

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

---

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

---

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

---

(направленность (профиль))

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему «Методика расчета железобетонных элементов на прочность с  
повреждениями сечения от коррозии бетона»

Студент

А.В. Гурьянова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н., доцент, В.А. Ерышев

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

Тольятти 2021

## Содержание

Введение.....	3
1 Основные сведения о коррозии бетона и арматуры .....	6
2 Оценка степени коррозионного поражения эксплуатируемых железобетонных конструкций покрытий .....	32
3 Методика расчета на прочность железобетонного элемента поврежденного коррозией бетона с использованием криволинейных диаграмм состояния бетона.....	39
Заключение .....	64
Список используемой литературы .....	67

## Введение

Почти во всех странах мира железобетон активно используется в строительстве уже многие годы. Повсеместность и столь продолжительный срок использования в строительстве данного материала объясняется тем, что в железобетоне сочетаются свойства и бетона, и металла. В число полезных и востребованных в современном строительстве свойств этого материала, обеспечивающих его повсеместное применение, входят:

- высокая плотность,
- способность выдерживать весьма большие весовые и ударные нагрузки,
- стойкость к воздействию влаги, к резким колебаниям температур,
- огнестойкость,
- малые эксплуатационные расходы,
- дешевизна и хорошие эксплуатационные качества.

Железобетонные изделия применяются во всех областях строительства: при строительстве гражданских и промышленных зданий и сооружений, при возведении инженерных конструкций. Жилые дома, мосты разных размеров, гидроэлектростанции, ядерные реакторы, аэродромы и другие объекты возводятся из железобетона.

Соответственно, с течением временем все более остро встает вопрос о продлении долговечности использования конструкций, изготовленных из него. Актуален вопрос о гарантированном сроке службы железобетонных конструкций, о том, как воздействуют на степень разрушения железобетона различные условия его эксплуатации.

Эти вопросы влекут за собой необходимость изучения скорости коррозии бетона и железобетона, рассмотрение этой проблемы в различных условиях эксплуатации с учетом степени воздействия тех или иных агрессивных сред. Основная цель таких исследований – это разработка

методов прогноза, а также расчета степени износа железобетонных конструкций на определенный срок эксплуатации.

Благодаря современным нормативным документам расчет железобетонных конструкций может выполняться по деформационной модели, что получает применение в программных комплексах. Расчеты базируются на построении диаграмм деформирования бетона. В нормативных документах - это основа деформационной модели, приведено в работах [22]-[24]. В процессе расчетов, в соответствии с СП [16], применяются различные виды диаграмм:

- двухлинейные,
- трехлинейные,
- криволинейные.

Однако, как показывают исследования, наиболее точными являются результаты, полученные по криволинейной диаграмме. Данные, полученные при ее построении, более всего соответствуют СНиП 2.03.01-84\* [14], принятый за эталон. Расчёты же по двух- и трехлинейным диаграммам являются более упрощенными, имеют значительные расхождения, что сказывается на итоговых результатах расчета элементов.

Ценность расчетов по криволинейным диаграммам заключается в возможности прогнозирования дальнейшего поведения железобетонной конструкции, в оценке ее эксплуатационной пригодности и безопасности. Можно рассчитать эти ее качества на всех этапах работы от момента возрастания нагрузки до разрушения.

Цель исследования: разработать методику расчета прочности нормального сечения железобетонного элемента, поврежденного со стороны сжатой зоны коррозией бетона.

Объект исследования: изгибаемые железобетонные элементы балочного типа.

Предмет исследования: деформационная модель в расчете железобетонных элементов, поврежденных коррозией бетона.

Методы исследования: экспериментальные и теоретические.

Научная новизна исследования. В данной работе разработана и реализована методика расчета сечения железобетонного элемента с переменными механическими свойствами слоев бетона в сжатой зоне.

Практическая значимость исследования состоит в том, что разработанный алгоритм расчета сечения железобетонного элемента с переменными механическими свойствами слоев бетона в сжатой зоне может быть использован при расчетах железобетонных конструкций.

Объем диссертации и её структура. Данная диссертационная работа состоит из следующих частей:

- введения,
- 3 главы,
- заключение,
- библиографического списка из 39 наименований [2].

Работа изложена на 71 странице. В неё включены 20 таблиц, 9 рисунков.

## 1 Основные сведения о коррозии бетона и арматуры

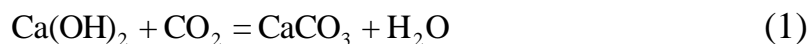
Под коррозией бетона понимают сложный процесс, в результате которого происходит разрушение конструкции. Факторами, провоцирующими данный процесс, являются как внешние агрессивные среды, так и внутренние физико-химические и химические процессы. Механизм и интенсивность коррозионного воздействия зависит от количества и степени воздействия различных факторов, приведено в работах [37]-[39].

Если говорить о коррозии бетона, то следует выделить три ее основных вида.

Первый вид коррозии обусловлен условиями эксплуатации железобетонных конструкций. Как правило, данные сооружения находятся на открытом воздухе и подвергаются воздействию скачков температур, а также воздействию атмосферных осадков. Все это вызывает растворение цементного камня, вымывание его частей. В процессе эксплуатации на бетонные конструкции очень активно воздействуют жидкости, например, дождевая вода или снег. Если учесть, что бетон в основной своей массе состоит из гидрата окиси кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (гашеная известь), а это легко растворимое соединение, то, соответственно, с течением времени этот компонент растворяется и нарушает структуру бетона. При фильтрации воды через структуру бетонных конструкций этот процесс происходит особенно интенсивно, происходит так называемая «коррозия выщелачивания».

Следующий вид коррозии возникает в результате взаимодействия кислот, содержащихся в воде, и цементного камня. При этом процессе происходит химическое взаимодействие между цементным камнем и агрессивным агентом. В результате такой реакции зачастую происходит увеличение объема, либо происходит процесс, в результате которого вымываются легкорастворимые соединения извести. При таком воздействии разрушение бетона происходит гораздо быстрее, чем при коррозии выщелачивания.

Приведенное ниже уравнение (1) описывает первый процесс – увеличение объема:



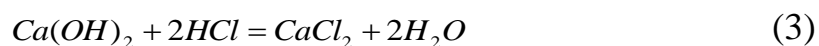
Увеличение объема в данном случае связано с тем, что  $\text{CaCO}_3$  не растворяется в воде, а откладывается в порах цементного камня, что и приводит к увеличению объема. Так как тело бетона имеет пористую структуру, образовавшиеся кристаллы заполняют его до критического уровня, вызывающего рост внутреннего напряжения в бетоне. Со временем происходит растрескивание бетона. Все это приводит к разрушению бетона.

Другой процесс связан с вымыванием легкорастворимых соединений извести. В результате взаимодействия бетона с водными растворами кислот наблюдается химическая реакция, в результате которой образуется бикарбонат кальция, который сам по себе является легкорастворимым веществом, агрессивно воздействующим на бетон, т.к. растворяясь в воде он вымывается из бетона.

Химическое уравнение (2) отображает данную реакцию:



Уравнение (3) описывает процесс химической коррозии бетона. В ходе данной химической реакции вымываются соли хлористого кальция.



Во избежание возникновения химической коррозии бетона применяют пуццолановый портландцемент, а также портландцемент, отличающийся сульфатостойкостью.

Кроме того, в порах бетона также образуются в результате кристаллизации и вещества, являющиеся трудно растворимыми, что влечет за собой возникновение коррозии

Отдельно следует отметить такой процесс, как биокоррозия. Она связана с тем, что бактерии и грибки проникают внутрь бетона, развиваются в нем,

откладывая там продукты жизнедеятельности, тем самым разрушая структуру бетона.

Бетон зачастую используется при экстремальных условиях: при очень низких температурах или в помещениях с особо агрессивной средой. Изучение процессов коррозии бетона в таких условиях требует отдельного рассмотрения.

Отдельно следует остановиться на случаях образования коррозии при использовании бетона в экстремальных условиях. Под такими условиями понимаются условия, в которых на бетон происходит химическое воздействие сульфатов. В результате такого взаимодействия отмечается образование большого объема солей-гидратов, содержащих большое количество кристаллизационной воды. Все это приводит к образованию большого объема твердой фазы. Таким образом, в результате химической реакции взаимодействия агрессивной сульфатосодержащей среды и алюминатного составляющего цементного камня происходит образование кристаллического гидросульфоалюмината кальция. Особенностью этого вещества является то, его молекулярный объем в несколько раз превосходит объем вступивших в реакцию веществ. Это связано с тем, что в молекуле данного вещества содержит 32 молекулы химически связанной воды.

Такое взаимодействие сульфатов и составляющих цементного камня, таких как алюминатные минералы, является крайне нежелательным. Результатом их взаимодействия является образование модификаций гидросульфоалюмината. Самой опасной модификацией является этtringит ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ). Кристаллы этtringита при увеличении вызывают такие значительные напряжения внутри бетона, которые превышают его прочностные характеристики.

Следует отметить, что воздействие растворов сульфатов на бетон приводит к стремительному коррозионному разрушению последнего. Так как



возникающие в результате такого взаимодействия вещества накапливаются в порах бетона и разрушают его.

Ниже приведена информация о степени агрессивности сульфатосодержащих сред в отношении бетонов (таблица 1).

Таблица 1 – Степени агрессивности по отношению к бетону

Группа цементов	Содержание SO <sub>2</sub> в водном растворе мг/м <sup>3</sup>	Степень агрессивности по отношению к бетону		
		нормальной плотности	повышенной плотности	особо плотному
Рядовые	до 0,25	0	0	0
	0,25 ... 0,5	1	0	0
	0,5 ... 1,0	2	1	0
	1,0 ... 1,2	3	2	1
	1,2 ... 1,5	3	3	2
	более 1,5	3	3	3
Повышенной сульфатостойкости	до 1,5	0	0	0
	1,5 ... 2,0	1	0	0
	2,0 ... 2,5	2	1	0
	2,5 ... 3,5	3	2	1
	3,5 ... 5,0	3	3	2
	более 5,0	3	3	3
Сульфатостойкие	до 3	0	0	0
	3 ... 6	1	0	0
	6 ... 8	2	1	0
	8 ... 12	3	2	1
	12 ... 15	3	3	2
	более 15	3	3	3

В бетоне также используется железная арматура. Она тоже вступает во взаимодействие с агрессивными средами, поступающими в пористое тело бетона посредством воды с растворенными в ней химическими веществами или воздуха, содержащего различные газы. В результате взаимодействия с такими веществами, как хлор, сероводород, сернистые газы, арматура внутри бетона начинает ржаветь, что также приводит к увеличению ее объема. Увеличивающийся объем вызывает дополнительные напряжения, что приводит к возникновению трещин в теле бетона и дальнейшему, возможному его разрушению.

Отдельно следует остановиться на причинах возникновения электрохимической коррозии. Как известно, тело бетона является пористым. В результате эксплуатации железобетонных конструкций на них попадает вода. Но поры в бетоне распределены неравномерно, соответственно и влага наполняет его тоже неравномерно, и неравномерно она подводится к металлу арматуры. Это вызывает на разных участках разные потенциалы, что влечет за собой возникновение электрохимической коррозии.

Если говорить о причинах возникновения коррозии арматуры, то важно отметить, что сам бетон в процессе эксплуатации может способствовать ее развитию. На поверхности бетона в результате его взаимодействия с углекислым газом образуется защитная пленка. Такой процесс образования пленки называется карбонизацией. Она защищает бетон от воздействия внешних факторов, препятствуя проникновению жидкости внутрь его, но в тоже время является фактором, стимулирующим развитие коррозии металла.

Особо следует остановиться на морозном разрушении бетона. Под этим термином понимают разрушение, причиной которого послужило многократное замораживание и размораживание бетона. При понижении температуры вода, находящаяся в порах бетона, превращается в лед. А объем льда на 9% больше объема воды, из которой он образовался. Соответственно, чем выше степень водонасыщения бетона, тем больше в нем накапливается воды, и тем более он подвержен разрушению.

Таким образом, основной причиной разрушения бетона в результате многократно повторяющихся циклов замораживания и оттаивания является давление воды, которая отжимается из пор при возникновении льда. С учетом этого факта важно не просто количество пор в теле бетона, а соотношение открытых пор в бетоне с количеством условно закрытых пор, в которые жидкость может проникнуть только под давлением. В данном случае - в процессе образования льда из воды под воздействие морозов. Морозостойкость бетона зависит от этого соотношения.

В морозостойком бетоне суммарных объем таких резервных пор должен составлять не менее 15% от общего объема. Кроме того, они должны находиться на расстоянии, не превышающем 0,3 мм друг от друга. При таких условиях бетон может выдержать значительное количество циклов заморозки/оттаивания, и структура его не будет повреждена.

Однако следует учесть, что в порах бетона при замораживании и оттаивании может оказаться не только вода, но и более агрессивные среды, такие как хлорид натрия, калия, кальция. В таком случае процесс разрушения бетона идет гораздо быстрее.

Агрессивные среды могут быть классифицированы по различным основаниям.

Прежде всего, они классифицируются по своему происхождению. Можно выделить агрессивные среды природного происхождения и агрессивные среды, которые образовались в результате человеческой деятельности.

Воздействие солнечной радиации, минеральных вод, испарений сероводородных источников и т.д. – это природные агрессивные среды. Список разновидностей агрессивных сред, образовавшихся в результате человеческой жизнедеятельности, гораздо более обширный. Их можно разделить на три основные группы.

Первая включает в себя агрессивные среды, которые возникают в результате жизнедеятельности современных городов. Сюда можно отнести бытовые стоки, а также сверх агрессивные среды, возникающие из-за противоледовой обработки в зимнее время.

Вторая группа включает в себя агрессивные среды, которые образуются в результате работы промышленных предприятий. Это различные производственные вредные выбросы в атмосферу, или загрязненные стоки с производств, возникающие в результате несовершенства технологических процессов.

Третья группа – это агрессивные среды, возникающие в процессе сельскохозяйственного производства. Сюда можно отнести сточные воды сельскохозяйственных животноводческих ферм, воздушную среду в помещениях, в которых содержатся животные и птица, среды, которые образуются в хранилищах и зданиях по переработке растений.

Другая классификация агрессивных сред предполагает деление по их химической природе: выделяют неорганические и органические агрессивные среды. На практике на бетон в процессе эксплуатации, как правило, воздействуют многокомпонентные агрессивные среды, поэтому четкое разделение их невозможно.

Соли, кислоты, щелочи, растворенные в воде, рассматривают как неорганические, сюда же могут быть отнесены водорастворимые оксиды.

При классификации органических агрессивных сред важно учитывать такое их качество, как отношение к воде. Основываясь на данном критерии можно выделить следующие группы.

Первая группа – вещества, которые не взаимодействуют с цементным камнем и не растворяются в воде. Среди них можно выделить три подгруппы:

- жидкости, имеющие низкую температуру замерзания (агрессивность их по отношению к бетону весьма незначительная);
- вещества, температура плавления которых равна температуре, в которой эксплуатируется бетонная конструкция (при этой температуре вещества превращаются в жидкость и проникают в поровое пространство бетона);
- вещества, отличающиеся способностью легко насыщать пористые тела, самопроизвольно полимеризоваться в поровом пространстве со значительным увеличением объема (речь идет о ненасыщенных углеводородах).

Вторая группа – вещества, органического происхождения, обладающие способностью растворяться в воде. Однако они не вступают во

взаимодействие с цементным камнем. Среди таких веществ выделяется две подгруппы:

- твердые органические вещества при условии воздействия на бетон в виде насыщенного водного раствора, имеющего высокую агрессивность по отношению к бетону;

- органические жидкости, у которых агрессивность напрямую зависит от вида адсорбции поверхности цементного камня.

Третья группа - это органические вещества, вступающие в активное химическое взаимодействие с цементным камнем. Среди них можно выделить следующие виды:

- вещества хорошо растворимые в воде (как правило, степень их агрессивности по отношению к бетону напрямую зависит от степени их растворимости в воде);

- почти нерастворимые в воде органические жидкости (их особая агрессивность обусловлена проникающей и смачивающей способностью);

- твердые вещества, которые почти нерастворимы в воде, но, если в твердом виде они не агрессивны по отношению к бетону, то в случае растворения в воде проявляют агрессию как вещества указанных выше подгрупп.

Наиболее значимым с практической точки зрения является разделение агрессивных сред на твердые, жидкие и газообразные, т.е. с учетом их агрегатного состояния.

Под жидкими агрессивными средами понимают органические жидкости, а также их растворы, кроме того различные водные растворы коррозионно-активных веществ. Степень их активности напрямую зависит от концентрации в них коррозионного элемента. В таблице 2 [10] приведена информация о степени воздействия на бетон различных агрессивных по воздействию жидкостей в зависимости от их концентрации в растворе.

Таблица 2 – Жидкие среды, агрессивные в отношении к бетону

Наименование	Концентрация, г/л	Агрессивность по отношению к ЖБК следующей плотности		
		нормальной	повышенной	особо
1	2	3	4	5
Водный раствор неорганических веществ				
Азотная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Азотнокислый аммоний	более 100	3	3	3
	20 ... 100	3	3	2
	5 ... 20	2	2	1
Азотнокислый кальций	концентрированный раствор	1	0	0
Гидроксид аммония	концентрированный раствор	1	0	0
Гидроксид кальция	концентрированный раствор	0	0	0
Гидроксид калия	более 200	3	3	3
	150 ... 200	3	3	2
	100 ... 150	3	2	1
	75 ... 1000	2	1	0
	менее 75	0	0	0
Гидроксид натрия	более 250	3	3	3
	175 ... 250	3	3	2
	140 ... 175	3	2	1
	90 ... 140	2	1	0
	менее 90	0	0	0
Роданистый натрий	более 100	2	2	1
	20 ... 100	1	1	2
Серная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Сернокислый алюминий	более 5	3	3	3
Сернокислое железо	более 5	3	3	3
Сернокислый аммоний	более 5	3	3	3
Сернокислый калий	боле 5	3	3	3
Сернокислый кальций	концентрированный раствор	3	2	2
Сернокислый магний	более 5	3	3	3
Сернокислый натрий	более 5	3	3	3
Соляная кислота	не менее 0,05	3	2	1

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Углекислый аммоний	концентрированный раствор	1	0	0
Угольная кислота	не менее 0,04	2	1	0
	0,01 ... 0,04	1	0	0
	более 0,1	3	3	3
	0,05 ... 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	0	1
Фосфорная кислота	более 0,1	3	3	3
	0,05 ... 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	0	0
Фосфорнокислый аммоний	концентрированный раствор	0	0	0
Фосфорнокислый натрий	то же	0	0	0
Фтористоводородная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Хлористый алюминий	более 15	3	3	3
	5 ... 15	2	2	1
	2 ... 5	1	1	0
Хлористый аммоний	более 15	3	3	3
	5 ... 15	3	3	2
	1 ... 5	3	2	2
Хлористое железо	более 15	3	3	3
	5 ... 15	2	2	1
	2 ... 5	1	1	0
Хлористый калий	более 100	3	2	2
	20 ... 100	2	1	1
	5 ... 20	1	0	0
Хлористый кальций	более 100	3	3	3
	20 ... 100	3	2	2
	5 ... 20	2	2	1
	1 ... 5	1	1	0
Хлористый магний	более 15	3	3	3
	5 ... 15	2	2	1
	2 ... 5	1	1	0
Хлористая медь	более 15	3	3	3
	5 ... 15	3	2	2
	2 ... 5	2	2	1
Хлористый натрий	более 100	2	2	1
	20 ... 100	1	1	0
Хромовая кислота	не менее 0,05	3	3	3

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Вещества органического происхождения				
Адипиновая кислота (водный раствор)	концентрированный раствор	3	3	3
Ацетон	-	1	0	0
Бензол	-	1	0	0
Бензолсульфокислота (водный раствор)	не менее 0,05	3	3	3
Фосфорная кислота	более 0,1	3	3	3
	0,05 ... 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	0	0
Фосфорнокислый аммоний	концентрированный раствор	0	0	0
Фосфорнокислый натрий	то же	0	0	0
Фтористоводородная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Хлористый алюминий	более 15	3	3	3
	5 ... 15	2	2	1
	2 ... 5	1	1	0
Хлористый аммоний	более 15	3	3	3
	5 ... 15	3	3	2
	1 ... 5	3	2	2
Хлористое железо	более 15	3	3	3
	5 ... 15	2	2	1
	2 ... 5	1	1	0
Хлористый калий	более 100	3	2	2
	20 ... 100	2	1	1
	5 ... 20	1	0	0
Хлористый кальций	более 100	3	3	3
	20 ... 100	3	2	2
	5 ... 20	2	2	1
	1 ... 5	1	1	0
Хлористый магний	более 15	3	3	3
	5 ... 15	2	2	1
	2 ... 5	1	1	0
Хлористая медь	более 15	3	3	3
	5 ... 15	3	2	2
	2 ... 5	2	2	1
Хлористый натрий	более 100	2	2	1
	20 ... 100	1	1	0
Хромовая кислота	не менее 0,05	3	3	3



Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Вещества органического происхождения				
Адипиновая кислота (водный раствор)	концентрированный раствор	3	3	3
Ацетон	-	1	0	0
Бензол	-	1	0	0
Бензолсульфокислота (водный раствор)	не менее 0,05	3	3	3
Бромбензол	-	1	0	0
Бутиловый спирт	-	1	0	0
Бутиролактон	-	2	2	1
Валериановая кислота	-	3	3	3
Винная кислота	более 0,1	3	3	3
	0,05 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	0	0
Гептан	-	0	0	0
Гептиловый спирт	-	1	0	0
Глицерин (водный раствор)	не менее 2	2	2	1
Декан	-	0	0	0
Диметилформамид (водный раствор)	более 50	3	2	2
	20 ... 50	2	2	1
Дихлорбутен	-	2	2	1
Дихлорэтан	-	0	0	0
Дициандиамид (водный раствор)	концентрированный раствор 20 <sup>0</sup> С	1	1	0
	концентрированный раствор 50 <sup>0</sup> С	2	2	1
Каприловая кислота	-	3	3	2
Капроновая кислота	-	3	3	2
Карбамид (водный раствор)	более 150	2	2	1
	50 ...150	1	1	0
Ксилол	-	1	0	0
Лимонная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Масляная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Меланин (водный раствор)	концентрированный раствор 20 <sup>0</sup> С	1	0	0
	концентрированный раствор 50 <sup>0</sup> С	2	2	1

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Метакриловая кислота	более 0,01	3	3	3
	0,05 ... 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	1	0
Метиловый спирт	-	1	0	0
Бромбензол	-	1	0	0
Бутиловый спирт	-	1	0	0
Бутиролактон	-	2	2	1
Валериановая кислота	-	3	3	3
Винная кислота	более 0,1	3	3	3
	0,05 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	0	0
Гептан	-	0	0	0
Гептиловый спирт	-	1	0	0
Глицерин (водный раствор)	не менее 2	2	2	1
Декан	-	0	0	0
Диметилформамид (водный раствор)	более 50	3	2	2
	20 ... 50	2	2	1
Дихлорбутен	-	2	2	1
Дихлорэтан	-	0	0	0
Дициандиамид (водный раствор)	концентрированный раствор 20 <sup>0</sup> С	1	1	0
	концентрированный раствор 50 <sup>0</sup> С	2	2	1
Каприлова кислота	-	3	3	2
Капроновая кислота	-	3	3	2
Карбамид (водный раствор)	более 150	2	2	1
	50 ...150	1	1	0
Ксилол	-	1	0	0
Лимонная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Масляная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Меланин (водный раствор)	концентрированный раствор 20 <sup>0</sup> С	1	0	0
	концентрированный раствор 50 <sup>0</sup> С	2	2	1
Метакриловая кислота	более 0,01	3	3	3
	0,05 ... 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	1	0
Метиловый спирт	-	1	0	0

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Молочная кислота (водный раствор)	не менее 0,05	3	3	3
Монохлоруксусная кислота (водный раствор)	не менее 0,05	3	3	3
Муравьиная кислота (водный раствор)	не менее 0,05	3	3	3
Нитробензол	-	1	0	0
Октан	-	0	0	0
Олеиновая кислота	-	3	2	2
Пальметиновая кислота	-	2	2	1
Пеларгиновая кислота	-	3	2	2
Себациновая кислота (водный раствор)	концентрированный раствор 20 <sup>0</sup> С	1	0	0
	концентрированный раствор 50 <sup>0</sup> С	2	2	1
Стеариновая кислота	-	2	2	1
Стирол	-	1	1	0
Тетрагидрофуран	-	2	1	1
Толуол	-	1	0	0
Уксусная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Фенол (водный раствор)	концентрированный раствор	2	2	2
Формальдегид (водный раствор)	более 50	2	2	1
	20 ... 50	1	1	0
Фруктоза (водный раствор)	более 1	2	1	1
	0,1 ... 1	1	1	0
Фталевая кислота (водный раствор)	концентрированный раствор 20 <sup>0</sup> С	2	1	1
	концентрированный раствор 50 <sup>0</sup> С	3	3	2
Хлорбензол	-	1	0	0
Хлорбутадиеп	-	3	3	2
Четыреххлористый углерод	-	0	0	0

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Щавелевая кислота (водный раствор)	более 0,1	3	3	3
	0,05 ... 0,1	2	2	1
	менее 0,05	1	1	0
Энантовая кислота	-	3	3	2
Этиленглицоль (водный раствор)	не менее 2	2	2	1
Этиловый спирт	-	1	0	0
Яблочная кислота	не менее 0,05	3	3	3
Производные нефти				
Бензин	-	0	0	0
Дизельное топливо	-	1	1	0
Керосин	-	1	1	0
Мазут	-	2	1	1
Минеральные масла	-	1	1	0
Сырая нефть	-	2	1	1
Продовольственные продукты				
Вино и его производные	-	2	2	1
Жиры животного происхождения	-	3	2	2
Растительное масло	-	2	2	1
Кисломолочные продукты	-	2	1	1
Пиво	-	2	2	1
Овощные и фруктовые соки	-	2	1	1

Агрессивность водных растворов напрямую зависит от их кислотности. В таблице 3 приведена зависимость агрессивности воздействия от уровня Ph среды.

Таблица 3 – Водные растворы и их агрессивность в зависимости от рН

рН раствора	Степень агрессивности в отношении к бетону		
	нормальной плотности	повышенной плотности	особо плотному
6,5 ... 5	1	0	0
5 ... 4	2	1	0
4 ... 3,5	3	2	1
3,5 ... 3	3	3	2
менее 3	3	3	3

Если говорить о твердых агрессивных средах, то следует отметить, что они проявляют свою агрессивность по отношению к бетону только в случае увлажнения до образования раствора, т.е. в случае образования жидких агрессивных сред. Вода для увлажнения может поступать как за счет прямого воздействия, так и за счет поглощения влаги из воздуха. Каждое вещество имеет свою собственную способность впитывать влагу и на определенной стадии превращаться в раствор. Речь идет о гигроскопичности вещества. Каждое твердое химическое вещество имеет такую характеристику как точка гигроскопичности.

Из наиболее часто встречающихся агрессивных веществ в твердом агрегатном состоянии стоит отметить минеральные удобрения. По степени их агрессивности по отношению к бетону можно выделить следующие типы.

Первая группа – это наиболее опасные вещества. Они при любых условиях впитывают влагу, превращаясь в растворы, активно воздействующие на бетон. Речь идет о таких веществах, как нитрофоска, селитра и т.п.). При возведении зданий, в которых планируется хранение таких веществ, обязательно должна быть продумана специальная защита бетона.

К другой группе могут быть отнесены менее активные вещества. Свою агрессивность по отношению к бетону они проявляют только при определенной температуре или влажности окружающего воздуха.

Одним из самых агрессивных веществ является кристаллический фенол. В твердом агрегатном состоянии он еще более агрессивен, чем его водный

раствор. При влажности воздуха более 60% и температуре окружающей среды выше 25<sup>0</sup>С разрушение бетонной балки сечением 7x7 см происходит менее чем за сутки.

Третья группа – наиболее безопасные с точки зрения воздействия на бетон вещества. Они не проявляют агрессию ни при каких условиях.

Агрессивные вещества в газообразном агрегатном состоянии – это содержащие концентрацию агрессивных веществ пары и газы. В зависимости от того насколько насыщен агрессивным агентом пар или газ, и в зависимости от степени влажности выделяют группы агрессивных газообразных веществ. В процесс коррозионного разрушения бетона под воздействием агрессивных газов выделяют несколько этапов.

Изначально агрессивные агенты газообразных веществ проникают в бетон через поры. Они насыщают его активным агентом, концентрируясь и превращаясь в жидкость

Затем происходит взаимодействие агрессивных агентов и составляющих частей цементного камня. Происходит разрушение защитных слоев бетона. Ионы газовых агентов, активно диффузируя, проникают в цементный камень.

Проникнув внутрь, агрессивные вещества воздействуют на арматуру, вызывая ее коррозию. Продукты коррозии, увеличиваясь в объеме, создают повышенные напряжения и разрушают его.

В таблицах 4 и 5 представлены классификация агрессивных газов и их активность по отношению к бетону с точки зрения возникновения коррозии [19].

Однако следует отметить, что отрицательное воздействие газообразных агрессивных веществ на бетон не настолько опасно с точки зрения коррозии, как воздействие агрессивных жидкостей.

Таблица 4- Агрессивные газы и их группы

Газ	Концентрация в группах			
	А	Б	В	Г
Углекислый	до 1000	более 1000	-	-
Сернистый ангидрит	0,5	0,5 ... 10	10 ... 200	200 ... 1000
Фтористый водород	0,02	0,02 ... 0,05	0,05 ... 10	10 ... 50
Сероводород	0,1	0,1 ... 10	10 ... 200	200 ... 1000
Оксид азота	0,1	0,1 ... 5	5 ... 100	100 ... 500
Хлор	0,1	0,1 ... 1	1 ... 20	20 ... 100
Хлористый водород	0,05	0,05 ... 5	5 ... 100	100 ... 500

Таблица 5 – Газ и их коррозионные активности

Относительная влажность воздуха	Группа газов	Степень агрессивности по отношению	
		к бетону	к железобетону
до 60	А	0	0
	Б	0	0
	В	0	0
	Г	0	0
60 ... 75	А	0	0
	Б	0	1
	В	0	2
	Г	1	3
более 75	А	0	1
	Б	0	2
	В	1	3
	Г	2	3

Для защиты бетона от коррозии проводится целый ряд мероприятий, которые важно начинать еще на этапе конструирования. Так же важны эксплуатационно-профилактические мероприятия и применение различных видов защиты.

На этапе конструирования важно учитывать рациональную форму будущей конструкции [17]. Железобетонная конструкция должна быть такой формы, чтобы она позволяла избежать накапливания на ее поверхности жидкости и органических веществ, способных при скоплении и длительном нахождении на поверхности проникнуть внутрь пористой структуры [18]. Для

этого необходимо, чтоб был определенный уклон, создавались дополнительные стоки [20].

Кроме того, при выборе материалов для бетона важно учитывать, в каких условиях будет в дальнейшем эксплуатироваться конструкция.

Если, например, конструкция будет использоваться в местах со сложными климатическими условиями, сильными морозами или резкими перепадами температур, то важно учесть это при выборе вяжущего. Тот или иной тип вяжущего может значительно улучшить такую характеристику как морозостойкость. Большинство производителей используют различные марки портландцемента. Марка портландцемента также влияет на такую характеристику бетона как сульфатостойкость.

В случае, если в дальнейшем бетон будет подвергаться сульфатной агрессии, выбор портландцемента очень важен. Зависимость коррозионной стойкости бетона от типа, вяжущего приведена в таблице 6 [1].

Однако следует отметить, что в случае эксплуатации бетонной конструкции в кислотных средах, важно учесть, что портландцементы не стойки к кислоте. В таком случае очень важен выбор заполняющего. Предпочтительнее использовать щебень из изверженных пород.

Таблица 6 - Влияние вяжущего на коррозионную стойкость бетона

Вид коррозионной стойкости	Влияние на стойкость по сравнению с рядовым портландцементом				
	Портландцемент с повышенным содержанием ТКС	Портландцемент с повышенным содержанием ДКС	Сульфатостойкий портландцемент	Пуццолановый и шлакопортландцемент	Глиноземистый цемент
1	2	3	4	5	6
Морозостойкость	повышает	не влияет	повышает	несколько понижает	повышает
Сульфатостойкость	несколько понижает	несколько повышает	значительно повышает	повышает	значительно повышает
Солестойкость	не влияет	не влияет	несколько повышает	>>	значительно повышает



Продолжение таблицы 6

Кислотостойкость	понижает	несколько повышает	несколько повышает	несколько повышает	>>
Щелочестойкость	повышает	несколько понижает	не влияет	понижает	значительно понижает
Бензо-, маслостойкость	>>	не влияет	несколько повышает	несколько понижает	значительно повышает
Защитное действие по отношению к стальной арматуре	>>	понижает	не влияет	несколько понижает	значительно повышает

Уже в период эксплуатации железобетонных конструкций важно также проводить защитные мероприятия, профилактического характера. Важно не допускать скопления на поверхности бетона агрессивных сред, периодически удалять их в случае скопления. Кроме того, необходимо организовать интенсивную вентиляцию в местах агрессивного воздействия на бетон газовоздушных сред. В местах воздействия агрессивных жидкостей важно проводить герметизацию бетона.

В целях улучшения защиты железобетонных элементов от коррозии важно выполнять следующие мероприятия:

- важно использовать бетон высокого качества с учетом тех условий, в которых будет эксплуатироваться конструкция, т.к. это позволит защитить от проникновения агрессивных веществ внутрь тела цементного камня к арматуре;
- использовать для арматуры металлы высокого качества, улучшать их характеристики для защиты коррозии арматуры;
- создавать дополнительные защитные барьеры для проникновения агрессивных веществ к арматуре, например, в виде пленки.

Защита железобетонных конструкций от возникновения и развития коррозии – одна из самых важных проблем как на этапе создания бетона, так

и на этапе эксплуатации железобетонных конструкций. Важно выделять первичную и вторичную защиту бетона от коррозии.

На этапе первичной защиты бетона важно учитывать будущие условия эксплуатации, и в соответствии с этим вводить в него те или иные улучшающие добавки. Использование их позволяет изменить минералогический состав бетона. В зависимости от целей применения бетона могут быть введены в качестве добавки, например, стабилизирующие и водоудерживающие, химические и пластифицирующие модификаторы. Следует отметить, что именно такая, первичная защита является наиболее важной и эффективной, т.к. ориентируясь на условия эксплуатации цементного камня, подбирают оптимальный для данных условий состав.

Например, для цементов, которые планируют использовать в условиях сульфатсодержащих вод, уменьшают содержание  $C_3S$ .

Часто используют пуццоланизацию. В данном случае, к портландцементу добавляют кислые гидравлические добавки, которые содержат активный кремнезем.



Образовавшийся гидросиликат кальция устойчивее, чем обычный  $Ca(OH)_2$ .

Введение в состав бетона химических добавок весьма эффективный метод улучшения его характеристик. Например, применение добавок повышает плотность бетона. Соответственно, агрессивные вещества уже не так быстро проникают внутрь цементного камня, в плотном бетоне снижается скорость их перемещения. Кроме того, арматура в таком бетоне тоже менее подвержена коррозии.

Химические добавки – это очень мощное средство в борьбе с коррозией железобетонных конструкций. Они на порядок могут повысить эксплуатационные свойства бетона, т.к. позволяют снизить скорость переноса активных агрессивных веществ в теле цементного камня за счет повышения

плотности. Все это замедляет процессы коррозии. Как правило, если повысить плотность бетона на одну марку, коррозионная устойчивость бетона возрастает на порядок.

Таблица 7 - Показатели плотности бетона

Бетон	Марка по водонепроницаемости	Коэффициент фильтрации, см/с	Водопоглощение по массе, %	Водоцементное отношение (В/Ц)
Нормальной плотности	В4	$2 \cdot 10^{-9} \dots 7 \cdot 10^{-9}$	4,7 ... 5,7	0,55 ... 0,60
Повышенной плотности	В6	$6 \cdot 10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-9}$	4,2 ... 4,7	0,45 ... 0,55
Особо плотный	В8	$1 \cdot 10^{-9} \dots 6 \cdot 10^{-9}$	менее 4,2	менее 0,45

Пластифицирующие, уплотняющие, противоморозные, гидрофобизирующие, воздухововлекающие, газообразующие, замедлители скалывания, ингибиторы коррозии арматуры – такие виды химических добавок используются наиболее часто для защиты бетона от коррозии.

Как уже отмечалось выше, для бетона важна такая характеристика как морозостойкость, напрямую зависящая от совокупного количества условно замкнутых пор в их процентном отношении к общему количеству пор в теле цементного камня [7]. Химические добавки так же могут значительно увеличить количество условно замкнутых пор, повышая тем самым степень морозоустойчивости бетона.

Если говорить о перспективности и распространенности химических добавок, то можно отметить следующие.

Из пластифицирующих добавок прежде всего следует выделить мылонафт. Данная химическая добавка состоит нерастворимых в воде натриевых солей. Использование этой добавки позволяет значительно повысить такое важное качество бетона как водонепроницаемость. Оно повышается на две марки. Кроме того, мылонафт улучшает морозостойкие

качества бетона в два раза. Также повышается устойчивость к химическому воздействию минеральных солей. Все эти качества повышают трещиностойкость бетона.

Другая перспективная добавка - сульфитно-дрожжевая бражка СДБ. Ее получают в результате переработки кальциевых солей лигносульфоновых кислот. Одним из полезных качеств, которые она придает бетону является увеличения подвижности бетонной смеси. В бетонную смесь активно вовлекается воздух, способствуя тому, что цементные зерна меньше слипаются. Эта добавка, как и выше описанная, является пластифицирующей. Как и применение мылонафта ее использование позволяет повысить на одну марку водонепроницаемость и устойчивость к воздействию растворов минеральных солей. Так же отмечается повышение морозостойкости и прочности. Использование СДБ повышает устойчивость бетона к трещинам.

Одной из самых мощных добавок, способствующих повышению морозостойкости бетона, является кремнийорганическая жидкость ГКЖ-94. Добавка образуется в процессе гидролиза этилгидросилоксана.

При взаимодействии с цементным тестом в результате химической реакции активно выделяется водород. Образуется большое количество равномерно распределенных замкнутых пор. Таким образом повышается морозостойкость в три-четыре раза. Кроме того, бетон с такой добавкой является более устойчивым к попеременному циклическому замораживанию и оттаиванию, и увлажнению, и высушиванию.

По агрегатному состоянию - это газообразная добавка. Она является гидрофобизирующей. На капилляры и стенки пор бетона оказывается активное гидрофобизирующее воздействие. В результате применения этой добавки, соответственно, значительно возрастает водонепроницаемость бетона. Кроме того, увеличивается устойчивость к воздействию растворов минеральных солей, растяжению.

Несмотря на значимость первичной защиты бетона от коррозии, вторичная защита также крайне важна. К вторичной защите относят

процедуры, связанные с антикоррозийной защитой бетона уже после изготовления бетонных конструкций, перед началом или уже в процессе эксплуатации. К таким мерам защиты могут быть отнесены:

- нанесению защитных смесей;
- нанесение различных лакокрасочных покрытий;
- облицовка плитами и т.д.

Все эти меры способствуют прежде всего гидроизоляции бетона. В этой связи также важно отметить эффективность карбонизации бетона, являющейся за счет образования защитной пленки, естественным барьером для проникновения внутрь цементного камня не только влаги, но и микроорганизмов. Образующаяся в процессе карбонизации пленка не дает проникнуть в поры бетона спорам грибков и плесени.

Для улучшения гидроизоляции бетона его покрывают различными мастиками. Одной из разновидностей такого покрытия является использование смолы в качестве защитного покрытия. Это процесс называют «смолизация» [12].

Вторичная защита бетона также важна, если предполагается использование железобетонной конструкции в особо агрессивных условиях. Например, в качестве свайного основания в сильно агрессивных грунтах. В подобных случаях применяется такой метод защиты, как пропитка. Этот процесс осуществляется с использованием химически стойких веществ, таких как метилметакрилат, стирол, битум. В ходе пропитки изделие сначала нагревают при температуре 105-120<sup>0</sup>С для того, чтобы удалить из бетона жидкую фазу. Затем изделие погружают в пропиточный состав и нагнетают давление. После извлечения изделие медленно охлаждают.

Этот метод является дорогостоящим и трудоемким, однако, в некоторых случаях это единственная возможность обеспечить долговечность изделия.

Для повышения гидрофобных свойств бетона перед нанесением ЛКМ применяют уплотняющие пропитки. Они заполняют наружный слой бетона, снижая водопоглощение.

Для защиты бетона так же широко применяются биоцидные материалы. В результате их использования химические вещества заполняют поры бетона, препятствуя тем самым проникновению внутрь микроорганизмов.

Таким образом, следует отметить, что в период эксплуатации железобетонные конструкции постоянно подвержены воздействию различных агрессивных факторов.

В данной главе рассмотрены разные типы агрессивных сред, начиная с природного воздействия на бетонные сооружения, заканчивая различными типами агрессивных сред, возникающих в результате жизнедеятельности человека: воздействия, обусловленные жизнью мегаполисов, а также работой промышленных и сельскохозяйственных предприятий.

При рассмотрении вопроса о коррозионном воздействии агрессивных сред на железобетон и способов его защиты от коррозии рассмотрение различных классификаций агрессивных сред очень важно. Наибольшее практическое значение имеет классификация по агрегатному состоянию агрессивной среды.

Наиболее агрессивными являются жидкие среды. В работе приведена таблица агрессивности жидких сред в зависимости от концентрации активного вещества и температуры, при которой осуществляется воздействие.

Твердые вещества менее агрессивны. Они, как правило, представляют собой опасность для бетона только в случае их растворения в воде.

Газообразные агрессивные вещества представляют особую опасность для арматуры. Кроме того, газообразные агрессивные среды насыщают газом поровую основу бетона, создавая в ней агрессивный раствор. В работе приведена таблица коррозионной активности агрессивных газов по отношению к бетону.

В работе рассмотрены различные способы защиты бетона от коррозионного воздействия. Выяснено, что вопрос о защите бетона от коррозии важно решать еще на этапе конструирования, учитывая конструкционную форму бетонной поверхности, а также возможности

использования бетона, в состав которого входят те или иные улучшающие его свойства добавки, с учетом той с той среды, в которой планируется эксплуатация бетонной конструкции.

Применение различных улучшающих добавок не только способствует улучшению различных свойств бетона, например, таких, как морозоустойчивость, но и позволяет предохранить от воздействия коррозии арматуру, находящуюся внутри бетонного камня. Особенно важно использовать различные виды добавок и другие способы защиты бетона в случае, когда дальнейшая эксплуатация железобетонной конструкции планируется в экстремальных условиях.

## **2 Оценка степени коррозионного поражения эксплуатируемых железобетонных конструкций покрытий**

Характерной особенностью крупного производственного комплекса АО «АвтоВаз» является значительная протяженность (площадь) объектов, широкая номенклатура и большое количество примененных строительных элементов, разнообразие различных режимов и технологий в цехах, сблокированных в одном здании.

Под одной крышей завод объединяет в себе различные по характеру эксплуатационных воздействий производства: сборно-кузовное, механосборочное, цех покраски и др. Такая специфика производства предъявляет повышенные требования к обеспечению эксплуатационной надежности [21], анализу воздействий газовой среды в зависимости от технологических процессов на материалы конструкций и оценки технического состояния строительных конструкций для планирования, текущего и капитального ремонтов. Для оценки степени коррозионного поражения железобетонных конструкций покрытий, эксплуатируемых в течение разработана программа исследований, которая включала:

- анализ состава газовой среды в производствах завода,
- оценку степени агрессивности воздействия на бетон газовой среды для нормального и влажного (мокрого) режимов помещений,
- определение глубины нейтрализации бетона защитного слоя в конструкциях,
- прогноз сроков защитного действия бетона, обеспечивающего эксплуатационную надежность конструкций.

Руководствуясь исследованиями профессора Ерышева В.А. с участием лаборатории коррозии НИИЖБ, определены параметры коррозионного поражения бетонов эксплуатируемых железобетонных ферм покрытий главного корпуса «АвтоВаз». Состав газовой среды и концентрация их



компонентов в корпусах завода, где проводились исследования, представлен в табл. 8.

Степень агрессивного воздействия сред на бетон и железобетон приведена для нормального и влажного (мокрого) влажностных режимов помещений (над чертой для нормального режима, под чертой для влажного и мокрого). При указанной в табл. 8 концентрации неорганические газы: монооксид и диоксид азота, диоксид серы и хлороводород неагрессивны по отношению к бетону с маркой по водонепроницаемости W4 как при нормальном, так и влажном режиме помещений. Органические компоненты сред агрессивны по отношению к бетону с маркой по водонепроницаемости W4 только при влажном и мокром режиме помещений и не агрессивны по отношению к бетону с маркой W6. По отношению к железобетону среды, представленные в табл. 8, слабоагрессивны по отношению к арматуре железобетонных конструкций при нормальном режиме и среднеагрессивны по отношению к арматуре железобетонных конструкций при нормальном режиме и среднеагрессивны при влажном и мокром режиме помещений. Косвенной характеристикой проницаемости бетона является водопоглощение. Параметры водопоглощения, определенные на образцах кернах в лабораторных условиях по ГОСТ 12730.3–78 в соответствующих производствах, представлены в табл. 8. Бетон конструкций при водопоглощении по массе от 2,8 до 4,44% имеет марку бетона по водонепроницаемости от W8 до W6. Органические компоненты сред, представленные в табл. 8, для этих марок бетона по водонепроницаемости являются неагрессивными.

Таблица 8 – Результаты исследований

Цех и место отбора пробы, номер пробы	Вид и концентрация, мг/м <sup>3</sup> , компонентов среды	Степень воздействия на конструкции			Водопоглощение, % по массе	Глубина нейтрализации бетона, мм
		Бетон с маркой по водопроницаемости		Железобетон		
		W4	W6			
1	2	3	4	5	6	7
Сборочно-кузовное производство, корпус 02/В, Проба № 1	Диоксид азота от 0,1 до 0,9 Серная кислота – следы растворимые фториды от 0,15 до 0,31 Масляный туман до 2,1	Н. Сл.	Н. Н.	Сл. Ср.	4,44	10–12
Цех окраски, Корпус 01/1, Проба 2	Ксилол до 9,7, бутилацетат от 8,64 до 32,31, бутиловый сольвент от 7,9 до 15,83, ацетон от 0,15 до 20, бутил-целлозоль от 15,2 до 20,2	Н. Сл.	Н. Н.	—	3,84	5–7
Корпус 80, Проба № 3	Аммиак до 20	Н. Н.	Н. Н.	Сл. Ср.	4,31	1–10
Цех металлообработки, корпус 02/А, Проба № 4	Ксилол от 40,5 до 94,2 Углеводород от 15,4 до 20,4 Сольвент от 16,0 до 128,6 Диоктилфталат от 1,3 до 2,2 Винилхлорид 0,38–0,43 Бутилацетат от 3,0 до 3,6	Н. Сл.	Н. Н.	—		3–4
Механо-сборочное производство, корпус 18, Проба № 6	Бутилацетат до 4,5, углеводород от 4,6 до 264, серная кислота от 0,14 до 0,21 Диоксид серы до 1,5 Формальдегид до 0,25 Хлорводород от 2,0 до 7,8	Н. Сл.	Н. Н.	Ср. С.	4,47	2–4
Корпус 15/3, Проба № 7	Диоксид азота до 0,75 Аммиак до 4,9, хлор до 0,1, диоксид серы 1,5	Н. Н.	Н. Н.	Сл. Ср.	3,28	8–9

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7
Корпус 04/А, Проба № 9	Аммиак от 0,1 до 15, диоксид азота от 0,1 до 0,48, диоксид азота от 0,2 до 0,3 фтороводород от 0,15 до 0,61	Н. Н.	Н. Н.	Сл. Ср.	2,80	1–6
Корпус 01/25, Проба № 10	Диоксид азота до 0,2 Аммиак до 2,5, диоксид серы до 1,5, хлор до 1,0	Н. Н.	Н. Н.	Сл. Ср.	4,37	1–2

Примечание: н. – неагрессивная, сл. – слабоагрессивная, ср. – среднеагрессивная, с.–сильноагрессивная среды; над чертой – для нормального режима, под чертой – для влажного или мокрого.

В определенных условиях среды возможна коррозия стальной арматуры железобетонных конструкций. В нормальном плотном бетоне стальная арматура длительное время защищена от коррозии [9]. Это обусловлено высокой щелочностью паровой влаги бетона. Щелочность паровой влаги бетона обусловлена гидратацией минералов  $C_3S$  и  $C_2S$ , протекающей с образованием гидроксида кальция  $Ca(OH)_2$ , а также образованием легкорастворимых гидроксидов натрия и калия, которые в небольшом количестве присутствуют в цемент в виде солей сульфатов натрия и калия. Величина рН паровой влаги бетона находится в пределах 12,5–13,5. Со временем вследствие воздействия углекислого газа воздуха происходит карбонизация защитного слоя бетона, вызывающая снижение щелочности жидкой фазы в бетоне до 9 и менее. В присутствии хлорсодержащих соединений в агрессивной среде возможно накопление в бетоне хлоридов. При снижении щелочности паровой влаги бетона и появления хлоридов в бетоне возникают условия для развития процессов коррозии арматуры.

Глубина нейтрализации бетона в конструкциях определялась на образцах–кернах цилиндрических форм, высверленных из конструкций, в лабораторных условиях. При испытании образцы бетона раскалывались по

продольной оси и поверхность бетона обрабатывали раствором фенолфталеина как индикатора, определяющего наличие карбонизированного слоя. Поскольку на снижение щелочности бетона помимо углекислого газа вызывается также действием других кислых газов: монооксида и диоксида азота, диоксида серы и хлороводорода, можно говорить не о карбонизации, а более общем случае нейтрализации бетона кислыми газами.

Анализ результатов свидетельствует, что наибольшую толщину нейтрализованного слоя бетона 12 мм в сборочно–кузовном производстве корпуса 02/В (проба 1) и в корпусе 15/3 (проба 7).

Прогноз сроков защитного действия. Толщину нейтрализованного слоя во времени можно определить по формуле  $\Gamma_p = A\sqrt{\tau}$ , где  $\Gamma_p$  – глубина нейтрализации бетона, мм,  $A$  – константа коррозионного процесса, мм·год<sup>1/2</sup>,  $\tau$  – время воздействия коррозионно активной среды на бетон. За 32 года максимальная глубина нейтрализации бетона составила 12 мм. Константа скорости процесса равна

$$A = \frac{12}{\sqrt{32}} = \frac{12}{\sqrt{32}} = 2,12 \text{ мм}\cdot\text{год}^{1/2}$$

При толщине защитного слоя бетона 50 мм арматура будет находиться в пассивном состоянии в течение нескольких десятилетий.

Для железобетонных и особенно напряженных конструкций опасно накопление хлоридов в бетоне. В отечественных нормах отсутствует показатель критического накопления хлоридов в бетоне, опасных по отношению к стальной арматуре. Однако многочисленными обследованиями железобетонных конструкций [1] установлено, что для конструкций с ненапрягаемой арматурой безопасным является количество хлоридов 0,5%, а для предварительно напряженных конструкций – 0,1% от массы цемента. При исследовании образцов, отобранных из конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия газовой среды, имеющей в составе хлор и хлоридсодержащие вещества: винилхлорид, хлор, хлороводород, обнаружено,

что в наружном слое имеется повышенное количество хлоридов от 0,045 до 0,37% от массы цемента. Ранее выполненными исследованиями установлено, что накопление солей в бетоне происходит пропорционально корню квадратному из времени. При дальнейшей эксплуатации конструкций покрытия, например к 50 годам, при наихудшем варианте накопления хлоридов на поверхности (0,37%) на сегодняшний день, будет составлять  $0,37 \frac{\sqrt{50}}{\sqrt{32}} = 0,462\%$  от массы цемента. Из решения уравнения Фика для случая диффузии хлоридов из полуограниченной окружающей среды в полуограниченное тело бетона определяем эффективный коэффициент диффузии хлоридов в бетоне –  $0,344 \times 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с. Столь низкое значение обусловлено малой влажностью бетона и соответственно малой степенью заполнения пор водой, по которым хлориды диффундируют в глубь бетона. Исследования показали, что в ближайшие десятилетия действия хлоридов на стальную арматуру в конструкциях покрытий не может вызвать коррозии арматуры. Сказанное относится к случаю, если состав агрессивной среды в цехах не изменится, а увлажнение бетона будет исключено (отсутствие протечек в кровле).

В ходе исследований, рассмотренных в данной главе, пришли к следующим выводам.

Учитывая исследования, проведенные профессором Ерышевым В.А. с участием лаборатории коррозии НИИЖБ, были определены параметры коррозионного поражения бетонов эксплуатируемых железобетонных ферм покрытий главного корпуса «АвтоВаз».

Установлено, что бетон конструкций покрытий в исследованных корпусах АО «АвтоВаз» имеет марку по водонепроницаемости W6-W8.

Газовоздушные среды, состав которых указан в табл. 8, неагрессивны по отношению к бетонам указанной марки по водонепроницаемости при нормальном влажностном режиме помещений и даже при мокром режиме эксплуатации.

За время эксплуатации конструкций покрытий - глубина нейтрализации бетона не превысила 12 мм. Согласно выполненному расчёту в течение 100 лет глубина нейтрализации бетона составит 2 см, что не представляет опасности для стальной арматуры, имеющей защитный слой бетона 5 см.

Анализ бетона на содержание сульфатов показывает, что количество их в бетоне соответствует уровню содержания сульфатов в цементе. За время эксплуатации существенного поглощения диоксида серы бетоном не произошло.

Показано, что количество хлоридов в бетоне мало отличается от их фонового содержания в бетоне. В худшем случае содержание хлоридов в поверхностном слое бетона составило 0,37% от массы цемента. Расчетом диффузии хлоридов в бетоне показано, что к 50 годам эксплуатации в зоне расположения арматуры при толщине защитного слоя 5 см заметного изменения содержания хлоридов (выше фонового) не произойдет.

На основании сказанного можно сделать общий вывод, что бетон в железобетонных конструкциях покрытий не подвергается коррозионному повреждению и полностью сохраняет защитное действие по отношению к стальной арматуре.

### **3 Методика расчета на прочность железобетонного элемента поврежденного коррозией бетона с использованием криволинейных диаграмм состояния бетона**

Одним из самых приоритетных способов расчета железобетонных конструкций является деформационный метод. Следует отметить, что при расчётах железобетонных конструкций приоритетным является высокая точность и надежность результатов. Данный метод позволяет достичь таких результатов в оценке прочностных и деформационных качеств конструкций, приведено в работах [3]-[6] и [8]. Кроме того, при проектировании может быть использована и другая методика. Речь идет о методике расчета согласно метода предельных состояний.

Рассмотрим преимущества именно деформационного метода расчета, приведенные в работах [27]-[31]:

- возможность проверки требований предельных состояний, как первой, так и второй групп, с единой позиции;
- реальная оценка существующих элементов, их состояния;
- возможность использования при программировании алгоритма, используемого при вычислении.

В современной теоретической литературе рассматривают деления деформационных моделей на основные и расчетные [13], [15] и [26].

В основных (криволинейных) диаграммах отображаются реальные состояния бетона с учетом его деформирования в результате возникшего напряжения. Эти диаграммы максимально отражают реальную работу конструкции (рисунок 1). Для создания такой диаграммы проводится экспериментальное исследование. На диаграмме отражены результаты каждого исследования в виде определенной точки.

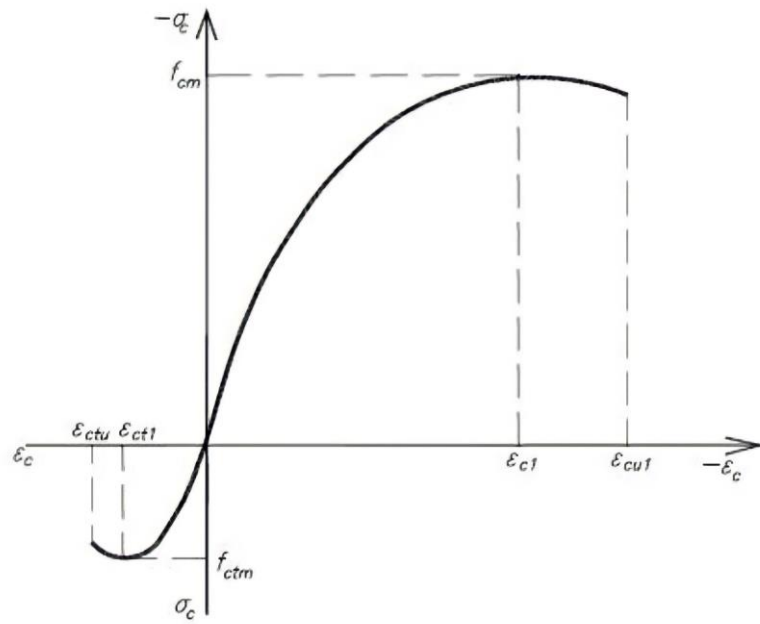


Рисунок 1 – Состояния бетона, отраженные на криволинейной диаграмме

Ниже приведены примеры расчетных диаграмм на рисунке 2 представлена трехлинейная диаграмма:

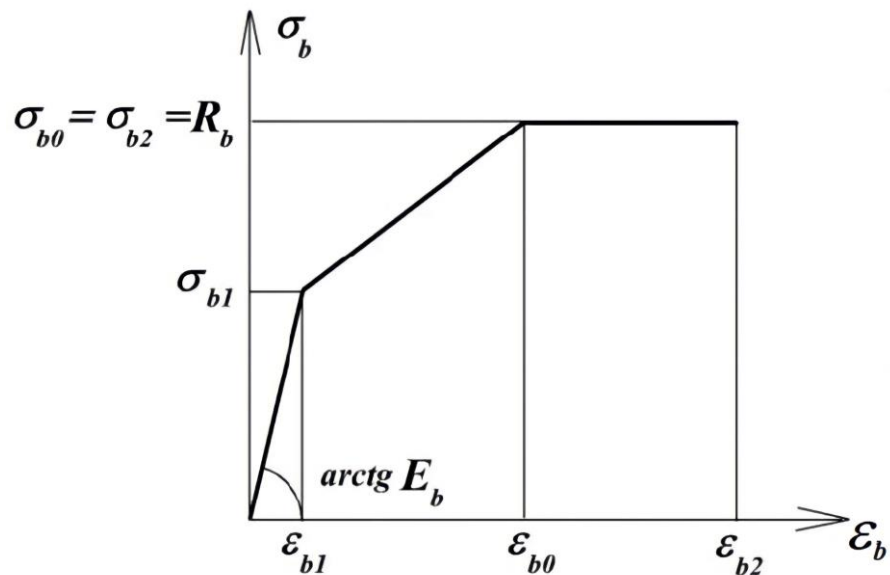


Рисунок 2 – Состояния бетона, отраженные на трехлинейной диаграмме



На рисунке 3 отображена расчетная двухлинейная диаграмма:

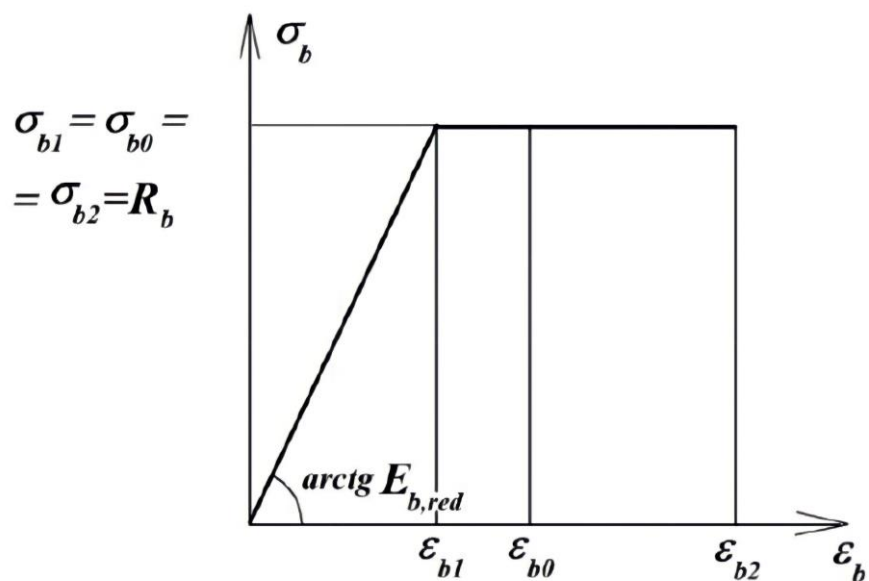


Рисунок 3 – Состояния бетона, отраженные на двухлинейной диаграмме

На рисунке 4 отображена расчетная криволинейная диаграмма:

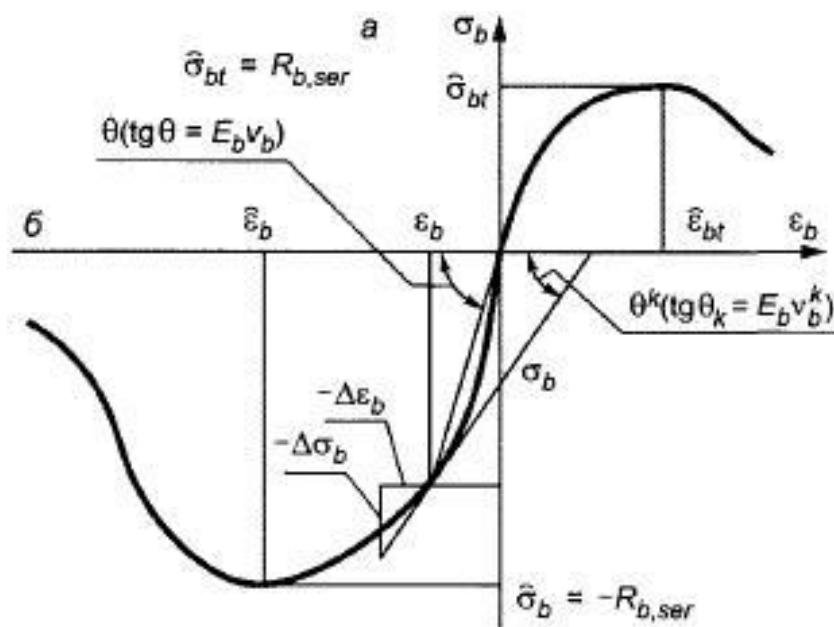


Рисунок 4 – Деформирование бетона на сжатие и растяжение отраженных в криволинейной диаграмме

Опишем построение графика.

Горизонтальная ось представляет собой значения относительных деформаций  $\varepsilon$ .

Вертикальная ось – внутренние напряжения  $\sigma$ .

Важно отметить, что при построении деформационных моделей обязательно применять основные физико-математические теории. Речь идет о теорию ползучести, упругости, пластичности.

При расчете по деформационной модели важно учитывать равновесия (в сечении элементов).

Кроме того, методика основывается на том, что любое сечение, являющееся плоским и нормальным к оси элемента, остается обязательным плоским и нормальным к его оси даже после приложения нагрузки деформации.

Следует отметить, что методика расчёта также базируется на связях между осевыми напряжениями и относительными деформациями материалов, приведено в работах [35], [36]. Они задаются как непрерывные и дискретные функции [11].

Любое нормальна сечение можно разложить на отдельные участки. На этом и основывается деформационная модель.

Зададим условие для расчета со следующим условием (5):

$$\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_{ult}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  - относительная деформация элемента от воздействия внешней нагрузки в нормальном сечении;

$\varepsilon_{ult}$  - предельное значение относительной деформации материала, выбранное для определённой диаграммы согласно [16].

При расчете следует учесть ряд положений.

Во-первых, используем уравнение равновесия:

$$M_x = \sum \sigma_{bi} A_{bi} z_{bxi} + \sum \sigma_{sj} A_{sj} z_{sxj}, \quad (6)$$

$$0 = \sum \sigma_{bi} A_{bi} z_{bxi} + \sum \sigma_{sj} A_{sj} z_{sxj}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{bi}, \sigma_{sj}$  - напряжения в центре  $i$ -того,  $j$ -того участков сечения;

$A_{bi}, A_{sj}$  - площади  $i, j$  участков сечения, мм<sup>2</sup>;

$z_{bxi}, z_{sxj}$  - координаты  $i, j$  участков сечения относительно горизонтальной оси, мм.

Выше изложенном описании напряженно-деформированного состояния в сечении перпендикулярном к продольной оси конструкции.

Во-вторых, используем линейный закон, отражающий распределения относительных деформаций материалов по высоте сечения:

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} z_{bxi}; \varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_s} z_{bsj}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_0$  - относительные деформации,

$\frac{1}{r_x}$  - кривизна продольной, 1/мм.

В-третьих, рассмотрим переход от относительных деформаций материалов к их напряжениям:

$$\sigma_{bi} = E_b \cdot \nu_{bi} \cdot \varepsilon_{bi}; \sigma_{sj} = E_s \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}, \quad (9)$$

где  $E_b, E_s$  - начальный модуль упругости материала, МПА.

$\nu_{bi}, \nu_{sj}$  - коэффициенты упругопластических деформаций материала на  $i, j$  участках сечения.

Далее введем следующее выражение, отражающее для рассматриваемого элемента связь внутренних напряжений:

$$M = D_{11} \frac{1}{r} + D_{12} \varepsilon_0, \quad (10)$$

$$0 = D_{21} \frac{1}{r} + D_{22} \varepsilon_0, \quad (11)$$

где  $D_{ij}$  - жесткостные характеристики рассматриваемого сечения определяются по следующим формулам:

$$D_{11} = \sum A_{bi} \cdot z_{bxi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{sj} \cdot z_{sxj}^2 \cdot E_s \cdot \nu_{sj}, \quad (12)$$

$$D_{12} = D_{21} = \sum A_{bi} \cdot z_{bxi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum A_{sj} \cdot z_{sxj} \cdot E_s \cdot \nu_{sj}, \quad (13)$$

$$D_{22} = \sum A_{bi} \cdot E_b \cdot v_{bi} + \sum A_{sj} \cdot E_s \cdot v_{sj}, \quad (14)$$

Следует отметить, что для выполнения расчета используется способ приближена конечного результата. Это связано с тем, что у деформационной модели нет оптимального алгоритма реализации.

Задается следующее условие. Принимаем коэффициенты упругости равными единице при начальной итерации. В начале вычисления жесткосных параметров  $D_{ij}$ .

Результатом вычисления будут данные на  $i$ -ом в сечении – это значение кривизны и относительных деформаций. Затем уточняется коэффициент упругости с учетом найденных значений по зависимости (8).

Расчет повторяем. Рассматриваем уравнение с уже уточненным модулем упругости. Другое отличие – исключение из расчета участков бетона, которые оказались в растянутой зоне в случаях, предусмотренных положениями к расчету.

Повторяем цикл. Важно следить за значениями деформаций. Если разница между ними не соответствует заданной точности, то прекращаем повторение.

Следует отметить, что стабилизация относительных деформаций и кривизны фиксируются, как, правило на первых итерациях. Однако это условие выполняется только при условии, что нагрузка не выше предельной. В противном случае наблюдается не стабилизация деформаций, а их рост.

В случае же стабилизации значений разница между относительными деформациями на рассчитываемом участке стремится к нулю в смежных итерациях.

Рассмотрим деформационный метод расчёта на прочность с использованием криволинейной диаграммы. Данный железобетонный элемент прямоугольной формы высотой  $h$  и шириной  $b$  с много рядным армированием ненапряженной арматурой: с растянутой зоне – арматура

площадью  $A_{si} (i=1...n)$ , в сжатой зоне – площадью арматуры  $A'_{si} (i=1...n)$  (рис.5).

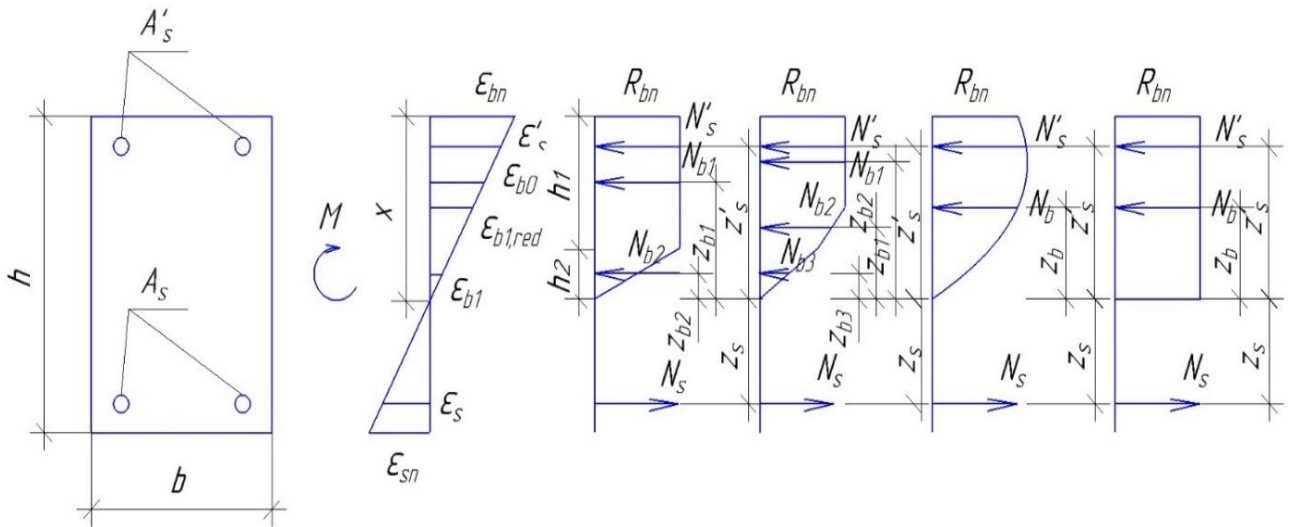


Рисунок 5 – Поперечные сечения рассматриваемого элемента. Схема напряжений, деформаций и усилий

Аналитическая зависимость криволинейных диаграмм деформирования бетона принимается в виде:

$$\varepsilon_m = \sigma_m / (E_m v_m), \quad (15)$$

$$d\varepsilon_m = \sigma_m / (E_m v_m^k),$$

где  $\varepsilon_m, \sigma_m, E_m$  – соответственно относительные деформации, напряжения, начальные модули упругости ( $d$  – знак дифференциала);  $m$  – индекс материала (для бетона  $m = b, bt$ ; для арматуры  $m = s$ );  $v_m$  – коэффициент изменения секущего модуля, определяемый по формуле

$$v_m = \hat{v}_m \pm (v_0 - \hat{v}_m) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}, \quad (16)$$

где  $v_m$  – коэффициента в вершине диаграммы ( $\sigma_m = \hat{\sigma}_m$ );

$v_0$  – начальный коэффициент изменения секущего модуля (в начале диаграммы или в начале ее криволинейного отрезка);

$\omega_1, \omega_2$  – коэффициенты, характеризующие полноту диаграммы материала,

$\omega_2 = 1 - \omega_1$ ;  $\eta$  – уровень приращения напряжений, который определяется как отношение.

$$\eta = (\sigma_m - \sigma_{m,el}) / (\hat{\sigma}_m - \sigma_{m,el}), \quad (17)$$

где  $(\sigma_m - \sigma_{m,el}) \geq 0$ ;

$\sigma_{m,el}$  – напряжения, соответствующие пределу упругости материала;

$\nu_m^c$  – коэффициент изменения касательного модуля, связанный с коэффициентом изменения секущего модуля соотношением

$$\frac{1}{\nu_m^k} = \frac{1}{\nu_m} \pm \frac{\sigma_m (\nu_0 - \hat{\nu}_m) (\omega_1 + 2\omega_2 \eta)}{2\nu_m^2 (\hat{\sigma}_m - \sigma_{m,el}) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}} \quad (18)$$

При одноосном и однородном сжатии бетона исходная диаграмма деформирования бетона (см. рисунок 4) описывается зависимостями, которые следует принимать.

Зависимость для обеих ветвей диаграммы

$$\hat{\sigma} = -R_{b,ser}; \sigma_{b,el} = 0; \hat{\nu}_b = \hat{\sigma}_b / (\hat{\epsilon}_b E_b); \eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_b, \quad (19)$$

Зависимость для восходящей ветви диаграммы

$$\nu_0 = 1; \omega_1 = 2 - 2.5\hat{\nu}_b, \quad (20)$$

Зависимость для нисходящей ветви диаграммы

$$\nu_0 = 2.05\hat{\nu}_b; \omega_1 = 1.95\hat{\nu}_b - 0.138 \quad (21)$$

Рассмотрим расчет на прочность изгибаемого железобетонного элемента симметричным относительно плоскости действия момента прямоугольным сечением.

Размеры сечения  $h \times b = 18 \times 12$  см.

В сжатой и растянутой зонах по два стержня расположена ненапрягаемая арматура класса А400 диаметром 8 мм.

Класс бетона В15.

Расчет на прочность производится с использованием криволинейной нормируемой диаграммы бетона. Алгоритм расчета для класса бетона В15 представлен в табличной форме (таблица 9).

В первой строке назначаем для бетона и арматуры предельные деформации  $\varepsilon_{b,max}$  равной 0,0035 и  $\varepsilon_{s,max}$  равной 0,025. Рассчитываются кривизна  $\chi$ , высота сжатой зоны  $x$ , деформации арматуры в сжатой зоне  $\varepsilon_s'$ . Подсчитанные значения параметров подставляем в уравнение равновесия, которое состоит из трех слагаемых: А, В и С. В сумме эти слагаемые при условии равновесия должны дать ноль, при заданных начальных параметрах условие равновесия не соблюдается, сумма слагаемых принимает отрицательное значение, следовательно, уменьшаем предельные значения деформаций в арматуре. Для железобетонного элемента с заданными параметрами условие равновесия достигается путем последовательного уменьшения деформаций в арматуре растянутой зоны. При выполнении условия равновесия. Используя параметры  $n$ -го приближения, вычисляется значение предельного изгибающего момента  $M_{ult}$ .

Таблица 9 – Параметры проверки уравнения равновесия (В15) при  $\sigma_b = R_b$

$\varepsilon_j = \varepsilon_i - \varepsilon_{1/2}$	$n_d'$	A	B	C	$\nu_B$	$\Sigma$	Сигма в	$N_{bd}$	S	$\varepsilon_{bs}$	
9,79E-05	0,05	0,031903	0,002447	0,020885	0,849709	0,00	19,96352	0,003908	0,000000	9,79E-05	
0,000284	0,15	0,024443	-0,01635	0,020885	0,648589	0,00	45,71487	0,008951	0,000002	0,000295	
0,000499	0,25	0,009742	-0,03513	0,020885	0,519612	0,00	61,04015	0,011950	0,000007	0,000488	
0,000695	0,35	-0,0124	-0,05391	0,020885	0,429472	0,00	70,63169	0,013828	0,000008	0,000686	
0,000891	0,45	-0,0418	-0,07268	0,020885	0,362782	0,00	76,71091	0,015018	0,000014	0,000882	
0,001087	0,55	-0,07846	-0,09147	0,020885	0,311515	0,00	80,50783	0,015761	0,000016	0,001078	
0,001283	0,65	-0,12256	-0,11025	0,020885	0,271065	0,00	82,79161	0,016211	0,000020	0,001274	
0,001478	0,75	-0,17402	-0,12906	0,020885	0,238587	0,00	84,07982	0,016463	0,000023	0,001469	
0,001674	0,85	-0,23282	-0,14784	0,020885	0,212134	0,00	84,72764	0,016588	0,000029	0,001665	
0,00196	0,95	-0,29897	-0,16663	0,020885	0,190358	0,00	84,97490	0,016638	0,000030	0,00187	
0,002066	1,05	0,063954	0,010368	0,00012	0,172079	0,00	84,89724	0,016621	0,000033	0,002056	
0,002262	1,15	0,070189	0,010228	0,00012	0,155748	0,00	84,16188	0,016479	0,000038	0,002252	
0,002457	1,25	0,076986	0,010088	0,00012	0,141121	0,00	82,88936	0,016229	0,000041	0,002448	
0,002653	1,35	0,084351	0,009948	0,00012	0,128077	0,00	81,2455	0,015908	0,000042	0,002644	
0,002849	1,45	0,092283	0,009805	0,00012	0,116475	0,00	79,35853	0,007768726	2,21E-05	0,002838	
0,003045	1,55	0,100782	0,009665	0,00012	0,106170	0,00	77,32614	0,007569764	2,3E-05	0,003036	
0,003241	1,65	0,109859	0,009525	0,00012	0,097020	0,00	75,2209	0,007363665	2,38E-05	0,003232	
0,003408	1,73995	0,118488	0,0093	0,00012	0,089666	0,00	73,30890	0,007176503	2,44E-05	0,003408	
							$\Sigma =$	0,230431	0,000397	0,001726	
$\varepsilon_b$	$\varepsilon_s$	$\chi, \text{см}^{-1}$	$x, \text{см}$	$\varepsilon'_s$	A, к $\varepsilon$	B, к $\varepsilon$	C, к $\varepsilon$	$\Sigma$			
0,00350	0,01603	0,001221	2,87	0,00106	2264,50	2145,87	3434,00	976,37571			
$N_{b,d} = \sum \Delta \varepsilon_i \sigma_i$	$S_{b,d}$	$z_b, \text{см}$	$z'_s, \text{см}$	$z_s, \text{см}$	$N_b b z_b$	$\sigma_s A_s z_s$	$\sigma'_s A'_s z'_s$	$M_{ult}$		f	
0,230431	0,000397	1,42	0,87	13,13	3204,596	45088,55	1866,837	50159,9698	кг*см	5,08	см



Производим данный расчет для бетонов классов: В15, В20, В35, В45, В55, В60, В100. В таблице 10 представлены значения предельных изгибающих моментов  $M_{ult}$  для арматур диаметром 8мм, 10мм, 12мм.

Таблица 10 – Результаты значений предельных изгибающих моментов  $M_{ult}$  для арматур диаметром 8мм, 10мм, 12мм

d8							
Класс бетона	В15	В20	В35	В45	В55	В60	В100
$M_{ult}$ , кНм	5,07	5,13	5,31	5,42	5,51	5,57	6,39
d10							
Класс бетона	В15	В20	В35	В45	В55	В60	В100
$M_{ult}$ , кНм	7,51	7,74	7,92	8,04	8,14	8,22	9,02
d12							
Класс бетона	В15	В20	В35	В45	В55	В60	В100
$M_{ult}$ , кНм	10,96	11,04	11,14	11,27	11,39	11,47	12,25

Современное исследование бетонных конструкций свидетельствует [32]-[34], что бетон работает в подавляющем большинстве случаев в условиях неоднородного деформирования. А.И. Никулин в своей статье писал: «Для того чтобы установить вид эпюр напряжений в сечении изгибаемого или внецентренно сжатого железобетонного элемента, применяют различные приемы трансформирования исходных диаграмм».

А.И. Никулин в статье предложил свой вариант деформационной модели. Речь идет о модифицированном варианте, при котором для оценки прочности и декоративности используется деформационная модель силового сопротивления железобетона.

А.И. Никулиным сделан вывод о том, что для использования предоставленного варианта расчетной модели в практике проектирования необходимо дополнительно учитывать наличие коррозионных процессов в бетоне и арматуре.

В данной работе продолжено исследование, начатое А.И. Никулиным, с учетом замечания о необходимости включения в расчет данных о влиянии коррозии бетона.

Произведем аналогичный расчет на прочность этого же образца, но поврежденного коррозией бетона в сжатой зоне – площадью  $A_j'(j = 1 \dots k)$ .

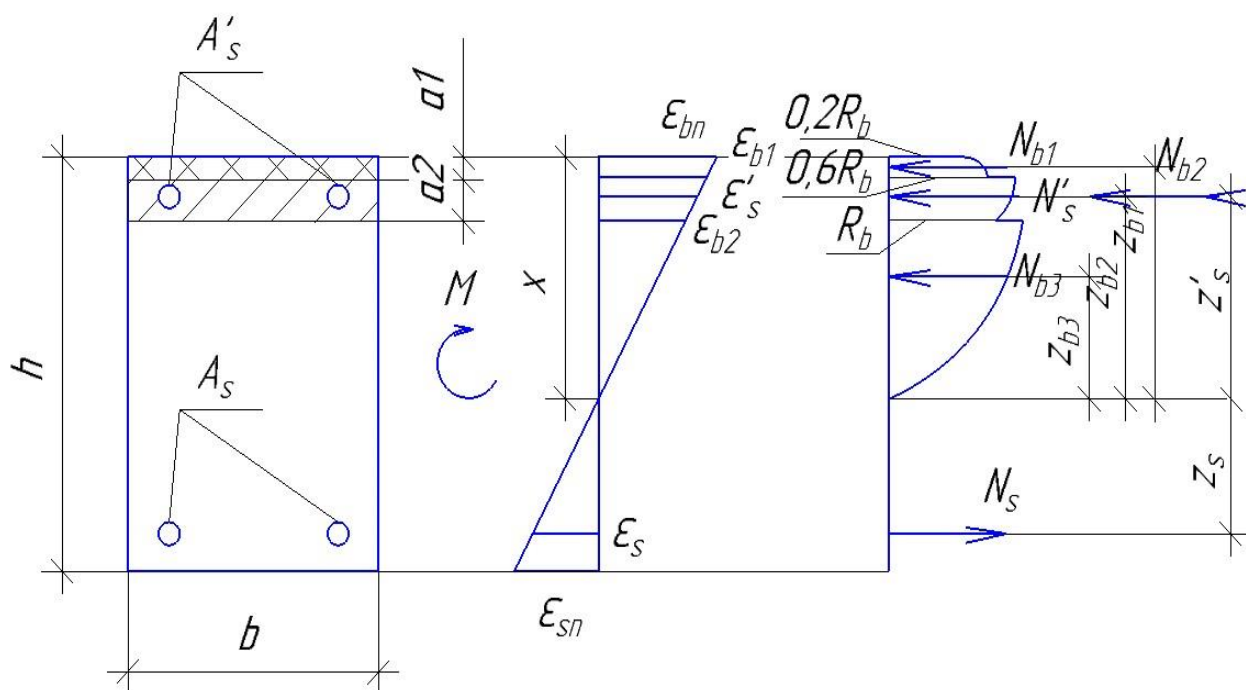


Рисунок 6 – Эпюры напряжений после воздействия коррозии бетона

В расчетную модель вносятся следующие предпосылки: прочностные и деформационные параметры пораженного коррозией бетона принимаются произвольно.

Основные коррозионные повреждения при поражении железобетонного элемента составили 3 см с различными размерами по слоям ( $\delta = \delta_1 + \delta_2$ ). Расчеты производятся при следующих величинах коррозионного повреждения:

- 1)  $\delta = 0$ ,
- 2)  $\delta = 1\text{см} + 2\text{см}$ ,

3)  $\delta = 1,2\text{см} + 1,8\text{см}$ .

Рассмотрим 1 случай поражения:

Производим аналогичный расчет при условиях ( $a_1=1\text{см}$ ,  $a_2=2\text{см}$ ):

1)  $R_{b1} = 0,2 \cdot R_b$ ,  $R_{b2} = 0,6 \cdot R_b$ ,  $R_{b3} = R_b$ ,

2)  $E_{b1} = 0,2 \cdot E_b$ ,  $E_{b2} = 0,6 \cdot E_b$ ,  $E_{b3} = E_b$ ,

3)  $\varepsilon_{b1} = 100 \cdot 10^{-5}$ ,  $\varepsilon_{b2} = 200 \cdot 10^{-5}$ ,  $\varepsilon_{b3} = 345 \cdot 10^{-5}$ .

Из условий получим следующий график зависимости  $\sigma_b(\varepsilon_b)$  (рис.7).

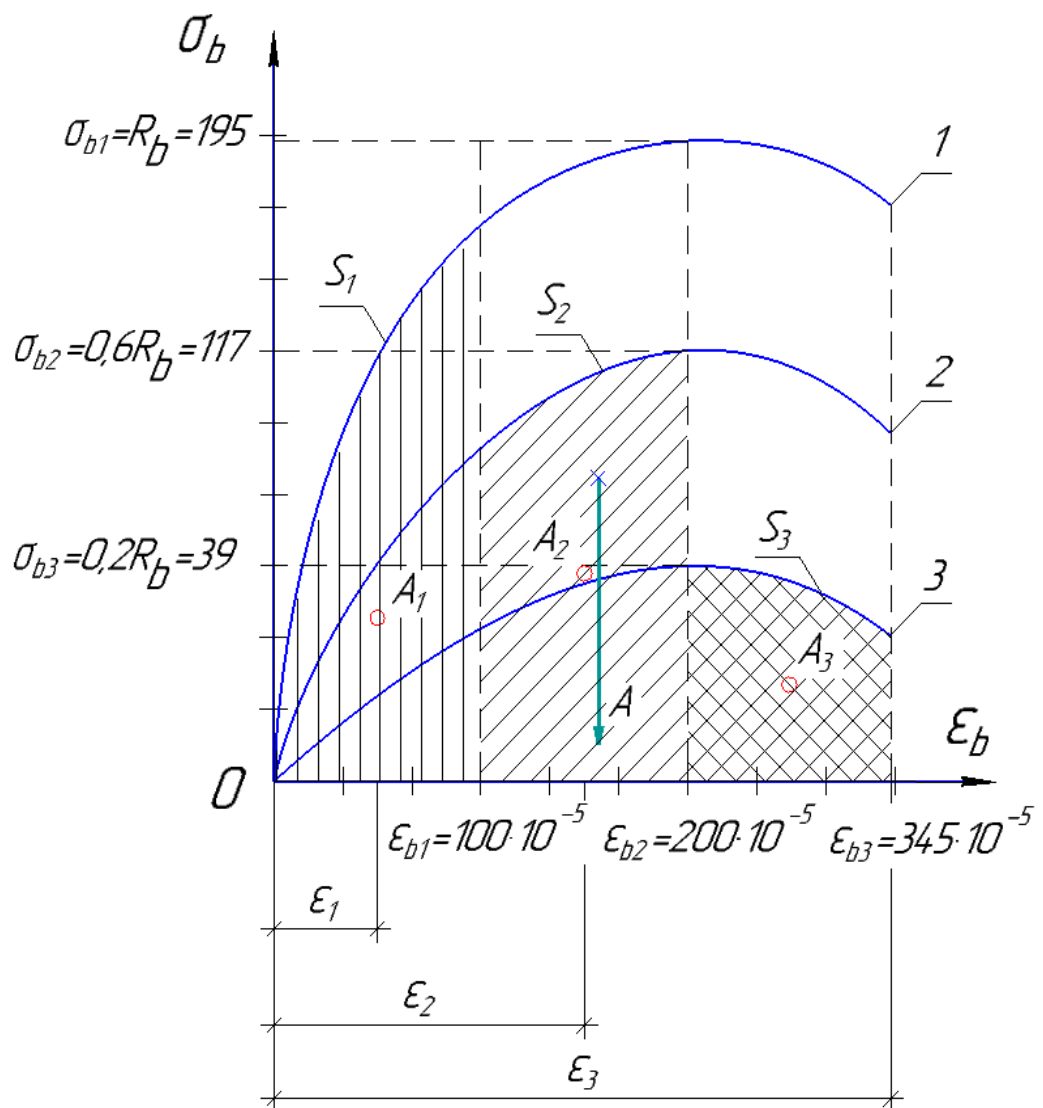


Рисунок 7 – Диаграмма состояния бетона, поврежденного коррозионным износом

Уравнение равновесия примет следующий вид:

$$N_{b1} + N'_s + N_{b2} + N_{b3} - N_s = 0,$$

где  $N_{b1} = \frac{S_1}{\chi}$ ,

где  $S_1$  – площадь сечения 1 (см. рис. 7);

$\chi$  - кривизна.

$$N_{b2} = \frac{S_2}{\chi},$$

где  $S_2$  – площадь сечения 2 (см. рис. 7);

$$N_{b3} = \frac{S_3}{\chi},$$

где  $S_3$  – площадь сечения 3 (см. рис. 7);

$$N'_s = \sigma'_s A'_s$$

где

$A'_s$  - площадь сечения верхней арматуры.

$$N_s = R_s A_s$$

Где  $R_s$  - расчетное сопротивление арматуры;

$A_s$  - площадь сечения нижней арматуры.

Решая уравнение равновесия с использованием криволинейной нормируемой диаграммы бетона, получаем значение предельного изгибающего момента  $M_{ult}$  для арматуры диаметром 8 мм, 10 мм и 12 мм.

Характеристики бетонов и арматур представлены в таблицах 11, 12.

Таблица 11 – Характеристики бетонов

Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$R_b$ , кг/см <sup>2</sup>	85	115	117	250	300	330	475
$R_{bt}$ , кг/см <sup>2</sup>	7,5	9	13	15	17	18	22
$E_b$ , кг/см <sup>2</sup>	240	275	345	370	392	395	430

Таблица 12 – Характеристики арматур

Класс бетона	d8	d10	d12
$A'_s$ , см <sup>2</sup>	1,01	1,57	2,26
$A_s$ , см <sup>2</sup>	1,01	1,57	2,26

Полученные результаты сведены в таблицы 13, 14, 15.

Таблица 13 – Расчет элементов на прочность после повреждения коррозией бетона (1 случай) при диаметре арматуры 8 мм

B15	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	4708,084	4229,852	5138,591	34909,86	59,24474	48927,14	кГ*см
						4,89	кН*м
B20	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	4408,236	5818,298	7032,872	50118,64	1797,987	49580,06	кГ*см
						4,96	кН*м
B35	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	6018,582	8174,171	10598,55	26145,98	685,7651	50248,52	кГ*см
						5,02	кН*м
B45	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	6843,019	9437,745	20024,44	15398,91	301,5725	51402,54	кГ*см
						5,14	кН*м
B55	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	7487,108	10444,14	14461,75	21065,48	112,0403	53346,44	кГ*см
						5,33	кН*м
B60	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	8071,366	11298,47	15742,84	33141,08	72,74099	54011,02	кГ*см
						5,40	кН*м
B100	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	16634,3	22476,58	28029,7	46240,52	1071,436	61832,82	кГ*см
						6,18	кН*м

Таблица 14 – Расчет элементов на прочность после повреждения коррозией бетона (1 случай) при диаметре арматуры 10 мм

B15	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	2138,665	4229,852	5138,591	63088,12	2901,915	71693,31	кг*см
						7,17	кН*м
B20	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	4408,236	5818,298	7032,872	58171,83	2794,891	72636,35	кг*см
						7,26	кН*м
B35	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	6018,582	8174,171	10598,55	52113,02	1065,991	75838,33	кг*см
						7,58	кН*м
B45	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	6843,019	9437,745	20024,44	42088,37	468,781	77924,79	кг*см
						7,79	кН*м
B55	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	7487,108	10444,14	14461,75	73776,2	174,1616	79995,04	кг*см
						8,00	кН*м
B60	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	8071,366	11298,47	15742,84	73977,8	113,0726	81277,4	кг*см
						8,13	кН*м
B100	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sZ_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sZ'_s}}$	<i>Mult</i>	
	16634,3	22476,58	28029,7	71878,83	1665,5	88353,92	кг*см
						8,84	кН*м

Таблица 15 – Расчет элементов на прочность после повреждения коррозией бетона (1 случай) при диаметре арматуры 12 мм

B15	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	3145,778	4229,852	5138,591	100541,61	132,5674	106631,7	кГ*см
						10,66	кН*м
B20	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	4408,236	5818,298	7032,872	101011,7	4023,218	108247,9	кГ*см
						10,82	кН*м
B35	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	6018,582	13722,38	10598,55	103806,0	1534,484	109611	кГ*см
						10,96	кН*м
B45	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	6843,019	9437,745	20024,44	105210,0	674,8057	110840,4	кГ*см
						11,08	кН*м
B55	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	7487,108	10444,14	14461,75	106200,1	250,704	112237,9	кГ*см
						11,22	кН*м
B60	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	8071,366	11298,47	15742,84	106490,3	162,767	113540,2	кГ*см
						11,35	кН*м
B100	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\sigma_s A_{sZ_s}$	$\sigma'_s A'_{sZ'_s}$	<i>Mult</i>	
	16634,3	22476,58	28029,7	103468,9	2397,471	118212	кГ*см
						11,82	кН*м



Сведем данные полученные в таблицах 10, 13, 14, 15 в таблицу 16.

Таблица 16 - Результаты значений предельных изгибающих моментов  $M_{ult}$  для арматур диаметром 8мм, 10мм, 12мм до и после повреждения коррозией бетона (1 случай)

d8							
Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$M_{ult}$ , кНм (до поражения)	5,07	5,13	5,31	5,42	5,51	5,57	6,39
$M_{ult}$ , кНм (после поражения)	4,89	4,96	5,02	5,14	5,33	5,40	6,18
d10							
Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$M_{ult}$ , кНм (до поражения)	7,51	7,74	7,92	8,04	8,14	8,22	9,02
$M_{ult}$ , кНм (после поражения)	7,17	7,26	7,58	7,79	8,00	8,13	8,84
d12							
Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$M_{ult}$ , кНм (до поражения)	10,96	11,04	11,14	11,27	11,39	11,47	12,25
$M_{ult}$ , кНм (после поражения)	10,66	10,82	10,96	11,08	11,22	11,35	11,82

Рассмотрим 2 случай поражения:

Производим аналогичный расчет при условиях ( $a_1=1,2$ см,  $a_2=1,8$ см):

$$1) R_{b1} = 0,2 \cdot R_b, R_{b2} = 0,6 \cdot R_b, R_{b3} = R_b;$$

$$2) E_{b1} = 0,2 \cdot E_b, E_{b2} = 0,6 \cdot E_b, E_{b3} = E_b;$$

$$3) \varepsilon_{b1} = 100 \cdot 10^{-5}, \varepsilon_{b2} = 200 \cdot 10^{-5}, \varepsilon_{b3} = 345 \cdot 10^{-5}.$$

Полученные результаты сведены в таблицы 17, 18, 19.

Таблица 17 – Расчет элементов на прочность после повреждения коррозией бетона (2 случай) при диаметре арматуры 8 мм

B15	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	3108,02	3230,85	5138,59	22129,92	80,24	33527,14	кг*см
						3,35	кН*м
B20	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	3608,24	4820,30	7032,87	20516,64	1797,99	34180,06	кг*см
						3,42	кН*м
B35	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	5018,58	7274,17	13598,55	46391,18	785,77	34848,52	кг*см
						3,48	кН*м
B45	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	6843,02	9437,74	20024,44	47018,63	301,57	36002,54	кг*см
						3,60	кН*м
B55	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	7487,11	10444,14	14461,75	47461,12	112,04	37946,44	кг*см
						3,79	кН*м
B60	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	8071,37	11298,47	15742,84	47590,82	72,74	38611,02	кг*см
						3,86	кН*м
B100	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z',s}}$	$Mult$	
	16634,30	22476,58	28029,70	46240,52	1071,44	46432,82	кг*см
						4,64	кН*м

Таблица 18 – Расчет элементов на прочность после повреждения коррозией бетона (2 случай) при диаметре арматуры 10 мм

B15	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	2138,66	4229,85	5138,59	70088,12	2901,92	56293,31	кг*см
						5,63	кН*м
B20	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	4408,24	5818,30	7032,87	70171,84	2794,89	57236,35	кг*см
						5,72	кН*м
B35	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	6018,58	8174,17	10598,55	72113,02	1065,99	60438,33	кг*см
						6,04	кН*м
B45	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	6843,02	9437,74	20024,44	73088,37	468,78	62524,79	кг*см
						6,25	кН*м
B55	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	7487,11	10444,14	14461,75	73776,20	174,16	64595,04	кг*см
						6,46	кН*м
B60	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	8071,37	11298,47	15742,84	73977,80	113,07	65877,40	кг*см
						6,59	кН*м
B100	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{s,z,s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{s,z,s}}$	<i>Mult</i>	
	16634,30	22476,58	28029,70	71878,83	1665,50	72953,92	кг*см
						7,30	кН*м

Таблица 19 – Расчет элементов на прочность после повреждения коррозией бетона (2 случай) при диаметре арматуры 12 мм

B15	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	3145,78	4229,85	5138,59	106353,33	132,57	91231,67	кг*см
						9,12	кН*м
B20	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	4408,24	5818,30	7032,87	101011,69	4023,22	92847,88	кг*см
						9,28	кН*м
B35	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	6018,58	13722,38	10598,55	103806,00	1534,48	94211,03	кг*см
						9,42	кН*м
B45	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	6843,02	9437,74	20024,44	105210,00	674,81	95440,40	кг*см
						9,54	кН*м
B55	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	7487,11	10444,14	14461,75	106200,14	250,70	96837,95	кг*см
						9,68	кН*м
B60	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	8071,37	11298,47	15742,84	106490,34	162,77	98140,25	кг*см
						9,81	кН*м
B100	$N_{b1bz_{b1}}$	$N_{b2bz_{b2}}$	$N_{b3bz_{b3}}$	$\bar{\sigma}_{sA_{sz_s}}$	$\bar{\sigma}'_{sA'_{sz'_s}}$	<i>Mult</i>	
	16634,30	22476,58	28029,70	103468,89	2397,47	102812,01	кг*см
						10,28	кН*м

Сведем данные полученные в таблицах 10, 13, 14, 15, 17, 18, 19 в таблицу 20.

Таблица 20 - Результаты значений предельных изгибающих моментов  $M_{ult}$  для арматур диаметром 8мм, 10мм, 12мм до и после повреждения коррозией бетона (1 и 2 случаи)

d8							
Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$M_{ult}$ , кНм (до поражения)	5,07	5,13	5,31	5,42	5,51	5,57	6,39
$M_{ult}$ , кНм (после поражения 1 случай)	4,89	4,96	5,02	5,14	5,33	5,40	6,18
$M_{ult}$ , кНм (после поражения 2 случай)	3,35	3,42	3,48	3,60	3,79	3,86	4,64
d10							
Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$M_{ult}$ , кНм (до поражения)	7,51	7,74	7,92	8,04	8,14	8,22	9,02
$M_{ult}$ , кНм (после поражения 1 случай)	7,17	7,26	7,58	7,79	8,00	8,13	8,84
$M_{ult}$ , кНм (после поражения 2 случай)	5,63	5,72	6,04	6,25	6,46	6,59	7,30
d12							
Класс бетона	B15	B20	B35	B45	B55	B60	B100
$M_{ult}$ , кНм (до поражения)	10,96	11,04	11,14	11,27	11,39	11,47	12,25
$M_{ult}$ , кНм (после поражения 1 случай)	10,66	10,82	10,96	11,08	11,22	11,35	11,82
$M_{ult}$ , кНм (после поражения 2 случай)	9,12	9,28	9,42	9,54	9,68	9,81	10,28

Согласно таблице 3.12 построим график зависимости предельного изгибающего момента от класса бетона (рис. 8).

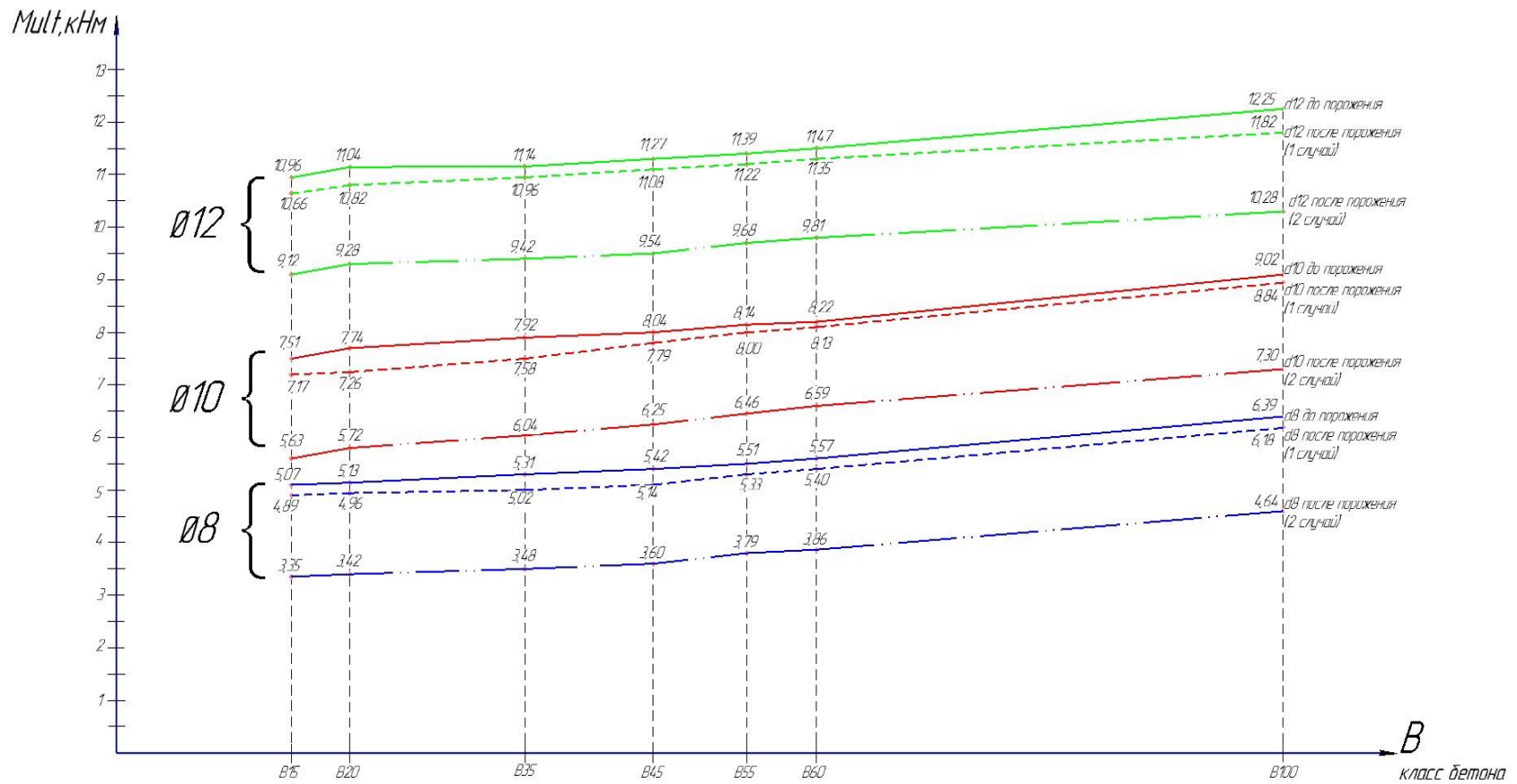


Рисунок 8 - График зависимости предельного изгибающего момента от класса бетона

Основные коррозионные повреждения при поражении железобетонного элемента составили 3 см с различными размерами по слоям ( $\delta = \delta_1 + \delta_2$ ). Согласно полученным данным построим график зависимости предельного изгибающего элемента от деформации при различной толщине слоя (рисунок 9).

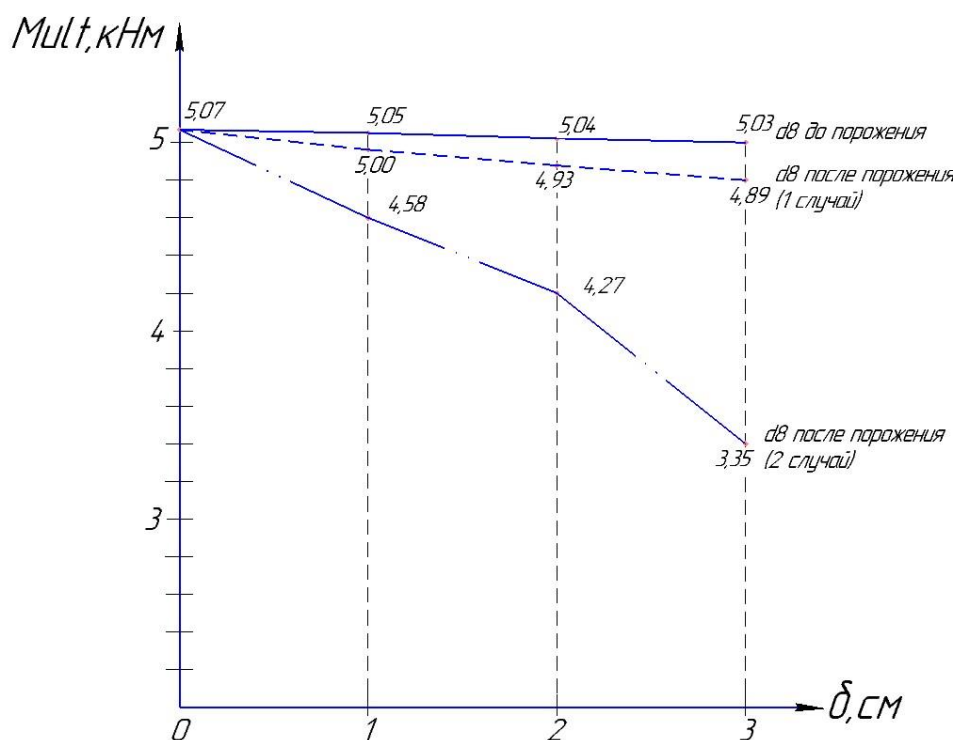


Рисунок 9 – График зависимости предельного изгибающего момента от деформации при различной толщине слоя

Согласно графику, величина коррозии износа при втором случае поражения наиболее сильно уменьшила несущую способность элемента.

В данной части диссертации разработана методика расчета на прочность железобетонного элемента поврежденного коррозией бетона;

Величина коррозии износа не влияет на несущую способность от величины армирования железобетонных образцов;

С увеличением класса бетона уменьшается величина коррозионного износа, так при классе бетона В15 при износе в 4%, а при В100 в 3%.

## Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы о причинах возникновения коррозии железобетона. Рассмотрены основные причины возникновения коррозии. Изложены различные виды классификации агрессивных сред, вызывающих коррозионные повреждения бетона.

Классификация агрессивных сред рассматривалась и с точки зрения их происхождения: природного или антропологического, связанного с жизнедеятельностью человека. Наиболее важной с практической точки зрения признана классификация по агрегатному состоянию, так как наиболее агрессивное воздействие на железобетонные конструкции оказывают именно жидкие агрессивные среды. В то время как твердые среды представляют особую опасность для бетона только в случае их растворения. Газообразные среды также становятся особо агрессивными только в случае их конденсации в порах бетона.

Также были рассмотрены различные способы защиты железобетонных конструкций от коррозии. В работе отражена информация и о первичных способах защиты (применяемы в период создания бетона), и о вторичных способах защиты, которые используются уже в период эксплуатации железобетонных конструкций. Рассмотрены различные виды пластифицирующих добавок, приведена таблица зависимости коррозионной стойкости бетона от типа вяжущего. Также важно для сохранения коррозионной стойкости бетона учитывать будущую форму железобетонной конструкции ещё на этапе проектирования.

В ходе эксплуатации железобетона важно применять вторичные методы защиты. Для этого используют лакокрасочные покрытия, символизация и т.д.

Учитывая исследования, проведенные профессором Ерышевым В.А. с участием лаборатории коррозии НИИЖБ, были определены параметры коррозионного повреждения бетонов эксплуатируемых железобетонных ферм покрытий главного корпуса «АвтоВаз».



Установлена марка бетона по водонепроницаемости, которая используется в конструкциях покрытий в исследованных корпусах АО «АвтоВаз».

Газовоздушные среды на территории корпусов, в которых производились исследования, неагрессивны по отношению к бетонам указанной марки по водонепроницаемости при нормальном влажностном режиме помещений и даже при мокром режиме эксплуатации.

За время эксплуатации конструкций покрытий - глубина нейтрализации бетона не превысила 12 мм. Согласно выполненному расчёту в течение 100 лет глубина нейтрализации бетона составит 2 см, что не представляет опасности для стальной арматуры, имеющей защитный слой бетона 5 см.

Анализ бетона на содержание сульфатов показал, что за время эксплуатации существенного поглощения диоксида серы бетоном не произошло.

Показано, что количество хлоридов в бетоне мало отличается от их фонового содержания в бетоне. Расчетом диффузии хлоридов в бетоне показано, что к 50 годам эксплуатации в зоне расположения арматуры при толщине защитного слоя 5 см заметного изменения содержания хлоридов (выше фонового) не произойдет.

Проведенные анализ и расчеты показали, что бетон в железобетонных конструкциях покрытий не подвергается коррозионному повреждению и полностью сохраняет защитное действие по отношению к стальной арматуре.

В данной работе разработана методика расчета железобетонных элементов на прочность с повреждениями сечения от коррозии.

Разработанный метод позволяет применить все преимущества деформационной модели.

Были сделаны выводы о том, что величина коррозии износа не влияет на несущую способность от величины армирования железобетонных образцов;

В ходе исследования было выявлено, что с увеличением класса бетона уменьшается величина коррозионного износа, так при классе бетона В15 при износе в 4%, и в 3% а при В100.

Разработанный метод может использоваться при проектировании различных конструкций.

Кроме того, данный алгоритм может быть внедрен в программный комплекс.

## Список используемой литературы

1. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модри С., Шиссель П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат. –1990.
2. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. М.: Стандартинформ, 2008. 38 с. (Система стандартов по информ., библи. и изд. делу.)
3. Астафьев Д.О. Расчет реконструируемых железобетонных конструкций / Д.О. Астафьев. –СПб.: СПбГАСУ, 1995. –158 с.
4. Байков В.Н., Мадатян С.А., Дудолодов Л.С., Митасов О.М. Об уточнении аналитических зависимостей диаграммы растяжения арматурных сталей. // Известия вузов, сер. Строительство и архитектура. -1983. -№9.
5. Бачинский В.Я., Бамбура А.Н., Ватагин С.С. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии// Бетон и железобетон. -1984. -№ 10. -С. 18-19.
6. Баташев В.М., Андросов С.Т., Лебедев В.Н., Нагорная Т.Ф. Расчет прочности изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения. -Бетон и железобетон.-1971.-№ 5.-С. 31-34.
7. Бондаренко, В.М. Железобетонные и каменные конструкции: учебник для студентов вузов по спец. «Пром. и гражд. Стр-во» / В.М. Бондаренко, Д.Г. Суворкин. – М. : Высш.шк., 1987. – 384 с.
8. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов // – М. : Издательство АСВ, 2004. – 472 с.
9. Ерышев, В.А. Методы и средства испытаний железобетонных конструкций: учеб. пособие для вузов / В.А. Ерышев. –Тольятти: ТГУ, 2007. – 64с.
10. Защита от коррозии, старение и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник: В 2 Т. / Под ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – 688 с.

11. Кудзис А.П., Шапалас К.П. Экспериментальные исследования степени использования прочности арматуры при внецентренном сжатии элементов кольцевого сечения. //В сб. "Железобетонные конструкции". Вильнюс. -1971. -№4. - С. 47-55.

12. Кривцов, Ю.В. Развитие требований пожарной безопасности к огнестойкости конструкций в строительных нормах и правилах, разрабатываемых ЦНИИСК / Ю.В. Кривцов, А.К. Микеев, Д.Г. Пронин // Промышленное и гражданское строительство. –2009. –С. 25-26.

13. Ерышев, В.А. Метод расчета железобетонных конструкций на прочность с применением упрощенных диаграмм деформирования материалов / В.А. Ерышев // Научное обозрение. –2016. –№4. –С. 21-25.

14. СНиП 2.03.01\*-84 Бетонные и железобетонные конструкции / Москва. – 1987

15. Симбирцева, С.А. Исследование диаграммы деформирования бетона / С.А. Симбирцева // Журнал научных работ. –2016. –№1 (27). –С. 87-94.

16. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Введ. 2013-01-01. –М. : Изд-во стандартов, 2012. –161 с.

17. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – Введ. 2017-07-01.– М. : Издательство стандартов, 2017. – 131 с.

18. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом. –М.: Стройиздат, 1987. – 45 с.

19. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. – Введ. 2017-08-28. –М. : Издательство стандартов, 2017. –116 с.

20. ГОСТ 24045-2016. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия. –Введ. 2017-04-01. –М. : Стандартиформ, 2016. –26 с.

21. Федеральный закон от 23.12.2009 №384. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений, [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.minstroyrf.ru/docs/1241> (дата обращения 04.01.2021).

22. Тошин, Д.С. Поиск оптимального способа реализации итерационного приближения при расчете по деформационной модели / Д.С. Тошин, М.П. Анисимова // Научное обозрение. –2016. –№ 17. С. 25-29.

23. Ерышев, В. А. Метод расчета железобетонных конструкций на прочность с применением упрощенных диаграмм деформирования материалов / В.А. Ерышев // Научное обозрение. –2016. –№ 4. –С. 21–25

24. Ерышев, В.А. Расчетная модель определения остаточных деформаций изгибаемых железобетонных элементов при разгрузке / В.А. Ерышев, Д.С.Тошин, Д.И. Латышев // Известия КГАСУ. – 2009. – №1.

25. Жемчуев А.О., Ерышев В.А. Расчет прочности изгибаемых железобетонных элементов с использованием деформационной модели / А.О. Жемчуев, В.А. Ерышев // Интернаука, - 2018. - №46-1 (80). С. 8-10.

26. Зак, М.Л. Аналитическое представление диаграммы сжатия бетона. Совершенствование методов расчета статически неопределимых конструкций / М.Л.Зак, Ю.П. Гуща // НИИЖБ. – 1987. – С. 103 – 107.

27. Иващенко, Ю.А. Исследование процесса разрушения бетона при разных скоростях деформирования / Ю.А.Иващенко, А.Д. Лобанов // Бетон и железобетон. – 1984. – № 11.

28. Иващенко, Е.И. Разработка методов расчета железобетонных элементов на основе действительных диаграмм деформирования материалов с учетом фактического изменения площади их поперечных сечений // Дис. канд. техн. наук. – 2006. – 230 с.

29. Карпенко, Н.И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона / Н.И.Карпенко // Строительные конструкции. – 1983. –С. 164 – 173.

30. Карпенко, Н.И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры [Текст] / Н.И. Карпенко, Т.А.

Мухамедиев, А.Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций: сб. статей / НИИЖБ. – Стройиздат. – 1986. – С. 7 – 25.

31. Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В. Методика построения диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при переменных уровнях напряжения / Н.И. Карпенко, В.А. Ерышев, Е.В. Латышева // Жилищное строительство, - 2014. - № 7. – С. 9-13.

32. Никулин А.И. Прочность и деформативность изгибаемых и внецентренно сжатых реконструируемых железобетонных элементов составного сечения / А.И. Никулин // Бетон и железобетон – пути развития: Сб. статей - М.: Информполиграф, 2005. – С. 518-526.

33. Узун И.А. Совершенствование методов расчета стержневых железобетонных конструкций на основе диаграмм деформирования бетона и арматуры / И.А. Узун // Бетон и железобетон – пути развития: сб. статей / М. – 2005. –С. 607-612.

34. Узун И.А., Дорожкин В.В. Учет рядов факторов при построении деформационных моделей стержневых элементов / И.А. Узун, В.В. Дорожкин // Бетон и железобетон – пути развития: сб. статей / М. – 2005. –С. 613-622.

35. Panfilov, D. A. The methodology for calculating deflections of reinforced concrete beams exposed to short duration uniform loading (based on nonlinear deformation model) / D. A. Panfilov, A. A. Pischulev // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 91. – Pp. 188–193.

36. Huang-bin Lin. Damage Analysis and Evaluation of High Strength Concrete Frame Based on Deformation-Energy Damage Model / Huang-bin Lin, Shou-gao Tang, Cheng Lan. – Shanghai: Tongji University, 2014. –10 p.

37. ACI 318-11. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011. – 509 p.

38. Strarossek, U. Progressive collapse of structures / Strarossek, U. – London: Thomas Telford Publishing , 2009. – 168 p.

39. Draft prEN 1992-1-2. Eurocode2 : Design of concrete structures, Part 1: General and rules for buildings. – Brussels: ComiteEuropeen de Normalisation, 2003. – 106 p.