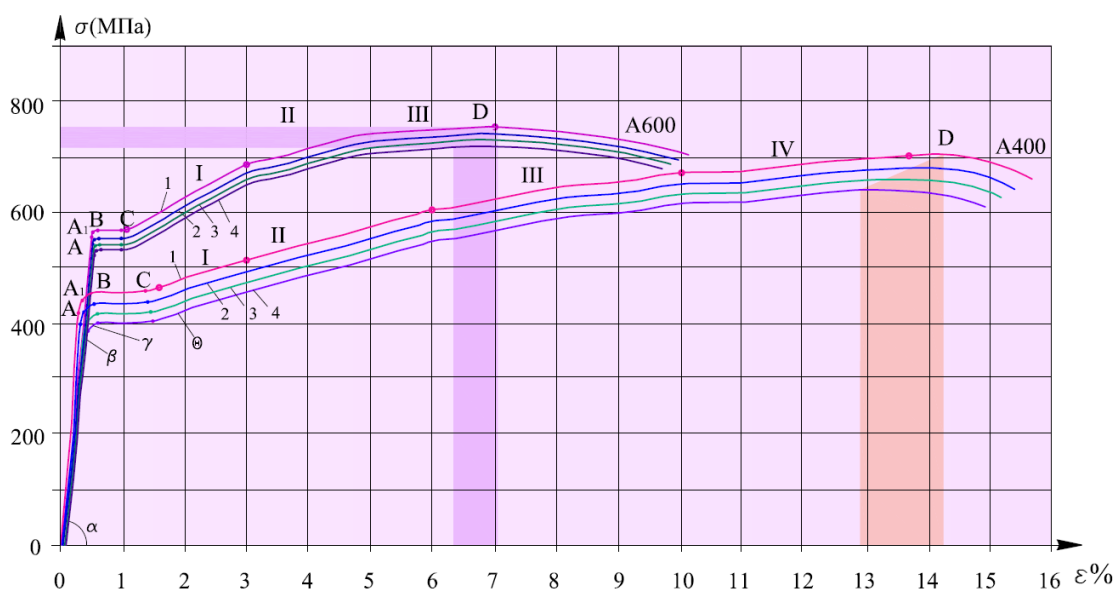


Рисунок 16. -Диаграмма растяжения арматуры. Обозначение номеров диаграмм в зависимости от глубины коррозии по табл. 3

Расчетная схема плиты представлена на рис. 17.

В стадии трещинообразования несущая способность определяется:

$$M_{cor} = \frac{4}{9} (1 - k_1 \cdot \alpha_{Rbt} \cdot \omega_{bt}) R_{bt} Y_c b z_{bt} + R_s A_s z_s; \quad (23)$$

где k_1 , α_{Rbt} , ω_{bt} – определяются в третьей главе; R_{bt} и R_s – определяются по диаграммам деформирования бетона и арматуры.

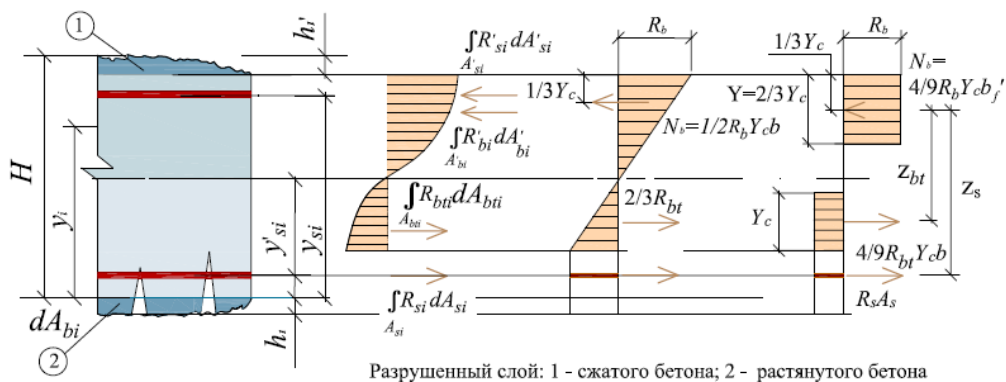


Рисунок 17– Распределение усилий в расчетном сечении

Получены диаграммы деформирования коррозионно-поврежденного бетона, получены аналитические зависимости по определению сжимающих и растягивающих напряжений бетона σ_b и σ_{bt} от относительной деформации ε_b и ε_{bt} . Получены зависимости « σ - ε » для арматурных стержней класса А400 и А600 по разным схемам коррозионно-поврежденных плит.

В пятой главе приведены методика расчета и результаты численного моделирования несущей способности коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия с учетом фактических значений прочности бетона.

В стадии развития неупругих деформаций максимальный изгибающий момент приближается к предельному моменту и принимаются:

$$0,5 M_{ult} < M_{max} \leq M_{ult}; \sigma_{bt} \leq R_{bt}, \quad (24)$$

где M_{max} - максимальный изгибающий момент; M_{ult} – момент трещинообразования полосы плиты.

Для стадии с трещинами выражения $M_{max} < M_{ult}$ зависят от числа трещин. Первоначально рассмотрим схему деформирования с одной трещиной. Переход из 2-й в 3-ю стадию с одной трещиной в точках нижней зоны характеризуется выполнением двух неравенств:

$$M_{max} > M_{ult}; \quad (25)$$

$$M_{min} \leq M_{ult}. \quad (26)$$

Если нарушается (26) и выполняется (25), образуются две трещины. При дальнейшем нагружении, если $M_{max} > M_{ult}$, то образуются новые трещины.

Расчет выполнен на программном комплексе «SCAD Office».

Расчет выполняется для разных схем повреждения в соответствии с систематизацией коррозионно-поврежденных плит.

На рисунке 18 приведены изополя напряжений и деформаций в вертикальном направлении плиты 4-й степени повреждения.

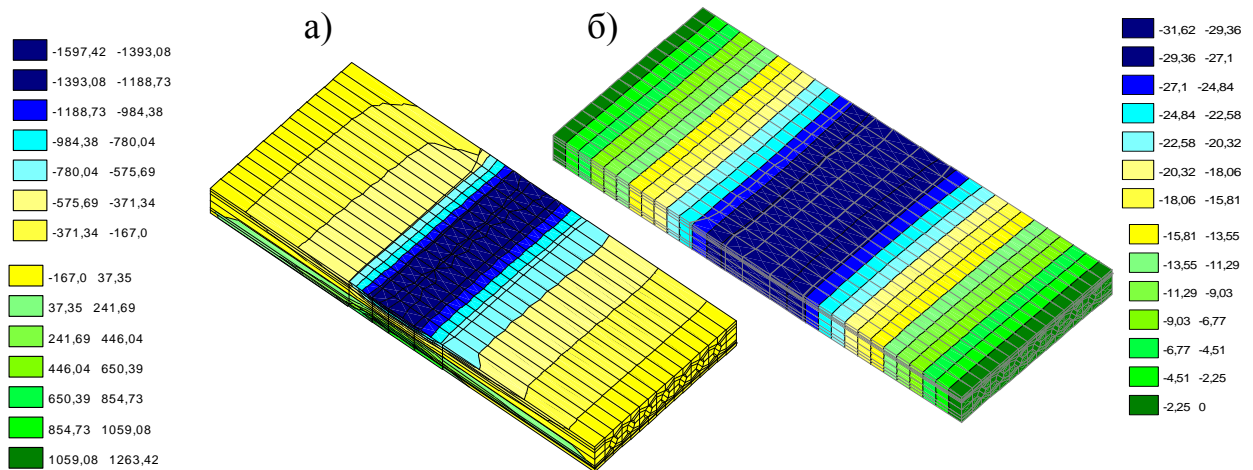


Рисунок 18 – Отображение изополей напряжений, 10кН/м^2 (а); (б) деформация по Z (мм)

Соотношение экспериментальных значений разрушающих моментов M_{ult}^{exp} , несущая способность, вычисленная по результатам численного эксперимента M_b^{SCAD} и теоретических расчетов M_b^y приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение полученных данных

Степень повреждения	Натурный эксперимент	Теоретические значения	Численный эксперимент	M_{ult}^{exp}/M_b^y	M_{ult}^{exp}/M_b^{SCAD}
4 «а»	105,0	100,0	117,5	1.05	0.89
4 «б»	94,0	98,9	114,7	0.95	0.81
4 «в»	90,0	96,1	103,1	0.93	0.87
4 «г»	86,0	94,1	104,5	0.91	0.82

Сравнение значений теоретических расчетов и численных экспериментов показали отклонения в среднем 16% и 18% соответственно относительно экспериментальных данных.

В приложения включены справки о внедрении результатов работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При подготовке диссертации изучено влияние степени коррозионных повреждений плит перекрытий и определено влияние степени их повреждений на прочностные и деформационные свойства конструкций в реконструируемых недостроенных зданий. Выполнены натурные испытания плит в 2-х вариантах: испытание плит, смонтированных внутри здания, на контрольные и разрушающие нагрузки и на испытательной платформе нагружением плит до полного разрушения. При этом получены значения прогибов и разрушающих моментов плит для различной степени коррозионного повреждения бетона и арматуры.

2. На основании экспериментальных исследований установлены коэффициенты снижения прочности и модуля деформации бетона коррозионно-поврежденных плит:

– α_{Rb} ; α_{Rbt} и α_{Eb} ; α_{Ebt} – характеризуют соответственно снижение прочности и модуля деформации в зонах сжатия и растяжения в зависимости от продолжительности воздействия воздушно-влажной среды г. Москвы.

– ω_b и ω_{bt} – характеризуют снижение прочности и модуля деформации соответственно в зоне сжатия и растяжения в зависимости от относительных напряжений $\frac{\sigma_{min}}{R_b(t)}$.

Коэффициенты снижения модуля деформации α_E в течение 5-ти лет в среднем уменьшаются в 2,5 раза, в течение 10 лет в 4,5 раза. Коэффициенты снижения прочности α_R в течение 5-ти лет в среднем уменьшаются в 1,5 раза, в течение 10 лет в 3,0 раза. Коэффициенты снижения прочности в течение 5 лет в 1,66 раз меньше, чем коэффициенты снижения модуля деформации; а в течение 10 лет – в 1,55 раза, то есть, снижение прочности во времени меньше, чем модуля деформации.

В зоне растяжения коэффициенты снижения прочности и модуля деформации непрерывно возрастают.

3. Теоретически обосновано и практически доказано, что деформация увеличивается с увеличением степени коррозионных повреждений арматуры и ширины раскрытия трещин. Результаты наблюдения показывают, что коррозия арматурных стержней замедляется после 5-6 лет воздействия воздушно-влажной среды г. Москвы. На исследованных плитах выявлено, что первоначальная ширина раскрытия трещин 0,1-0,2мм увеличивается к 5 годам в два раза, к 10 годам в три раза. А начальная ширина раскрытия трещин 0,3-0,6 мм увеличивается к 5 годам в 1,3 раза, а к 10 годам в 1,5.

4. Разработаны критерии снижения прочности бетона, которые показывают границы работы конструкции в упругой стадии и перехода как в стадию трещинообразования, так и в стадию разрушения.

5. На основании испытания образцов, отобранных из конструкций получены диаграммы деформирования коррозионно-поврежденного бетона, получены аналитические зависимости по определению сжимающих и растягивающих напряжений бетона σ_b и σ_{bt} от относительной деформации ε_b и ε_{bt} . При испытании на растяжение получены диаграммы деформирования арматуры класса А400 и А600, которые дают возможность более точно

определить деформации арматуры в упруго-пластических, пластических зонах и зонах упрочнения.

6. Несущая способность плит в зонах образования и раскрытия трещин, пересекающих рабочую арматуру, снижается: на стадии разрушения несущая способность базовой плиты составляет $M_1 = 137,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$, при этом прогиб - 38,2мм. Несущая способность коррозионно-поврежденных плит по 2-й, 3-й, 4-й степеням в течение 10 лет снижается в среднем соответственно до 12,0%; 21,0% и 33,0% относительно базовой неповрежденной плиты (1-й). Остаточный ресурс несущей способности для плит 2-й, 3-й, 4-й степеням повреждений в среднем составляет соответственно 88,0%; 79,0% и 67,0%.

7. Установлены зависимости «напряжение-деформация» в результате испытаний образцов бетона и арматуры, отобранных из конструкций для определения несущей способности плит по диаграммному методу расчета.

Разработан алгоритм численного моделирования, расчет напряженно-деформированного состояния коррозионно-поврежденных плит с учетом трещинообразования и фактических значений прочности бетона и арматуры для определения остаточного ресурса несущей способности плит перекрытия подвергающиеся воздействию воздушно-влажной среды г. Москвы.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследований:

1. Мониторинг коррозионного состояния и оценка остаточной несущей способности железобетонных конструкций (плит, балок, колонн и др.), подвергшихся коррозионному повреждению в различных условиях и разных климатических условиях регионов России.

2. Разработка нормативных документов для расчета и оценки несущей способности коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций (плит, балок, колонн и др.) с учетом условий эксплуатации и НДС.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Минасян, А.А. Несущая способность коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия по результатам натуральных испытаний / А.А. Минасян // Строительная механика и расчет сооружений. – 2018. – №6. – С. 19-25.
2. Минасян, А.А. Определение несущей способности и напряженно-деформированное состояние сборных железобетонных плит перекрытий, подвергшихся циклическому замораживанию-оттаиванию / А.А. Минасян // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. –2018. –№6. –С. 53-57.
3. Минасян, А.А. Натурные испытания сборных железобетонных плит, подвергшихся циклическому замораживанию-оттаиванию / А.А. Минасян // Строительство и реконструкция. –2018. –№6. –С. 44-52.
4. Минасян, А.А. Коэффициенты неравномерности деформации арматуры и бетона коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия в стадии

трещинообразования / А.А. Минасян // Строительная механика и расчет сооружений. –2019. –№3. –С. 18-22.

5. Минасян, А.А. Диаграммы деформирования бетона и арматуры коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия / А. А. Минасян, К.П. Пятикрестовский // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – №5. – С. 7-12.

6. Минасян, А.А. Расчет поврежденных железобетонных плит перекрытия с учетом коррозии бетона и арматуры / А. А. Минасян, К.П. Пятикрестовский // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2019. – №5. – С. 56-64.

7. Минасян, А.А. Критерии прочности коррозионно поврежденного бетона при плоском напряженном состоянии / А. А. Минасян // Строительная механика и расчет сооружений. – 2020. – №6. – С. 24-28.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:

8. Tamrazyan, A.G. The influence of depth of tensile concrete deterioration on the load bearing strength and deflections of corrosion-damaged floor slabs /A.G. Tamrazyan, A.A. Minasyan // VI INTEGRATION, PARTNERSHIP AND INNOVATION IN CONSTRUCTION SCIENCE AND EDUCATION. MATEC. — 2018. — Volume 251, 02012. — 6.p.

Публикации в других научных журналах:

9. Минасян, А. В. Прочность и деформативность корытных плит при расчетной и контрольной нагрузках / А.В. Минасян, А.А. Минасян // Международная конференция «Актуальные проблемы теории сооружений» Сборник научных статей. — Ч. 2.— М., 2009. — С. 138-144.

10. Пономарев, О.И. Учет повреждений железобетонных конструкций реконструируемых зданий / О.И. Пономарев, А.А. Минасян, А.Ш. Бояджян // Вестник 2, ч.1,. Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.–2010. –С. 106-113.

11. Минасян, А.А., Прочность, деформативность и устойчивость поврежденных плит при статических и динамических нагрузках / А.А. Минасян, М.Л. Шуклина, А.Ш. Бояджян // III Международная научно-практическая конференция. Сборник трудов. МГСУ.–2010.–С. 231-240.

12. Минасян, А.А. Сравнительный анализ изгибающих моментов коррозионно-поврежденных железобетонных плит перекрытия / А.А. Минасян // Научный журнал «LINGVO-SCIENCE» –2018.–№18.– С. 39-42.

Минасян Арман Арамаисович

**Прочность и деформативность коррозионно-поврежденных железобетонных
плит перекрытия с учетом трещинообразования**

Специальность: 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тираж – 100 экз.

Формат 60x90/16

Типография «ИРО ЦНИИСК»

109428, Москва, 2-я Институтская ул.,6

84991747982