

На правах рукописи



МОРОЗОВА ОЛЬГА ВАДИМОВНА

**СИЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРРОЗИЕЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

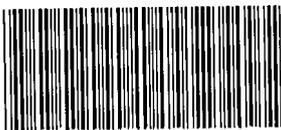
АВТОРЕФЕРАТ

30 СЕН 2015

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2015



005562719

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

- Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Марков Сергей Витальевич
- Официальные оппоненты: Маилян Левон Рафаэлович,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО
«Ростовский государственный строительный университет», профессор кафедры Автомобильных дорог
- Шишов Иван Иванович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых», доцент кафедры
«Строительные конструкции»
- Ведущая организация: АО «НИЦ Строительство» Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. Гвоздева А.А. (НИИЖБ).

Защита состоится «19» октября 2015г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, ауд. 9 «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru

Автореферат разослан «19» сентября 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Каган Павел Борисович

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальность выбранной тематики исследования связана с важностью учета нелинейных характеристик силового сопротивления, коррозионных повреждений для статически неопределимых систем. В данной работе приведено мотивированное уточнение выводов при оценке состояния, в котором находятся конструкции из железобетона в условиях достаточно интенсивных природных и техногенных воздействий коррозионного характера. Обзор показал, что в имеющихся опубликованных методиках расчета стержневых конструкций из железобетона, которые статически неопределимы, не принимается во внимание влияние, оказываемое разгрузкой. В связи с этим некоторые отдельно взятые участки стержней деформируются линейно. Кроме того, не учитывается влияние коррозионных повреждений, которые во многом связаны с величиной изгибающих моментов.

Степень разработанности темы сопровождается формированием соответствующих методик теоретического прогнозирования нелинейных видов силового сопротивления, а также нелинейности влияний коррозионных повреждений при учете расчетов существующих конструкций с учетом воздействия коррозионной среды.

Целью диссертационной работы является совершенствование возможностей и методов теоретического расчета нелинейного силового сопротивления и нелинейности влияния коррозионных повреждений при оценке статически неопределимых железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях коррозионной среды, включая метод оценки жесткостей с учетом нелинейности, ползучести и коррозионных повреждений.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- построение расчетной модели для оценки совместного учета влияния нелинейного силового сопротивления и нелинейности влияния коррозионных повреждений для расчета статически неопределимых изгибаемых железобетонных конструкций;

- разработка метода оценки жесткостей при знакопеременном во времени нагружении с учетом нелинейности, ползучести и коррозионных повреждений.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) расчетная модель силового сопротивления железобетона при одностороннем контакте с агрессивной средой, учитывающая установленное экспериментально зонирование структурных изменений бетона по высоте сечения (зона разрушения, частично поврежденная, зона неповрежденная);
- 2) на базе существующих подходов к расчету статически неопределимых стержневых железобетонных систем метод расчета жесткостей с учетом нелинейности силового деформирования, ползучести и коррозионных повреждений; предложение о расчетной замене статически неопределимой системы (балочной или рамной) с фактически изменяющейся вдоль каждого пролета жесткостью D , системой, в которой жесткость вдоль каждого пролета неизменна;
- 3) выявление особенностей изменения напряженно-деформированного состояния сечений в процессе знакопеременности нагружения-разгрузки, положения центра тяжести соответствующих приведенных сечений, жесткости (и отпорности) вдоль пролета в процессе нагружения – разгрузки в зависимости от знака, уровня напряжений в компонентах сечения, а так же изменения характеристик их силового сопротивления и коррозионных повреждений;
- 4) учет перераспределения усилий статически неопределимых конструкций при нагружении в разгружаемых сечениях, в которых деформирование линейно связано с действующими напряжениями и фактором необратимости деформаций при разгрузке;
- 5) метод эквивалентности (равенстве) прогибов фактических и условно – линейно деформируемых элементов систем $\max f^* = \max f_0$.

Научная новизна работы заключается в том, что:

- установлена необходимость учета комплексной постановки нелинейности, неравновесности и необратимости силового и несилового сопротивления

железобетона применительно к коррозионным повреждениям стержневых конструкций;

- выявлено отличие жесткости железобетонного элемента в момент нагружения от отпорности в момент разгружения;
- доказана необходимость учета изменения знака усилий (напряжений) на разных участках элементов систем;
- предложена численная оценка эффективности учета нелинейности, неравновесности и коррозионных повреждений, установка предела целесообразности уровня нагружения;
- представлены расчетная модель и метод оценки жесткостей в статически неопределимых стержневых системах с учетом нелинейности, ползучести и коррозионных повреждений, который приводит к изменению расчетных жесткостей вдоль пролета с соответствующей аппроксимацией жесткостей и вычислением $\max f'$ - наибольшего прогиба реального элемента, вычисленного с учетом изменчивости жесткостей вдоль пролета в зависимости от уровня напряженно деформированного состояния и приравниваемого к нему $\max f_0$ – подбираемого прогиба, по которому находится эквивалентная постановка, неизменная на каждом этапе итерации неизменная жесткость соответствующего элемента системы.

Методология и методы диссертационного исследования обеспечиваются привлечением опытного и теоретического материала опубликованных исследований, а так же согласованием исходных положений и предлагаемых способов расчетов с фундаментальными решениями строительной механики. Направленность диссертационной работы определяет следующие основные методы исследования:

- анализ имеющихся теоретических и экспериментальных предложений;
- использование общих исходных позиций теории деформирования механики твердого тела;
- использование известных положений и общепринятых допущений теории силового сопротивления железобетона;
- применение современной нелинейной теории железобетона.

Теоретическая и практическая значимость работы. Развитие теории силового сопротивления изгибаемых элементов для оценки ресурса конструктивной безопасности статически неопределимых определимых систем эксплуатируемых зданий и сооружений включает разработку прикладных способов качественных и количественных оценок силового сопротивления изгибаемых элементов. Практическое значение работы заключается в решении актуальной научно-технической задачи, уточняющей методы расчета статически неопределимых стержневых железобетонных систем, с совместным учетом нелинейности силового сопротивления и коррозионных повреждений. Результаты проведенных исследований использованы ГУП проектный институт «Владкоммунпроект» г. Владимир, при определении резервов силового сопротивления деформированию эксплуатируемых конструкций.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается применением совокупности методов, адекватных целей, задачам и логике диссертационного исследования, представлением основных результатов исследования в профессиональной печати и докладов на научных конференциях. Изучением исследований по теме диссертации занимались такие авторы как: В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов, Н.В. Клюева, В.П. Селяев, Х.З. Баширов, В.С. Федоров, И.Г. Овчинников, С.И. Меркулов, В.Ф. Степанова, А.А. Гвоздев, С.М. Крылов, Ю.В. Зайцев и др. Однако силовое сопротивление статически неопределимых конструкций с учетом коррозионных повреждений остается открытым.

Личный вклад автора в полученных результатах, изложенных в диссертации, заключается в выборе и обосновании актуальности темы исследования; в формулировании и взаимоувязки задач, направленных на достижение поставленной в работе цели; в проведенном анализе работ отечественных и зарубежных исследователей по проблеме силового сопротивления статически неопределимых систем в условиях коррозионных повреждений; в предложении расчетной модели и методе оценки жесткостей в

статически неопределимых стержневых системах при неубывающем нагружении с учетом нелинейности, ползучести и коррозионных повреждений.

Апробация результатов работы и публикации. Основные результаты исследований докладывалась на заседании кафедры «Жилищно-коммунального комплекса» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, на Международной конференции Стройинвест-2012. По теме диссертации опубликовано 8 научных статей, из них 5 в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 143 страницах, включающих 130 страниц основного текста, 20 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 110 наименований и приложения.

II ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой темы, даны общая характеристика диссертации, представлена методическая последовательность исследования, сформулирована цель и новизна работы. В связи с комплексным воздействием силовых факторов (уровень, режим, знак и продолжительность нагрузки) и не силовых факторов (техногенные, производственные, а так же интенсивность коррозионных повреждений, которые нелинейно зависят от особенностей деформированного состояния элементов конструкции) на потенциал, свойственный силовому сопротивлению, а также на конструктивную безопасность сооружений, возникает необходимость в продолжении ведущихся целевых исследований. Особенно это касается статически неопределимых систем. Разработка данного вопроса является предметом исследования в данной диссертационной работе.

В первой главе диссертации изложено состояние вопроса и постановка задачи, представлен краткий обзор исследований о структуре и механических

свойствах бетона, кинетике коррозионных повреждений бетона и арматурной стали, нелинейности деформирования и расчете статически неопределимых конструкций с учетом коррозионных повреждений.

Осуществлен обзор исследований по теме диссертации, основанный на работах: О.В. Алмазова, В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунова, Н.В. Ключевой, В.П. Селяева, Х.З. Баширова, В.С. Федорова, Р.С. Санжаровского, И.Г. Овчинникова, С.И. Меркулова, В.Ф. Степановой, Л.М., Пухонто, Н.И. Карпенко, А.А. Гвоздева, О.Я. Берга, С.М. Крылова, Ю.В. Зайцева, П.Ф. Дроздова, В.И. Травуша, Г.А. Смоляго, Р.Б. Гарибова, Н.К. Розенталя, М.М. Батданова, Г.В. Мурашкина, О.В. Алмазова, А.Г. Тамразяна а так же исследования по развитию теории среднего сопротивления бетона и арматуры: В.М. Бондаренко, В.И. Колчунова, П.И. Васильева, Г.А. Гениева, Н.И. Карпенко, Л.Р. Маиляна, В.И. Мурашева, Е.Н. Пересыпкина и других.

Расчет жесткости железобетонных конструкций отсчитывается от положения центра тяжести. Но так как на силовое сопротивление оказывают влияние нелинейные коррозионные повреждения и нелинейная зависимость временных модулей деформаций бетона, жесткости меняются вдоль пролета. Совместно со всем этим, требуется учесть разнообразный характер, присущий нелинейности по отношению к силовым и коррозионным видам повреждений. Учету должна быть подвергнута и интенсивность повреждений.

Во второй главе приводятся описание объекта исследований, в том числе уравнения состояния материалов, учет работы растянутой зоны железобетонных элементов. Приведена феноменологические предпосылки решения рассматриваемых задач, построена методика расчета силового сопротивления железобетона с учетом режимно-наследственных свойств, проиллюстрирована преемственная связь современных прикладных методик с методом временного модуля деформаций, приведен алгоритм оценки жесткости и прочности сечений железобетонных элементов в нелинейной и неравновесной постановке.

Рассмотрены коррозионные повреждения бетона и арматуры. Описана связь между силовыми повреждениями бетона и уровнем нагружения. Выстроен алгоритм квазилинейных уравнений состояния, а так же введены соотношения для описания кинетики продвижения фронта коррозионного повреждения в глубину железобетонного элемента.

В связи с тем, что к настоящему времени нет накопленных данных для статистической информации и параметры функции сохранения ресурса силового сопротивления $K^*(z)$ принимается возможным определять эмпирически в детерминированном расчете.

В диссертации использовано квазилинейное уравнение силового сопротивления бетона в записи П.И. Васильева:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{E_{вр}(t, t_0)} = \frac{\bar{S}^{-1}[\sigma(t)]}{E_{вр.л.}(t, t_0)} \quad (1)$$

Причем:

$$E_{вр}(t, t_0) = \frac{E_{вр.л.}(t, t_0)}{\bar{S}^0(\sigma)} \quad (2)$$

$$E_{вр.л.}(t, t_0) = \frac{E_{МГ}^0(t, t_0)}{1 + E_{МГ}^0(t) C^0(t, t_0)} \quad (3)$$

$$\bar{S}^0 = 1 + \bar{V} \eta^{\bar{m}} \quad (4)$$

где, $E_{в.вр}$ - временный модуль деформации; $E_{в.вр.л.}$ - то же, в линейной постановке; \bar{S}^0 - функция нелинейности, (\bar{V} и \bar{m} - параметры нелинейности, квазилинейного уровня силового сопротивления бетона; σ - действующее нормальное напряжение; $R_{дл}$ - длительная прочность бетона; $E_{МГ}^0(t)$ - начальный модуль мгновенных деформаций бетона; $C^0(t, a)$ - начальная мера ползучести; \bar{S}^0 - функция нелинейности;

На рис. 1 T -- экстремальная точка, точка «невозврата», область A относится к стадии устойчивого напряженно-деформированного состояния, точка T соответствует пределу прочности бетона R ; K – точка разрушения по нисходящей ветви (область B), возможной при стеснении деформирования или управлении деформированием; $O1$ – начальная модульная линия (временный линейный модуль деформации для t_i); 23 аналогичная модульная линия при разгрузке (при этом $O1 \parallel 23$ параллельны); $\varepsilon_{об}$ - обратимая часть полных относительных деформаций для исходного неповрежденного образца; $\varepsilon_{необ}$ – необратимая часть этой деформации; ε

*_{об} – то же для поврежденного коррозией образца; $\varepsilon^*_{необ}$ – то же для поврежденного коррозией образца (знаки * здесь и ниже – знак коррозионного повреждения).

В диссертации используется влияние коррозионных повреждений на силовое сопротивление железобетонных конструкций, эксплуатирующихся зданий и сооружений, то есть, когда коррозионные воздействия начинаются после стабилизации напряженно-деформированного состояния при неизменном во времени уровне агрессивной среды.

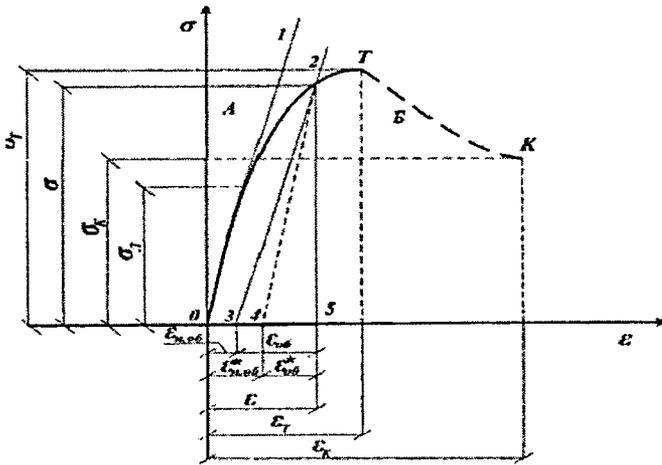


Рисунок 1. Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ (напряжений – полных относительных деформаций при сжатии – разгрузении)

По сечению железобетонного элемента, в его сжатой части выделяется три зоны: z^* - зона полного разрушения (А), δ^* - переходная зона постепенного уменьшения повреждений (до нулевого значения), (Б) и p - неповрежденная зона (В) (рис. 2).

Исходное кинематическое уравнение развития коррозионных повреждений бетона записано по предложению В.М. Бондаренко:

$$\frac{d\Delta\delta^*(t)}{dt} = \alpha(\Delta\delta^*(t))^m, \text{ где } \Delta\delta^*(t) = 1 - \frac{\delta^*(t, t_0)}{\delta_{кр}^*(t_0)} \quad (5)$$

где, $\delta^*(t, t_0)$ - текущая глубина повреждения; $\delta^*_{кр}(t_0)$ – критическое значение δ^* , определяющее предельную глубину повреждений $\delta^*_{кр}$; $\Delta\delta^*(t)$ - текущий относительный дефицит повреждений к критической величине $\delta^*_{кр}$; t_0, t - время начала наблюдения и время текущего наблюдения; $\alpha, m, \delta^*_{кр}$ - параметры кинетики развития повреждений, зависящие от уровня действующих напряжений $\eta = \sigma/R_b$, которые должны быть получены из экспериментов для каждого варианта бетона и агрессора. Применяется функция изменения m от уровня действующего напряжения (рис.3). Отметим, что ранее для $\delta^*_{кр}$ аналогичная кривая была экспериментально получена В.П. Селяевым.

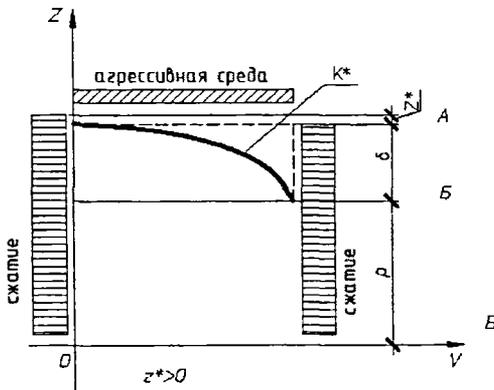


Рисунок 2. Схема распределения коррозионных повреждений в сечении изгибаемой балки

Разделив переменные

$$\frac{d\Delta\delta^*(t)}{[\Delta\delta^*(t)]^m} = \alpha dt \quad (6)$$

Решение (5) имеет вид

$$\delta^*(t_0) = f m(\alpha, m, t) \delta^*_{кр}(t) \quad (7)$$

Тогда:

при $m = 1$

$$f_1(t) = 1 - \Delta\delta^*(t_0, t_0) e^{-\alpha(t-t_0)} \quad \text{и}$$

$$\Delta(t, t_0) = 1 - \frac{\delta^*(t_0, t_0)}{\delta^*_{кр}(t_0)} \quad (8)$$

Далее принимается при $m \geq 1$, при котором затухание скорости продвижения коррозионного фронта более заметно

$$f_m(t) = 1 - \{[\Delta \delta^*(t_0, t_0)]^{(-m)+1} + \alpha[(-m) + 1](t - t_0)\}^{\frac{1}{(-m)+1}} \quad (9)$$

Работы А. Саталкина, Л.П. Макаренко, Ю.М. Баженова, П.А.Рембиндера, Е.М. Чернышова демонстрируют, что один и тот же бетон в различных уровнях нагружения обладает различной структурой, которая оценивается нами с позиции проницаемости бетона. Применяя описанную выше расчетную модель сжатого бетона по отношению к поврежденному коррозией железобетонному элементу (при $z^* \geq 0$), параметр предельной глубины повреждений δ можно определить с помощью функции сохранения K^* (отражает ресурс силового сопротивления). Она имеет форму полинома:

$$K^*(z) = \sum_{i=0}^{i=2} a_i z^i \quad (10)$$

Исходя из граничных условий: (11)

$$K^* = 1 \text{ и } \frac{dK^*}{dz} \Big|_{z=p} = 0 \text{ при } z=p;$$

$$K^* = 0 \text{ при } z = p + \delta^*$$

находятся переменные a :

$$a_0 = 1 - \left(\frac{p}{\delta^*}\right)^2; \quad a_1 = \frac{2p}{(\delta^*)^2}; \quad a_2 = -\frac{1}{(\delta^*)^2}$$

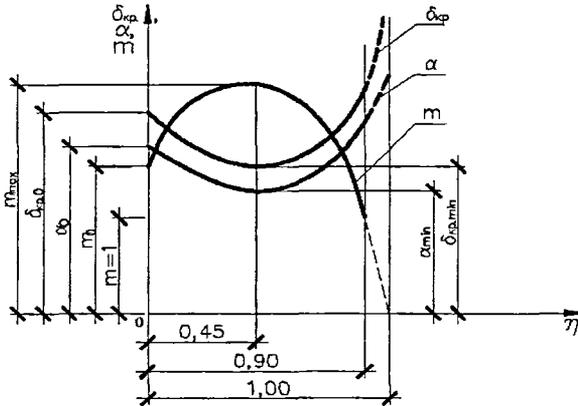


Рисунок 3. Схема изменений эмпирических характеристик δ , m , a с изменением $\frac{\sigma}{R}$

Поскольку (10) вытекает только из геометрических условий, постольку она в равной степени может относиться абсолютно ко всем характеристикам поврежденного коррозией материала ($0 \leq K^* \leq 1$):

$$R^* = K^* R; \quad E^* = K^* E; \quad C^* = C^0 / K^*, \quad \varepsilon_{об}^* = K^* \varepsilon_{об} \text{ и т.п.}$$

R - предел прочности материала на сжатие; E - временный модуль деформации; C^0 - мера ползучести бетона.

Задача предлагаемой работы заключается в ограничении напряжений не более предела длительной прочности, который соответствует $m \geq 1$, так как в случае превышения напряжений данного предела будет исключено кольматационное заполнение пор, начнется процесс сквозного проникновения коррозии. Это повлечет за собой разрушение существующих конструкций.

В третьей главе проведена оценка влияния уровня напряжений на глубину нейтрализации агрессора, а так же влияние коррозионных повреждений по глубине сжатой части бетона для характеристик прочности, модуля мгновенной деформации и меры ползучести. Отмечен и учитывается эффект, который состоит в том, что при нагружении жесткость, как силовое сопротивление деформированию имеет отличные от жесткости (отпорности) при разгрузке существенные характеристики, то есть при нагрузке наблюдается нелинейное сопротивление между напряжениями и деформациями, и нелинейное развитие деформаций ползучести (неубывающий режим нагружения), сопровождающиеся рассеиванием энергии силового сопротивления, что приводит к частичной необратимости деформаций. При разгрузке (по Энгессеру-Ясинскому) деформирование линейно связано с напряжениями. Однако, в силу потери потенциала сопротивления и необратимости деформаций восстановления полностью не происходит, и поэтому, расчетная жесткость формально выше, чем при нагружении. Из экспериментов следует, что при нагрузке, до момента микротрещинообразования, временный модуль деформаций падает непрерывно с увеличением напряжений, а глубина коррозионных повреждений уменьшается, а с дальнейшим ростом напряжений увеличивается (рис.3). К настоящему моменту эти факторы не учитываются при решении статически неопределимых систем. Так как отдельные стержни статически

неопределимых систем, и даже отдельные сечения вдоль пролета, могут как догружаться за счет перераспределения усилий, так и разгружаться, поэтому при расчете статически неопределимых систем приходится считаться с изменением жесткостей. Отсюда следует, что жесткости целесообразно определять по участкам, связанным не только с уровнем действующих напряжений, но и с уровнем коррозионных повреждений. По значениям жесткостей вдоль сечения выстраивают эпюру жесткости, после этого выполняется аппроксимация вдоль каждого стержня статически неопределимой системы.

Необходимая расчетная модель может быть построена с помощью следующих посылок:

- 1) геометрическая неизменяемость считается неизменной;
- 2) предполагается, что характеристики внешней коррозионной среды неизменны во времени; а ее контакт происходит по поверхности железобетонных конструкций;
- 3) в расчет силового сопротивления поврежденных коррозией элементов вводится переходная область коррозионного повреждения δ , глубина которой устанавливается в зависимости от номинала бетона, состава и концентрации агрессора, вида коррозии, уровня действующих напряжений и продолжительности коррозионного воздействия (гл.2, гл.3);
- 4) повреждения арматуры состоят в следующем: - уменьшение поперечного сечения – за счет коррозионных расчетным снижением площади ее сечения умножением на коэффициент сохранения $\omega_s < 1 (A_s = \omega_s A_{s0})$;
- 5) исследование осуществляется в стадии устойчивого силового сопротивления, в рамках определенного диапазона уровня внешних воздействий, то есть для (5)
- 6) задача решается в условиях стабильной неизменяющейся нагрузки и неизменной агрессивной коррозионной среды, но агрессивная среда прикладывается после нагрузки, а разрушение – после накопления повреждений;

Отсюда следует, что модуль отпорности (модуль жесткости при разгрузении) можно вычислить по формуле:

$$\bar{E}_{вр.л}^*(t, t_0) = \frac{\bar{E}_{вр.л}(t, t_0)}{K^*} \quad (12)$$

При этом, жесткость должна быть вычислена относительно центра тяжести приведенного сечения, используя формулу:

$$D^* = D_b^* + D_s^* \quad (13)$$

где, D^* - полная жесткость сечения, D_b^* - то же, сжатой части сечения, D_s^* - то же растянутой части сечения;

$$D_s = D_0 + \frac{\omega_s A_s}{\psi_s} E_s (y_{ц.т.} - a_s)^2 \quad (14)$$

здесь ψ_s - параметр учета влияния бетона растянутой зоны, принимается во всем диапазоне от 0 до $M_{пр.}$; D_0 - жесткость сечения относительно собственной оси; ω_s - коэффициент сохранения ресурса силового сопротивления растянутой рабочей арматуры при коррозионных повреждениях; A_s - площадь растянутой рабочей арматуры; E_s - модуль деформации (упругости) рабочей арматуры;

Положение, в котором находится центр тяжести приведенного сечения может быть определено по формуле:

$$y_{ц.т.} = \frac{\sum_{i=1}^I E_{вр.,i} A_i y_i}{\sum_{i=1}^I E_{вр.,i} A_i} \quad (15)$$

Жесткость сжатой части бетона, поврежденного коррозией можно вычислить:

$$\bar{D}_{b(q,t,t_0)}^* = D_0 + b_0 E_{вр.л}^*(t, t_0) \int_p^{p+\delta} \frac{K^*(z)(h-x^*-y^*_{ц.т.}+z)^2}{\bar{S}^{\delta}(z)} dz \quad (16)$$

Жесткость элемента, неповрежденного коррозией, по формуле:

$$\bar{D}_{b(q,t,t_0)} = D_0 + b_0 E_{вр.л}(t, t_0) \int_p^{p+\delta} \frac{(h-x-y_{ц.т.}+z)^2}{\bar{S}^{\delta}(z)} dz \quad (17)$$

Использование интегрального модуля деформаций для сжатой зоны бетона позволяет применять вместо (16) и (17) классические способы для расчета жесткости (отпорности).

$$\bar{S}^{\delta} = 1 + \bar{\nu} \left(\frac{\sigma}{R}\right)^m \quad (18)$$

знак \rightarrow означает нагружение, знак \leftarrow разгружение, и далее,

Отпорность элемента, неповрежденного коррозией, вычисляется:

$$\bar{D}_{(t,t_0)} = D_0 + b_0 E_{вр.л}(t, t_0) \int_p^x (h-x-y_{ц.т.}+z)^2 dz \quad (19)$$

Отпорность элемента, поврежденного коррозией, вычисляется:

$$\overline{D^*}_{(t,t_0)} = D_0 + b_0 E^*_{ep,л}(t,t_0) \int_p^x \frac{(h-x^*-Y^*_{ц,т,+z})^2}{K^*(z)} dz \quad (20)$$

Переходя от определения жесткости и отпорности сечения к построению функции жесткости и отпорности балки, необходимо вначале вычислить характеристики для дискретных сечений, построив искомую функцию. На уровне, когда момент в сечении меньше половины предельного момента $M < \frac{1}{2} M^*_{пр}$, возможно применение зависимости:

$$\frac{1}{D^*} = \frac{1}{D_0^*} + \left(\frac{1}{D_{пр}^*} - \frac{1}{D_0^*} \right) \frac{M}{M_{пр}^*} \quad (21)$$

где, значки * означают, что используемые величины относятся к поврежденным коррозией сечениям; $M^*_{пр}$ - предельный разрушающий момент поврежденного сечения; D_0^* - жесткость для нулевого напряжения; $D_{пр}^*$ - жесткость для предельного напряжения.

Принимаем модуль деформации при нагружении $E_{ep}(t,t_0)$ - для бетона, неповрежденного коррозией. $E^*_{ep}(t,t_0)$ - для бетона, имеющего коррозионные повреждения:

$$E_{вр,л}(t,t_0) = \frac{E_{вр,л}(t,t_0)}{\bar{S}^0}; \quad E^*_{вр,л}(t,t_0) = \frac{E_{вр,л}(t,t_0)}{\bar{S}^0} K^*; \quad (22)$$

где, \bar{S}^0 - функция нелинейности. При разгрузении $\bar{S}^0 = 1$

Определяем ординаты центра тяжести сечений $y_{ц,т}$ для каждого отдельного случая относительно расчетной грани:

$$y_{ц,т} = \frac{\frac{\omega_s A_{s0} E_{s0} a_s}{\psi_s} + b_0 \frac{E_{вр,л}(t,t_0)}{(1+\varphi)} \int_0^{\delta} \frac{K^*(z)(h-x-z) dz}{\bar{S}^0(z)}}{\frac{\omega_s A_{s0} E_{s0}}{\psi_s} + b_0 \frac{E_{вр,л}(t,t_0)}{(1+\varphi)} \int_0^{\delta} \frac{K^*(z) dz}{\bar{S}^0(z)}}; \quad (23)$$

где, E_s - модуль деформации рабочей растянутой арматуры, a_s - толщина защитного слоя растянутой арматуры, ψ_s - коэффициент учета растянутой зоны бетона.

Далее, жесткость (отпорность, линейно зависящая от действующих в сечении напряжений) вычисляется по формулам (13)- (23).

В четвертой главе приводится расчет статически неопределимых стержневых конструкций, поврежденных коррозией с учетом нелинейности и ползучести бетона. Введена расчетная модель силового сопротивления

железобетона при одностороннем контакте с агрессивной средой, учитывающая зонирование структурных изменений бетона по высоте сечения (зона разрушения, частично поврежденная, зона неповрежденная).

Функция кривизны изогнутой оси железобетонного стержня находится из условия:

$$\frac{d^2u}{dx^2} = -\frac{M}{D^*}; \text{ или } \frac{d^2u}{dx^2} = -MB^* \quad (24)$$

где, D^* – жесткость сечения, B^* – податливость сечения; u – функция изогнутой оси, v – абсцисса сечения, M – действующий изгибаемый момент.

Используемые в практике алгоритмы и лицензионные программы расчета линейных статически неопределимых железобетонных стержневых систем исходят из посылки о неизменности жесткостей поперечных сечений элементов вдоль. Дальнейший процесс последовательный приближений для уточнения жесткостей в сечениях является трудоемким и сложным, поэтому в качестве прикладного приема учета указанных выше особенностей силового сопротивления железобетонных стержневых систем используется предлагаемый метод эквивалентности (равенстве) прогибов:

$$\max f^* = \max f_0 \quad (25)$$

Из равенства (35) вытекает, что, установив прогибы железобетонного стержня статически неопределимой стержневой системы с учетом фактической нелинейности, силового деформирования, продвижения коррозионных повреждений, и приравняв их к прогибам линейно-деформируемых стержней с неизменной вдоль пролета жесткостью, получаем возможность найти условную жесткость в линейной постановке.

Таким образом, в диссертационной работе предлагается и реализуется метод эквивалентности прогибов – как метод сравнения жесткостей. Сутью предлагаемого метода является замена статически неопределимой стержневой системы с учетом нелинейности и коррозионных повреждений, в которой показатели жесткости меняются от сечения к сечению другой, расчетной системой, для которой жесткости в каждом стержневом элементе считаются неизменными. Далее: одним из известных методов определяются величины усилий в сечениях элементов (первое

приближение); каждый i стержневой элемент делится на n участков, для которых вычисляются средние значения усилий (изгибающих моментов), а затем по ним находятся средние жесткости и вычисляются равные прогибы; по найденным в первом приближении значениям жесткостей уточняются значения изгибаемых моментов, повторно решается статически неопределимая стержневая система (второе приближение); из этого второго приближения заново определяются значения жесткостей и прогибов; используя (25) вычисляется неизменная на каждом этапе итерации единая жесткость соответствующего элемента системы.

В связи с этим, предлагаются решения с помощью аппроксимации по нескольким фиксированным сечениям - функции изменения жесткости вдоль пролета. Этим, по сути, вводится принципиальная возможность замен нелинейных алгоритмов решений - линейными, но с переменными вдоль пролета параметрами.

Для случая $M \leq 0,5 M^*_{пр}$ в диапазоне ($\frac{\sigma}{R} = 0,45 \div 0,5$) когда и изменения δ^* , и K^* происходят без смены знака в пределах уплотнения бетона вопрос решается относительно просто, так как его можно аппроксимировать степенными рядами. В этом случае целесообразно применение зависимости (21)

При $M \geq 0,5 M^*_{пр}$ специфика напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в части влияния коррозионных повреждений на эпюры напряжений и жесткости сечений меняется.

Таким образом, в практических расчетах, возможны следующие упрощения:

- в интересах унификации алгоритмов предлагается фактическую жесткость заменить некоторой эквивалентной, неизменной вдоль каждого пролета, фактическую нагрузку q заменить некоторой эквивалентной $q^{экв}$. Таким образом, осуществляется расчетная замена статически неопределимой системы (балочной или рамной) с фактически изменяющейся вдоль каждого пролета жесткостью D , системой, в которой жесткость вдоль каждого пролета неизменна;

- выбор фиксированных сечений, вычисление соответствующих им внутренних усилий, количественных характеристик коррозионных повреждений и характеристики нелинейности;

- определение значений податливости этих фиксированных сечений и аппроксимация функции податливости $B(x) = \frac{1}{D(x)}$.

Например, аппроксимация функции податливости в виде:

$$B^*(x) = B_{\text{cp}}^* + A \sin \left[\left(\frac{4\pi}{l} \right) x + 1 \right] = B_{\text{cp}}^* + \left[a \sin \left(\frac{4\pi}{l} \right) x + b \cos \left(\frac{4\pi}{l} \right) x \right]; \quad (26)$$

где, A - амплитуда; $\omega = (2\pi/T)$; T - период; φ - начальная фаза; q - приведенная равномерно распределенная нагрузка; l - пролет;

$$A = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{2}; \quad B_{\text{cp}} = \frac{B_{\text{max}} + B_{\text{min}}}{2}. \quad (27)$$

при:

$$a = \frac{A}{[1 + (tg \varphi)^2]^{1/2}}; \quad \text{и } b = a tg \varphi. \quad (28)$$

Далее записывается уравнение изогнутой оси стержня:

$$U(x) = - \int dx \int M(x) B^*(x) dx + C_1 x + C_2 \quad (29)$$

C_1 и C_2 - произвольные постоянные интегрирования;

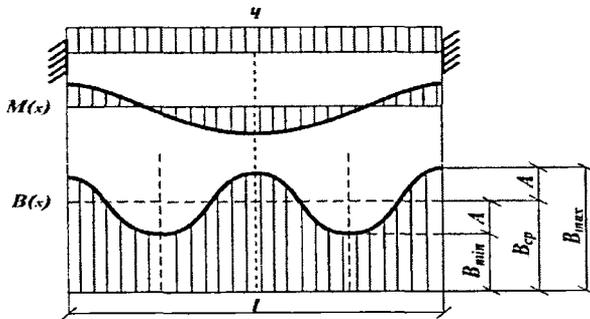


Рисунок 4. Вариант податливости изгибаемого элемента

Например, для свободно опертой балки, пролета l , которая нагружена равномерной нагрузкой q , и при $x = l/2$:

$$\max u = \frac{Ml^2 B^*}{8} = \max f^* \quad (30)$$

$$M(x) = M_{оп.} - M_q(x) = M_{оп.} - \frac{l}{2} q (lx + x^2) \quad (31)$$

$M_{оп.}$ - опорный изгибающий момент;

И с учетом (30) искомая расчетная жесткость, неизменная вдоль каждого пролета равна:

$$D^{экс} = \frac{q_{экс} l^4}{384 \max f_0} \quad (32)$$

Аналитическое сравнение результатов последовательных приближений по характерным точкам.

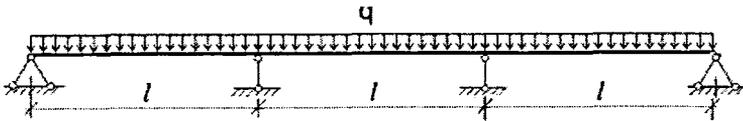


Рисунок 5. Расчетная схема

В качестве примера расчета использовалась трехпролетная балка со следующими условиями: В30, $h = 0,8$ м, $b = 0,3$ м, $l_1 = l_2 = l_3 = 6$ м, $a_0 = 0,039$ м, $h_0 = 0,761$ м, $R_b = 17 \cdot 10^6$ Н/м², $E_b = 29 \cdot 10^6$ Н/м², $q = 63,9 \cdot 10^3$ Н/м²; арматура А IV, $A_s = 30,79 \cdot 10^{-4}$ м² (4 стержня диаметра 28), $E_s = 1,9 \cdot 10^{11}$ Н/м². Каждый пролет трех-пролетной балки делился на 4 участка.

Выписка из таблицы сравнения результатов для сечения №2 и № 11

| № сечения | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------|--------|--------------------|------------|----------------|------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | M, кНм | Первое приближение | | | | | |
| | | M1, кНм | σ/R | δ^* , м | K* | $D^* \times 10^6$ Нм ² | $B^* \times 10^6$ 1/Нм ² |
| 2 | 215,6 | 280,3 | 0,4 | 0,15 | 0,93 | 0,47 | 2,1 |
| 11 | 287,6 | 370,9 | 0,5 | 0,10 | 0,42 | 0,21 | 4,8 |

| № сечения | 1 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------|--------|--------------------|------------|----------------|------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | M, кНм | Второе приближение | | | | | |
| | | M2, кНм | σ/R | δ^* , м | K* | $D^* \times 10^6$ Нм ² | $B^* \times 10^6$ 1/Нм ² |
| 2 | 215,6 | 308,3 | 0,4 | 0,17 | 0,97 | 0,52 | 1,9 |
| 11 | 287,6 | 407,9 | 0,5 | 0,11 | 0,46 | 0,23 | 4,3 |

Для сравнения берем сечение №2. В линейной постановке момент в сечении – 215,6 кНм , по нелинейной постановке без учета признаков разгрузки и коррозии момент в сечении получается 280,3 кНм , а с учетом коррозии – 308,3 кНм , что составляет 30% уточнения бетона, а следовательно и арматуры по сравнению с линейной постановкой и 10% уточнения материала и арматуры по сравнению с нелинейной постановкой.

Для сечения №11. . В линейной постановке момент в сечении – 287,6 кНм ,по нелинейной постановке без учета признаков разгрузки и коррозии момент в сечении получается 370,9 кНм , а с учетом коррозии – 407,9 кНм , что составляет 30% уточнения бетона, а следовательно и арматуры по сравнению с линейной постановкой и 10% уточнения материала (арматуры) по сравнению с нелинейной постановкой.

Таким образом, разработана методика расчета статически неопределимых стержневых систем с учетом ранее не исследованных факторов, таких как: влияние разгрузки проявляющееся в восстановлении линейной связи, а так же влияние коррозии, которая имеет разнонаправленное влияние. Разработан метод оценки жесткостей при нагружении с учетом нелинейности, ползучести и коррозионных повреждений.

В приложении приведены материалы, подтверждающие внедрение результатов диссертационных исследований.

III ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Фиксируются особенности силового сопротивления железобетона, связанные с физико-механической анизотропией свойств и нелинейно-неравновесным режимно-наследственным деформированием;
2. Построена методика расчета силового сопротивления железобетона с учетом режимно-наследственных свойств;

3. Введены соотношения для описания кинетики продвижения фронта коррозионного повреждения в глубину железобетонного элемента основываясь на нелинейные обобщения известных авторов;
4. Учитывается характер повреждений коррозионного типа бетонного образца по мере удаления от поверхности контакта с агрессивной средой; выделены три зоны повреждения: зона полного разрушения, переходная зона, и зона неповрежденного бетона;
5. Оценено влияние уровня нагружений на глубину нейтрализации агрессора, а так же влияние коррозионных повреждений по глубине сжатой части бетона для характеристик прочности, модуля мгновенной деформации и меры ползучести;
6. Изменения напряженно-деформированного состояния сечений в процессе знакопеременности нагружения-разгрузки перемещают центры тяжести соответствующих приведенных сечений и нулевые (нейтральные) оси, что влияет на жесткость (и отпорность);
7. Разработан метод расчета жесткостей с учетом нелинейности силового деформирования, ползучести и коррозионных повреждений, а так же предложение о расчетной замене статически неопределимой системы (балочной или рамной) с фактически изменяющейся вдоль каждого пролета жесткостью D , системой, в которой жесткость вдоль каждого пролета неизменна;
8. Построен расчетный аппарат оценки силового сопротивления статически неопределимых конструкций с учетом перераспределения усилий, а так же совместным действием нелинейности и неравновесности деформирования в зависимости от уровня коррозионных повреждений;
9. Показана актуальность и новые возможности совершенствования соответствующих методов теоретического прогноза нелинейного силового сопротивления и нелинейности влияния коррозионных повреждений при расчете статически неопределимых железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях коррозионной среды.

Перспективами дальнейшей разработки темы могут являться способы расчета, представленные в диссертационном исследовании при проектировании проектными и конструкторскими организациями усиления железобетонных конструкций, а так же решении вопросов о реконструкции, в случае наличия коррозионных повреждений.

IV ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

- публикации в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. *Морозова, О.В.* Совместный учет силового сопротивления и влияния коррозионных повреждений железобетонных элементов при расчете статически неопределимых стержневых систем. /Морозова О.В., Марков С.В., Ставская И.С. // Орел: Строительство и реконструкция. – 2012. - №4 (42) - С. 48 – 53.
2. *Морозова, О.В.* Продольные трещины в защитном слое бетона в условиях коррозионных повреждений. / Ставская И.С., Марков С.В., Морозова О.В. // Орел: Строительство и реконструкция. - 2012. - № 3 (41) - С. 35 – 41.
3. *Морозова, О.В.* Методы расчета силового сопротивления статически неопределимых систем с учетом специфики железобетона зданий и сооружений. /Марков С. В., Морозова О.В. // Москва: Научное обозрение.-2014.- №9.- С.383-385.
4. *Морозова, О.В.* О развитии альтернативных источников энергоснабжения городских территорий. /Матвеева Е.А., Литвинова Ю.А., Римшин В.И., Марков С.В., Морозова О.В., Голубка А.И.// Москва: Естественные и технические науки.-2014.- № 9-10 (77) - С.325-327.
5. *Морозова, О.В.* Определение усилий в затяжке облегченной конструкции, образованной на основе типовой железобетонной решетчатой балки. /Рощина С.И., Гоньшаков Н.Г., Гоньшаков А.Г., Марков С.В., Морозова О.В.// Москва: Естественные и технические науки.-2014.- № 9-10 (77) - С.373-375.

- публикации в других научных изданиях:

1. *Морозова, О.В.* О связи общей деформативности с трещиностойкостью. / Морозова О.В., Марков С.В. // Москва: Международная конференция СТРОЙИНВЕСТ-2012 Международный сборник научных трудов. МГАКХиС – 2012. – С. 552 – 556.
2. *Морозова, О.В.* К расчету статически неопределимых стержневых железобетонных систем при коррозионных повреждениях./ Морозова О.В., Марков С.В., Ставская И.С. // Саратов: Наука: 21 век. – 2012. - № 4 (20) - С. 26 – 34.
3. *Морозова, О.В.* Учет коррозионных повреждений при оценке образования продольных трещин в железобетоне эксплуатируемой конструкции. / Ставская И.С., Марков С.В., Морозова О.В. // Саратов: Наука: 21 век. – 2012. - № 4 (20) - С. 35-41.

КОПИ-ЦЕНТР св.: 77 007140227
г. Москва, ул. Енисейская, д. 36.
тел.: 8-499-185-79-54, 8-906-787-70-86
www.kopirovka.ru