

На правах рукописи

Дронов Андрей Васильевич

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ**

Специальность: **05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Смоляго Геннадий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Римшин Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Институт развития города ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», директор (г. Москва)

Андросова Наталия Борисовна
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», кафедра строительных конструкций и материалов, доцент (г. Орел)

Ведущая организация ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 15 сентября 2017 г. в 14.00 на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.094.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» <https://www.swsu.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент

Бакаева Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При длительном периоде эксплуатации железобетонных конструкций в условиях агрессивной среды возникает необходимость в оценке их напряженно-деформированного состояния вследствие коррозионных повреждений, остаточного ресурса, учете уменьшения площади поперечного сечения арматуры.

Коррозия элементов железобетонных конструкций может привести к изменению прочностных характеристик материалов, расчетных схем и перераспределению усилий в сечениях конструкций, нарушению совместной работы бетона и арматуры и другим последствиям, снижающим их эксплуатационные параметры. Наиболее неблагоприятным последствием развития коррозионных процессов в железобетоне является снижение несущей способности конструкций, их эксплуатационной пригодности, несоответствие требованиям безопасности и предельным состояниям при проектных нагрузках.

Коррозия арматурной стали – одно самых распространенных эксплуатационных повреждений железобетонных конструкций перекрытий и покрытий. Происходящий процесс коррозии арматуры, как правило, вызван нарушением условий эксплуатации, действием агрессивной среды, снижением защитных свойств бетона, ошибками проектирования и дефектами изготовления конструкций. При этом ресурс эксплуатации конструкций существенно снижается.

В условиях хлоридной коррозии при определенной концентрации хлоридов бетон теряет защитные свойства по отношению к арматуре, коррозия развивается локально и вглубь стержня, приводя к значительным потерям площади его сечения, зачастую без видимых повреждений на поверхности бетона. Действию хлоридов подвержены конструкции перекрытий бассейнов, паркингов, мостов, а также конструкции, эксплуатируемые в условиях агрессивных промышленных вод, содержащих хлориды, или подверженные действию хлоридов воздушной среды.

В отечественных строительных нормах детально рассмотрены вопросы проектирования и расчета конструкций без коррозионных повреждений. При этом отсутствуют конкретные требования и рекомендации, учитывающие наличие коррозионных повреждений бетона и арматуры, а также их совместное влияние на прочность, деформативность и трещиностойкость конструкций.

Изучение вопросов коррозии также актуально при оценке остаточного ресурса конструкций с коррозионными повреждениями, в связи с обоснованным прогнозированием развития в них коррозионных процессов.

Вследствие этого, автором были проведены исследования прочности и деформативности железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями арматуры.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы моделирования физических и химических процессов коррозии бетона и арматуры рассмотрены в работах С.Н. Алексеева, В.И. Бабушкина, А.А. Васильева, Б.В. Гусева, Ф.М. Иванова, В.М. Москвина, И.Г. Овчинникова, И.И. Овчинникова,

Н.К. Розенталя, Н.Д. Томашова, В.П. Чиркова, К. Андараве, К. Алонсо, Д.А. Гонсалеса и др.

Проблеме расчета железобетонных конструкций с различными коррозионными повреждениями посвящены исследования В.М. Бондаренко, В.М. Борисенко, А.В. Боровских, Р.Б. Гарибова, Е.А. Гузеева, Н.С. Дядькина, С.В. Маркова, С.И.Мутина, И.Г. Овчинникова, Е.Г. Пахомовой, А.И. Попеско, Л.М. Пухонто, В.И. Римшина, Н.В. Савицкого, А.А. Серкулова, Г.А. Смоляго С.Н. Степанова, А.А. Тытюка и др.

Объект исследования – прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов.

Предмет исследования – влияние процессов развития и накопления коррозионных повреждений стальной арматуры и бетона сжатой зоны на прочность и деформативность железобетонных изгибаемых элементов

Цель исследования – разработать методику расчета прочности нормальных сечений и деформативности железобетонных изгибаемых элементов, поврежденных коррозией. В соответствии с поставленной целью определены **задачи исследования:**

1. Провести экспериментальные исследования по определению прочности и деформативности железобетонных балок, подверженных коррозии рабочей арматуры и имеющих заложенные в конструкции дефекты.
2. Разработать алгоритм и программу расчета железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями по прочности нормальных сечений и деформативности на ЭВМ.
3. Провести численные исследования по расчету прочности нормальных сечений и деформативности железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями с учетом влияния существующих дефектов.

Научная новизна исследования:

- экспериментальные данные о накопленных коррозионных повреждениях стальной арматуры в агрессивной хлоридной среде, показавшие, что коррозионные повреждения арматуры представлены в виде отдельных близкорасположенных питтингов с неравномерной глубиной коррозии и затухающем характере ее развития;
- новые экспериментальные данные прочности, деформативности и трещиностойкости железобетонных балок с коррозионными повреждениями и их изменением с течением времени;
- математическая модель накопления коррозионных повреждений арматуры с течением времени, учитывающая величину защитного слоя бетона, агрессивность среды и динамику развития коррозионных процессов;
- методика расчета по прочности и деформативности железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями, учитывающая реальные диаграммы деформирования бетона;

Практическая значимость работы. Разработаны рекомендации по прогнозированию прочности и деформативности железобетонных конструкций покрытий и перекрытий с коррозионными повреждениями и оценке их остаточного ресурса.

Методология исследования включает такие научные методы, как наблюдение и эксперимент – для проведения экспериментальных исследований железобетонных конструкций; анализ и моделирование – для построения теоретических зависимостей.

Достоверность результатов работы обеспечивается согласованностью с базовыми положениями нелинейной теории железобетона, удовлетворительным совпадением результатов расчета с экспериментальными исследованиями, а также соответствием результатов численного моделирования с экспериментальными данными автора и других исследователей, эксплуатационной пригодностью усиленных железобетонных конструкций.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями;
- математическая модель развития коррозионных процессов арматуры в бетоне под действием агрессивной среды;
- методика расчета поврежденных коррозией изгибаемых железобетонных элементов;
- численные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы были представлены и рассмотрены на:

- Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2013 г.;
- Международной научной конференции «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность», Москва, 2013 г.;
- Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 12-23 мая 2014 г.;
- III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону, МГСУ, Москва, 12-16 мая 2014 г.;
- Научно-технический семинар, ЮЗГУ, Курск, 12 декабря 2016 г.

В полном объеме работа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры «Строительства и городского хозяйства» 14 февраля 2017 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, 6 из которых в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 143 страницах и содержит 128 страниц основного текста, 19 таблиц, 45 рисунков, 92 наименований списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, цели и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов исследований, выносимых на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние вопроса расчета железобетонных конструкций с учетом коррозионных повреждений. Приведены основные физические и математические модели развития деградационных процессов бетона и арматуры. Рассмотрены особенности коррозии бетона в соответствии классификацией, выделяющей три вида коррозии, определяемых механизмами деградационных процессов.

Наиболее подробно рассмотрен вопрос развития коррозии арматуры, влияния различных агрессивных сред на развитие деградационных процессов стали в бетоне, условий, способствующих депассивации поверхности арматуры в щелочной среде бетона. Рассмотрены особенности развития коррозии с течением времени и их влияние на прочность и деформативность железобетонных конструкций.

Также приведены основные подходы к расчету железобетонных конструкций с коррозионными повреждениями. Рассмотрены расчетные модели силового сопротивления железобетона с учетом коррозии сжатой зоны бетона, уменьшения площади сечения арматуры, ее коррозионного растрескивания, потери сцепления арматуры с бетоном и других повреждений.

Выполнен обзор основных дефектов изготовления железобетонных конструкций, влияющих на работу и условия эксплуатации. Проведен анализ дефектов и повреждений на основании результатов обследований технического состояния железобетонных конструкций 26 гражданских и 52 промышленных 8 зданий, расположенных на территории Белгородской области. В результате анализа дефектов и повреждений эксплуатируемых железобетонных конструкций получены следующие выводы:

1. Наиболее распространенным и значимым повреждением эксплуатируемых железобетонных конструкций является коррозия арматуры с растрескиванием и отслоением защитного слоя бетона.
2. Недостаточная величина защитного слоя бетона – один из самых значимых дефектов, влияющих на коррозию арматуры.
3. Дефекты сборных конструкций в большей степени связаны с нарушениями требований величины защитного слоя бетона и технологии ухода за бетоном.
4. Определяющим фактором развития коррозии арматуры является агрессивная среда. Наличие дефектов, как правило, не способно вызвать интенсивную коррозию арматуры, но может ускорить процессы её развития.

Во второй главе установлены цели, задачи и программа экспериментальных исследований, разработана методика их проведения, приведены результаты испытаний и их анализ.

Цель экспериментальных исследований – определение характера и динамики развития коррозионных повреждений стальной арматуры в бетоне и оценка их влияния на прочность, трещиностойкость и деформативность железобетонных изгибаемых элементов.

Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи:

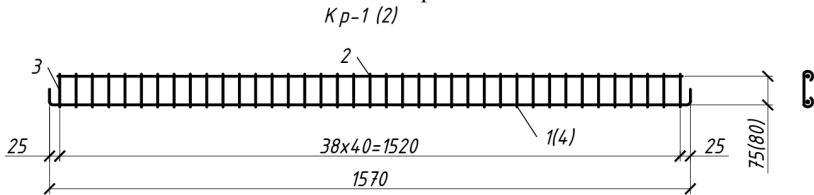
- разработка методики проведения эксперимента;

- изучение напряженно-деформированного состояния образцов с коррозионными повреждениями арматуры, их прочности по нормальным сечениям, трещиностойкости и деформативности;
- оценка полученных коррозионных повреждений арматуры и характера разрушения испытанных образцов.

Проведение экспериментальных исследований включало следующие испытания:

- длительные испытания образцов под воздействием агрессивной среды;
- испытания вспомогательных образцов с целью определения механических характеристик использованных в эксперименте материалов;
- испытания образцов на изгиб с доведением их до разрушения.

В качестве экспериментальных образцов были приняты однопролетные железобетонные балки прямоугольного сечения 60x100(н) мм с расчетным пролетом $l = 1400$ мм. Армирование железобетонных балок выполнено в виде плоских каркасов (рис. 1). В исследуемых конструкциях использованы рабочие продольные стержни диаметром 6 мм и 8 мм, с величиной защитного слоя бетона: 10мм и 15 мм. Класс бетона по прочности на сжатие В15.



Маркир. издел.	Поз. дет.	Наименование	Кол.	Масса 1 дет., кг	Масса изд., кг
$Kp-1$	1	$\phi 6$ А 240, $l=1650$	1	0,367	0,73
	2	$\phi 3$ В 500, $l=1540$	1	0,085	
	3	$\phi 3$ В 500, $l=130$	38	0,274	
$Kp-2$	4	$\phi 8$ А 240, $l=1650$	1	0,499	0,86
	2	$\phi 3$ В 500, $l=1540$	1	0,085	
	3	$\phi 3$ В 500, $l=130$	38	0,274	

Рисунок 1. Параметры армирования железобетонных балок.

Восемь железобетонных балок были подвержены воздействию агрессивной среды путем введения в состав бетонной смеси поваренной соли в соотношении 5% от массы цемента и дальнейшего смачивания поверхности готовых образцов и арматурных стержней в районе трещин, с целью депассивации арматуры с момента начала проведения испытаний, а также для ускорения процессов коррозии арматурной стали. Четыре образца железобетонных балок являлись контрольными и действию агрессивной среды не подвергались.

В ходе длительных испытаний образцы были подвержены действию агрессивной среды и постоянной гравитационной нагрузки, составляющей 70% от разрушающей. Продолжительность действия нагрузки для одной половины образцов составила 14 месяцев, для другой – 21 месяц.

После длительных испытаний образцы были разгружены и испытаны кратковременным нагружением с доведением до разрушения (рис. 2).

В ходе испытаний производились измерения прогибов посредством индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленных в середине пролета, продольных деформаций бетона сжатой и растянутой зон с помощью индикаторов часового типа МИГ-1 с ценой деления 0,001 мм и базой измерения 200 мм, а также тензорезисторов с базой измерения 50 мм. В ходе проведения испытаний регистрировались этапы развития нормальных и наклонных трещин, ширина раскрытия которых определялась с помощью микроскопа МПБ-100, с ценой деления 0,01 мм.

В ходе длительного нагружения наиболее интенсивный рост прогибов происходил в первые 5-6 месяцев испытаний, что объясняется развитием деформаций усадки и ползучести бетона. Образцы после снятия длительной нагрузки имели остаточные прогибы.



Рисунок 2. Испытательный стенд для проведения испытаний

Измерения продольных деформаций бетона в середине пролета позволили установить близкий к линейному характер распределения деформаций по высоте сечения.

Разрушение каждой из балок происходило по нормальным сечениям в зоне чистого изгиба. В местах разрушения балок основной группы наблюдалось уменьшение площади сечения рабочих стержней. Для всех типов образцов свойственно снижение их прочности с увеличением сроков воздействия агрессивной среды и степени коррозионных повреждений. Коррозионные повреждения арматуры балок с меньшим диаметром рабочих стержней вызывают более значительное снижение их прочности по нормальным сечениям в сравнении с балками с большим диаметром рабочим стержней при прочих равных условиях.

С увеличением степени коррозионных повреждений арматуры в образцах наблюдается увеличение прогибов по сравнению с контрольными образцами.

Результаты испытаний приведены в таблицах 1, 2, 3 и на рис. 6.

Образование нормальных трещин было зарегистрировано во всех образцах при их первом нагружении, а также при дальнейших испытаниях. Наибольшее появление и развитие трещин зарегистрировано в зоне чистого изгиба конструкций. Момент трещинообразования составлял 26...33% от разрушающего.

Таблица 1. Прогибы балок при загрузке длительной нагрузкой.

Маркировка образца	Величина прогиба, мм					
	после первого нагружения	после действия нагрузки в течение 14 мес	остаточный прогиб после первого нагружения	после второго нагружения	после действия нагрузки в течение 7 мес	остаточный прогиб после второго нагружения
6-15-I	3,27	4,96	1,95	5,07	5,42	2,59
6-15-II	3,62	5,63	2,98	-	-	-
6-10-III	3,45	5,41	2,20	5,61	5,85	2,18
6-10-IV	2,97	4,79	1,59	-	-	-
6-15(1)	3,16	4,42	1,69	4,52	4,81	1,89
6-15(2)	3,09	4,87	2,16	-	-	-
8-15-I	4,43	6,63	2,68	6,74	6,96	3,63
8-15-II	3,87	6,14	2,23	-	-	-
8-10-III	4,20	6,59	2,32	6,74	6,95	2,8
8-10-IV	4,08	6,30	1,86	-	-	-
8-15(1)	4,12	6,25	1,92	6,4	6,74	2,24
8-15(2)	4,35	6,67	2,52	-	-	-

На балках, подверженных воздействию агрессивной среды, после 6 месяцев проведения длительных испытаний были обнаружены трещины вдоль рабочих стержней арматуры на поверхностях нижних граней, образованные в результате давления продуктов коррозии на участки бетона контактной зоны. Наибольшая ширина раскрытия таких трещин составила 0,1...0,3 мм

Исследование арматурных стержней после проведения испытаний показало многочисленные образования близко расположенных питтингов на поверхностях стержней. При этом проявляется выраженное развитие коррозии вглубь стержня, а глубина коррозии питтингов неравномерна.

Глубина коррозии в местах наибольших повреждений стержней составила 0,6...0,9 мм. На основании измерений коррозионного потенциала с помощью анализатора коррозии Proseq Canin в ходе длительных испытаний и анализа величины глубины коррозии стержней за установленные периоды времени можно установить, что скорость коррозии снижается с течением времени.

В третьей главе представлена методика расчета поврежденных коррозией железобетонных изгибаемых элементов.

Разработана математическая модель развития коррозионных повреждений стальной арматуры с течением времени, основанная на экспериментальных данных автора, а также теоретических работах других авторов.

Для математического моделирования развития коррозионных повреждений арматуры с течением времени в целях разработки методики расчета железобетонных элементов по прочности нормальных сечений и деформативности были приняты следующие предпосылки и допущения:

1. В рамках модели рассматривается только коррозионный период.
2. Агрессивность среды по отношению к арматуре остается постоянной в пределах рассматриваемого периода времени.
3. Диффузионная проницаемость бетона защитного слоя к агрессивной среде остается постоянной в пределах рассматриваемого периода времени и не испытывает значительного влияния от образования в нем трещин.
4. Отсутствует явление коррозионного охрупчивания стали, механические характеристики арматурной стали остаются постоянными в пределах рассматриваемого периода времени.
5. Изменение сцепления арматуры с бетоном в результате накопления на контактной поверхности продуктов коррозии незначительно или отсутствует.
6. Положения центра тяжести сечения рабочей арматуры в поперечном сечении элемента остается постоянным.

Расчет железобетонных конструкций с коррозионными повреждениями сводится к анализу напряженно-деформированного состояния сечений элемента, в которых произошло изменение площади поперечного сечения рабочей арматуры за определенный промежуток времени.

$$A_s^* = A_s - \Delta A_s, \quad (1)$$

где A_s^* - остаточная площадь сечения арматуры; A_s - начальная площадь сечения арматуры; ΔA_s - площадь арматуры, потерянная в результате коррозии.

Потеря сечения происходит в пределах кругового сегмента, что учитывает характер коррозионных повреждений арматуры в хлоридной среде при развитии питтингов. Тогда:

$$\Delta A_s^o = R^2 \arccos\left(\frac{c}{R}\right) - c\sqrt{R^2 - c^2}, \quad (2)$$

где R - радиус стержня, δ - глубина коррозии, $c = R - \delta$.

Установлено, что периметр арматуры периодического профиля больше круглого до 15%, а величина потерянной площади арматуры при одинаковой

глубине коррозии для периодического профиля превышает ΔA_s^0 до 20%. Таким образом, предложено определять потерянную площадь арматуры ΔA_s по следующей формуле:

$$\Delta A_s = \Delta A_s^0 \cdot \gamma_s, \quad (3)$$

где γ_s – коэффициент, принимаемый равным 1,0 – для арматуры гладкого профиля, 1,2 – для арматуры периодического профиля.

Глубину коррозионных повреждений предлагается определять по формуле:

$$\delta = \frac{k}{\sqrt{a}} \cdot t^n, \quad (4)$$

где k – эмпирический коэффициент, отражающий влияние на распространение коррозии постоянных параметров, n – эмпирический коэффициент, отражающий изменение скорости коррозии со временем, $0 < n < 1$, a – величина защитного слоя бетона, мм.

При наличии коррозионных повреждений бетона сечение рассматривается как составное из слоев с измененными прочностными и деформационными характеристиками (рис. 3). Для этого предлагается воспользоваться зависимостями В.М. Бондаренко:

$$R_b^* = kR_b; R_{bt}^* = kR_{bt}; E_b = kE_{bp}, \quad (5)$$

где k – множитель линейной зависимости, R_b , R_{bt} и E_{bp} – соответственно исходные значения расчетного сопротивления бетона на сжатие и растяжение и временный модуль деформации.

При частичном сохранении бетоном сжатых фибровых слоев способности к силовому сопротивлению, граничные значения множителя k равны:

$$k = k_0 \text{ при } z = x; k = 1 \text{ при } z = x - \delta, \quad (6)$$

где z – расстояние слоя бетонного сечения от нейтральной оси, x – высота бетона сжатой зоны; δ – глубина коррозионных повреждений.

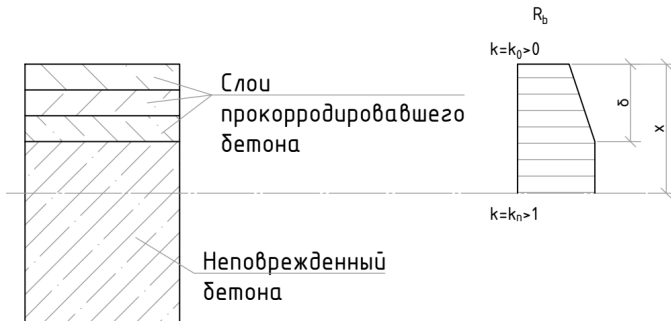


Рисунок 3. Поперечное сечение бетона, поврежденного коррозией.

Определение R_b^* возможно неразрушающими методами контроля при проведении обследований технического состояния железобетонных конструкций.

Для оценки напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных конструкций приняты следующие предпосылки:

1. Для расчета принимается сечение, напряженно-деформируемое состояние которого соответствует усредненному состоянию блока между трещинами.
2. Деформации в рассматриваемом сечении распределяются в соответствии с гипотезой плоских сечений.
3. Зависимость между напряжениями и деформациями описывается в соответствии с положениями научной школы А.Б. Гольшера:

$$\sigma_b(t) = R_b(t) \sum_{k=1}^n a_k(t) \left(\frac{\varepsilon_b(t)}{\varepsilon_{bR}(t)} \right)^k. \quad (7)$$

4. Работа растянутого бетона после достижения предельных деформаций растяжения бетона $\varepsilon_{bt,u} = 2R_{bt}/E_b$ описывается прямоугольной эпорой с ординатой $\psi_{bt}R_{bt}$, где ψ_{bt} – коэффициент, учитывающий снижение усилия, воспринимаемого бетоном растянутой зоны вследствие развития трещин.

5. Зависимость между напряжениями и деформациями арматурной стали описывается кусочно-линейной диаграммой.

В данной методике предложен обратный метода расчета, в котором предусмотрено определение действующего в сечении момента, а затем жесткости по заданной кривизне.

Уравнения равновесия для сечения элемента без трещин при отсутствии продольной силы принимают вид (рис. 4):

$$\int_A \sigma_b^* dA + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} A_{sj}^* = 0; \quad (8)$$

$$\int_A \sigma_b^* y dA + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} y_{sj} A_{sj}^* - M = 0, \quad (9)$$

где σ_b^* – напряжения в бетоне элементарной площадки площадью dA_b с учетом его коррозионных повреждений, расположенной на расстоянии y от нижней грани сечения; σ_{sj} , A_{sj}^* , y_{sj} – напряжения в j -ом арматурном стержне, его площадь сечения и расстояние от центра тяжести сечения стержня до нижней грани сечения элемента; M – внешний изгибающий момент.

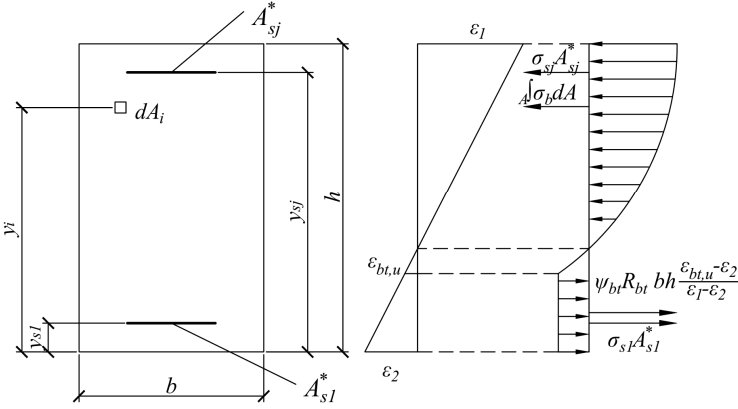


Рисунок 4. Напряженно-деформированное состояние сечения.

Используя выражение $\aleph = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_2}{y_i}$, после преобразований уравнений

(8, 9) получим:

Для сечений элемента без трещин

$$\frac{R_b^*}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \cdot \frac{\varepsilon_1^{k+1} - \varepsilon_2^{k+1}}{\varepsilon_{bR}^k} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \mu_{sj} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{R_b^*}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left(\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+2} \cdot \frac{\varepsilon_1^{k+2} - \varepsilon_2^{k+2}}{\varepsilon_{bR}^k} - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \cdot \frac{\varepsilon_1^{k+1} - \varepsilon_2^{k+1}}{\varepsilon_{bR}^k} \right) + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \mu_{sj} \xi_{sj} - m = 0. \quad (11)$$

Для сечений элемента с трещинами

$$\frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left(R_b^* \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \cdot \frac{\varepsilon_1^{k+1} - \varepsilon_{bt,u}^{k+1}}{\varepsilon_{bR}^k} + \psi_{bt} R_{bt} (\varepsilon_{bt,u} - \varepsilon_2) \right) + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \mu_{sj} = 0; \quad (12)$$

$$\frac{R_b^*}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left(\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+2} \cdot \frac{\varepsilon_1^{k+2} - \varepsilon_{bt,u}^{k+2}}{\varepsilon_{bR}^k} - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{k+1} \cdot \frac{\varepsilon_1^{k+1} - \varepsilon_{bt,u}^{k+1}}{\varepsilon_{bR}^k} \right) + \frac{\psi_{bt} R_{bt} (\varepsilon_{bt,u} - \varepsilon_2)^2}{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj} \mu_{sj} \xi_{sj} - m = 0. \quad (13)$$

Определяя параметры напряженно-деформированного состояния сечения по заданным значениям кривизны \aleph , определяются значения ε_2 и, соответственно ε_1 . Далее определяется величина действующего в сечении изгибающего момента M , а затем и его жесткость:

$$B = \frac{M}{\aleph}. \quad (14)$$

Согласно методу заданных деформаций, в качестве известного параметра принимается кривизна или угол поворота одного из сечений конструкции, а в качестве неизвестного принимается значение модуля внешней нагрузки $|F|$:

$$\vec{F} = |F| \cdot \vec{F}^o, \quad (15)$$

где \vec{F} – вектор внешней нагрузки, \vec{F}^o – единичный вектор нагрузки.

Изогнутая ось балки представлена в виде полинома четвертой степени. Тогда для участков балки (рис.5) имеем:

$$y = \sum_{i=1}^5 A_i x^{i-1}; \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{dy}{dx} = \sum_{i=1}^5 (i-1) A_i x^{i-2}; \quad (17)$$

$$\aleph = \frac{d^2 y}{dx^2} = \sum_{i=1}^5 (i-1)(i-2) A_i x^{i-3}; \quad (18)$$

$$\frac{Q}{B} = \frac{d^3 y}{dx^3} = \sum_{i=1}^5 (i-1)(i-2)(i-3) A_i x^{i-4}, \quad (19)$$

где y – величина прогиба оси балки на расстоянии x от начала участка; A_i – коэффициенты, определяемые методом начальных параметров; φ – угол поворота оси балки на расстоянии x от начала участка; \aleph – кривизна в данной точке; Q – поперечная сила.

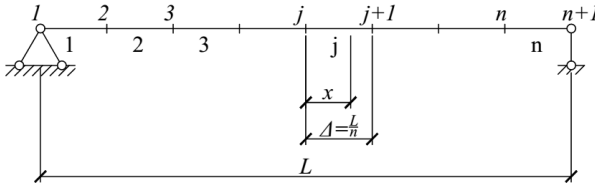


Рисунок 5. Схема однопролетной балки.

Представим изгибающий момент и поперечную силу в следующем виде:

$$M_i = F \cdot MK_{pi}; \quad (20)$$

$$Q = F \cdot MK_i. \quad (21)$$

Выразим модуль внешней нагрузки из выражения:

$$F = \frac{\sum_{k=2}^{IP-1} \frac{F_{pk}}{B_k} (n-2k+1) + \sum_{k=IP+1}^n \frac{F_{pk}}{B_k} (n-2k+1) + \sum_{l=1}^n \frac{MK_l^R}{12B_l} \Delta(3+4n-8l) + \sum_{m=2}^{n+1} \frac{MK_m^L}{12B_m} \Delta(5+2n-4m)}{\sum_{k=2}^{IP-1} \frac{F_{pk}}{B_k} (n-2k+1) + \sum_{k=IP+1}^n \frac{F_{pk}}{B_k} (n-2k+1) + \sum_{l=1}^n \frac{MK_l^R}{12B_l} \Delta(3+4n-8l) + \sum_{m=2}^{n+1} \frac{MK_m^L}{12B_m} \Delta(5+2n-4m)} \quad (22)$$

Далее определяются значения прогибов и углов поворота изогнутой оси балки.

На основании разработанной методики расчета представлен алгоритм расчета с применением ЭВМ, состоящий из следующих блоков: «Сечение», включающий методику оценки напряженно-деформированного состояния нормальных сечений элемента, «Стержень», реализующий итерационный расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, и блок «Арматура», в котором происходит определение действующих в арматуре напряжений и деформаций.

В четвертой главе приведены численные исследования, подтверждающие достаточную точность расчета и целесообразность использования методики для определения параметров прочности и деформативности железобетонных конструкций с коррозией арматуры.

Для проведения численных исследований были приняты опытные данные автора и других авторов.

Выполнен расчет значений глубины коррозии арматурных стержней опытных образцов основной группы с последующим их сравнением с фактическими данными измерений поврежденных сечений арматуры. Погрешность определения глубины коррозии во всех образцах не превысила 5%, за исключением одного образца, в котором погрешность составляет 13%, что привело к повышению запаса прочности. Теоретические значения величин коррозионных повреждений арматуры опытных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Теоретические значения величин коррозионных повреждений арматуры опытных образцов основной группы

Образец	Значения коэффициентов		Защитный слой бетона a , мм	Время коррозии t , лет	Глубина коррозии δ , мм		Остаточная площадь A_s^* , см ²
	k	n			$\delta^{смер}$	$\delta^{ср}$	
6-15-I	2,12	0,64	15	1,75	0,783	0,79	0,261
6-15-II				1,167	0,604	0,58	0,268
6-10-III			10	1,75	0,959	0,97	0,254
6-10-IV				1,167	0,740	0,73	0,263
8-15-I		0,72	15	1,75	0,819	0,81	0,476
8-15-II				1,167	0,612	0,54	0,485
8-10-III			10	1,75	1,003	0,99	0,466
8-10-IV				1,167	0,749	0,78	0,479

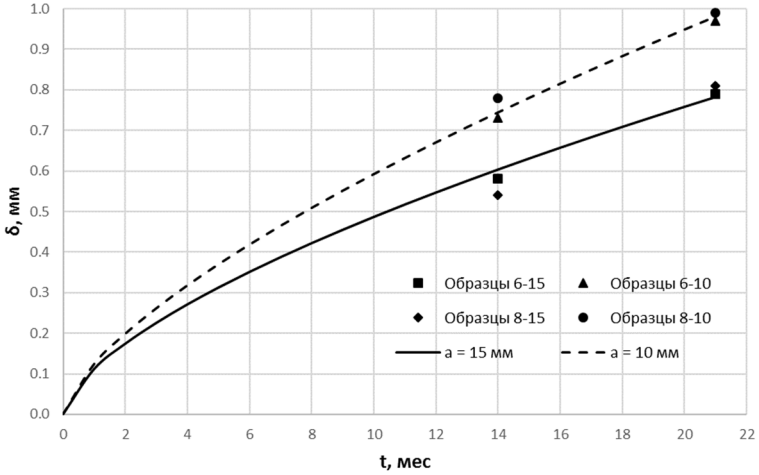


Рисунок 6. Диаграмма « $\delta - t$ » балок основной группы

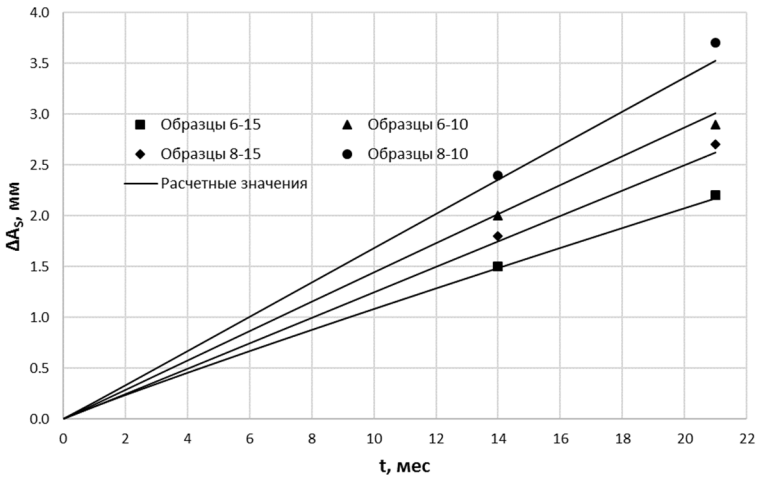


Рисунок 7. Диаграмма « $\Delta A_s - t$ » балок основной группы

Значения глубины коррозионных повреждений, полученные в экспериментах других авторов (Maaddawy T.E. и др., Du Y. и др., Rodrigues J. и др., Liu Y. и др.) были использованы для сравнения с расчетными значениями, полученными с применением математической модели развития коррозионных повреждений. Для этого из экспериментальных данных нелинейной аппроксимацией методом наименьших квадратов были определены коэффициенты k и n .

Погрешность определения глубины коррозии во всех образцах не превысила 9% и, в среднем, составила 3,3%. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно достоверном определении глубины коррозии у разработанной математической модели и ее возможном практическом применении при определении прочности и деформативности железобетонных конструкций перекрытий и покрытий.

Установлено, что методика автора обладает более высокой точностью определения предельной нагрузки, чем методика расчета, предложенная строительными нормами (таблица 3). Погрешность определения предельной нагрузки по методике не превышает 5%

Таблица 3. Значения предельных нагрузок опытных образцов.

Маркировка образца	Предельная нагрузка $P_{разр}$, кН				
	Опытные значения $P_{разр}^{оп}$	Расчетные значения			
		по нормам		по методике автора	
		$P_{разр}^{теор}$	$P_{разр}^{теор} / P_{разр}^{оп}$	$P_{разр}^{теор}$	$P_{разр}^{теор} / P_{разр}^{оп}$
6-15-I	4,17	3,92	0,940	4,11	0,985
6-15-II	4,26	4,02	0,944	4,21	0,988
6-10-III	4,37	4,05	0,926	4,30	0,983
6-10-IV	4,55	4,19	0,920	4,44	0,975
6-15(1)	4,49	4,24	0,945	4,42	0,985
6-15(2)	4,56	4,24	0,930	4,42	0,970
8-15-I	5,78	5,76	0,996	5,83	1,009
8-15-II	5,99	5,87	0,979	5,93	0,990
8-10-III	6,23	6,01	0,965	6,16	0,989
8-10-IV	6,43	6,17	0,959	6,37	0,991
8-15(1)	6,18	6,06	0,980	6,12	0,990
8-15(2)	6,15	6,06	0,986	6,12	0,995
Среднее арифметическое отклонение			-0,44		-0,013
Среднеквадратическое отклонение			0,05		0,016

Получены теоретические диаграммы «нагрузка – прогиб» всех опытных образцов, которые были сопоставлены с экспериментальными диаграммами этих образцов. Некоторые из диаграмм приведены на рис. 8.

На основании теоретических и опытных значений прогибов, можно судить о приемлемой точности определения прогибов железобетонных балок по разработанной методике.

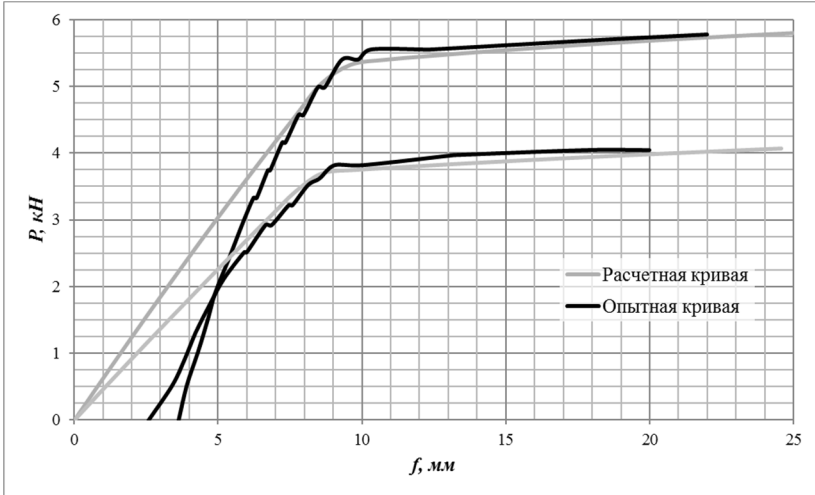


Рисунок 8. Диаграмма « P - f » балок (срок испытания 21 месяцев, диаметр рабочей арматуры - 6 и 8 мм, защитный слой 15 мм)

Представлены рекомендации к прогнозированию прочности и деформативности железобетонных конструкций покрытий и перекрытий с коррозионными повреждениями арматуры и оценке и их остаточного ресурса на основе разработанной методики расчета.

Основная задача выполняемого расчета заключается в определении коэффициентов k и n в формуле (4), а также момента инициации коррозии. Определение неизвестных можно достигнуть путем решения системы трех уравнений с использованием данных о глубине коррозии δ_i в соответствующий момент срока эксплуатации t_i :

$$\begin{aligned} \delta_1 - \frac{k}{\sqrt{a}} \cdot (t_1 - t_0)^n &= 0; \\ \delta_2 - \frac{k}{\sqrt{a}} \cdot (t_2 - t_0)^n &= 0; \\ \delta_3 - \frac{k}{\sqrt{a}} \cdot (t_3 - t_0)^n &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

При отсутствии необходимого количества данных можно воспользоваться расчетными моделями определения периода инициации коррозии. Тогда, при $t_1 = t_0$, $\delta_1 = 0$, определение неизвестных сводится к решению системы двух уравнений.

Для оценки остаточного ресурса конструкции следует установить условия безопасной работы конструкции в соответствии с предъявляемыми требованиями долговечности и надежности ее эксплуатации:

$$P(t) \leq P'; \quad (24)$$

$$f(t) \leq f', \quad (25)$$

где $P(t)$ и $f(t)$ – величина внешней нагрузки, воспринимаемой сечением элемента и его наибольшая величина прогиба в определенный момент времени эксплуатации t соответственно, P' и f' – их предельно допустимые значения.

В качестве практической реализации предложенных положений был рассчитан остаточный ресурс сборных железобетонных безбалочных конструкций перекрытия здания фабрики мороженого, расположенного по адресу: г. Белгород, ул. Дзгоева 2, при этом рассчитанная глубина коррозии арматуры подтверждается ее фактическим значениям, определенным при вскрытии защитного слоя бетона конструкции перекрытий. Диаграмма изменения несущей способности межколонной плиты на рассматриваемом промежутке времени приведена на рис. 9.

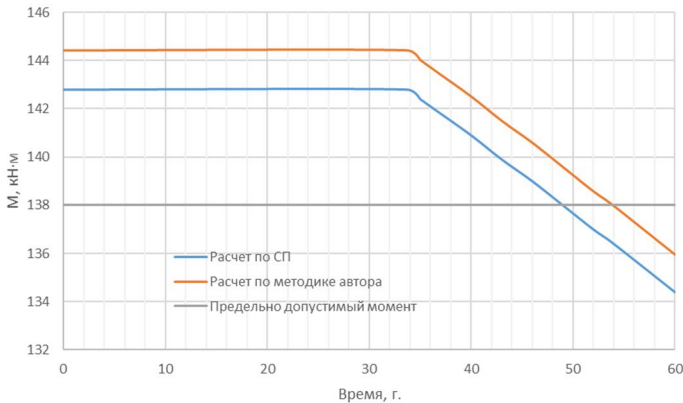


Рисунок 9. Диаграмма снижения несущей способности межколонной плиты с течением времени.

Согласно проведенному расчету остаточный ресурс с учетом коррозионных повреждений арматуры составил 5 лет по действующим строительным нормам и 9 лет по методике автора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика проведения испытаний железобетонных изгибаемых элементов при длительном действии нагрузки, предусматривающая накопление коррозионных повреждений стальной арматуры.

2. Получены экспериментальные данные по прочности, деформативности и трещиностойкости однопролетных железобетонных балок с такими повреждениями. Установлены коррозионные повреждения арматуры в виде отдельных близкорасположенных питтингов с неравномерной глубиной коррозии, приводящие к образованию продольных трещин защитного слоя бетона. Определены особенности напряженно-деформированного состояния образцов

и разрушения балок образцов. При увеличении срока действия агрессивной среды происходит снижение прочности образцов по нормальному сечению и увеличение их прогибов и ширины раскрытия трещин.

3. Разработана математическая модель развития коррозионных повреждений, учитывающая уменьшение площади поперечного сечения арматуры в условиях хлоридной агрессивной среды, изменение глубины коррозии арматуры с течением времени, характер распределения повреждений в поперечном сечении арматурного стержня, величину защитного слоя бетона.

4. Разработана методика расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных коррозией, с использованием метода заданных деформаций. Диаграмма деформирования бетона сжатой зоны аппроксимирована полиномом пятой степени. Кривая изогнутой оси элемента аппроксимирована полиномом четвертой степени. Представлен алгоритм расчета железобетонных элементов по прочности и деформативности с использованием разработанной методики и его реализацией на ЭВМ.

5. Проведены численные исследования по прочности и деформативности поврежденных коррозией железобетонных конструкций, в результате которых установлено, что разработанная автором математическая модель развития коррозионных повреждений и методика расчета применительно к железобетонным конструкциям перекрытий и покрытий по прочности и деформативности имеют достаточно высокую точность и достоверность результатов расчета.

6. Представлены рекомендации к прогнозированию прочности и деформативности железобетонных конструкций покрытий и перекрытий с коррозионными повреждениями и оценке их остаточного ресурса.

Перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы заключаются в повышении точности расчета железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями на прочность и деформативность, внедрении разработанных методик расчета и рекомендаций в области проектирования и обследования технического состояния железобетонных конструкций перекрытий и покрытий.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Смоляго Г.А. Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций / Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дрокин С.В., Дронов А.В. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2014. — №2. — С. 22-24.

2. Смоляго Г.А. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры / Смоляго Г.А., Дронов В.И., Дронов А.В., Меркулов С.И. // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — №12. — С. 25-27.

3. Смоляго Г.А. Расчет многопролетных железобетонных балок по методу заданных деформаций / Смоляго Г.А., Жданов А.Е., Дрокин С.В., Дронов

А.В. // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — №12. — С. 59-61.

4. Смоляго Г.А. Оценка остаточного ресурса несущей способности сборных безбалочных железобетонных перекрытий / Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Пушкин С.А., Смоляго Е.Г. // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2016. — № 6. — С. 66-73.

5. Смоляго Г.А. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды / Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2017. — т. 21, № 1 (70). — С.43-49.

6. Дронов А.В. Особенности развития питтинговой коррозии стальной арматуры железобетонных изгибаемых элементов / Дронов А.В. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2017. — №3. — С. 32-36

Публикации в других изданиях:

7. Смоляго Г.А. Анализ требований норм СНиП, ЕВРОКОД, АСІ по долговечности железобетона / Смоляго Г.А., Дронов А.В. // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2014. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

8. Смоляго Г.А. Разработка методики экспериментальных исследований железобетонных конструкций перекрытий и покрытий на долговечность с учетом дефектов / Смоляго Г.А., Дронов А.В. // Материалы международной научной конференции «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность». — М. — 2013. . — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

9. Дронов А.В.. Армирование, как фактор долговечности железобетонных конструкций / Дронов А.В., Бахтияр М. // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2014. . — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

10. Смоляго Г.А. Исследование и анализ процессов коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций под действием агрессивной среды / Смоляго Г.А., Дронов А.В. // Бетон и железобетон – взгляд в будущее - научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.) : в 7 т. Т.3 Арматура и системы армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. М.: МГСУ. — 2014. — с. 415-420.

Подписано в печать 05.07.2017 г.

Усл. печ. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16

Заказ № 190

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46