

ВАСИЛЬЕВ
Александр Анатольевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия

Минск 2021

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете и УО «Белорусский государственный университет транспорта»

Научный консультант

Бабицкий Вячеслав Вацлавович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные материалы и технология строительства» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Официальные оппоненты:

Ковалёв Ярослав Никитич, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник образования Республики Беларусь, г. Минск;

Шаповалов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом № 1 «Композиционные материалы и рециклинг полимеров» государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого» Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель;

Яглов Валерий Николаевич, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная экология» Белорусского национального технического университета, г. Минск

Оппонирующая организация

Республиканское унитарное предприятие «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С.С.», г. Минск

Защита состоится 19 ноября 2021 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (017) 293-96-73, e-mail: kovshar-36@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «18» октября 2021 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук

С.Н. Ковшар

ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее большинство железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатируются в различных воздушных средах. Под воздействием агрессивных компонентов атмосферной среды, статических и динамических нагрузок, в них развиваются коррозионные процессы. Взаимодействие углекислого газа (концентрация которого в атмосфере в 10^2 – 10^4 раз выше содержания других кислых газов) с кристаллогидратами цементного камня вызывает карбонизацию бетона, обуславливая его нейтрализацию, снижающую пассивирующие свойства бетона по отношению к стальной арматуре, способствуя развитию ее коррозии и разрушению защитного слоя бетона. Таким образом, от развития процессов карбонизации в бетоне, напрямую зависит техническое состояние ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в любых атмосферных средах. В связи с этим исследованию влияния карбонизации на коррозионное поведение бетона уделялось и уделяется большое внимание. Проведены многочисленные исследования по определению механизма карбонизации, влияния на ее кинетику различных технологических и климатических факторов. Разработаны методики оценки скорости и глубины карбонизации. Вместе с тем, полученные результаты у различных авторов не только значительно отличаются, но зачастую носят противоречивый характер. Кроме того, поскольку существующий метод оценки карбонизации основан на использовании фенолфталеинового теста (ФФТ), практически отсутствуют исследования карбонизации до и после зоны резкого перехода окраски слоев бетона, и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, т.е. влияния на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК. Таким образом, существующие методики, основанные на оценке карбонизации ФФТ, являются частным случаем исследования такого значительного процесса (с точки зрения влияния на поврежденность ЖБЭ и ЖБК) и позволяют лишь очень приблизительно оценивать и прогнозировать во времени структурные изменения в бетоне, наличие и развитие коррозионных процессов в стальной арматуре, и как следствие – техническое состояние ЖБЭ (ЖБК), как на момент обследования, так и с течением времени. Поэтому, одним из первоочередных направлений исследований для качественной оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, является исследование структурных изменений бетона по сечению во времени под воздействием карбонизации и их влияния на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) в целом, на основании изучения изменения физико-химических показателей цементного камня, как лабораторных образцов, так и отобранных из реальных элементов и конструкций. Это позволит получить расчетно-экспериментальные зависимости изменения во времени параметров карбонизации, выявить взаимосвязь физико-химических параметров бетона защитного слоя с состоянием стальной арматуры и назначить критерии оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом карбонизации бетона, разработать методики оценки и прогнозирования состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и в целом технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Их применение, как на стадии проектирования, так и при детальном обследовании ЖБЭ и ЖБК даст возможность значительно более объективно оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБЭ и ЖБК; определять причины создания аварийных ситуаций и аварий; разрабатывать комплексы мероприятий по восстановлению элементов и конструкций.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Настоящая работа получила развитие при выполнении ГПФИ «Поверхность – 54 «Исследование физико-механических методов определения деструкции наполненных силикатных материалов, работающих в специфических агрессивных средах, для оценки состояния конструкций и разработка методов, направленных на увеличение их долговечности» (ГР № 2005223), ГПНИ «Строительные материалы и технологии». 14. «Моделирование на мезоуровне механических свойств композиционных строительных материалов с учетом агрессивного воздействия окружающей среды» (ГР № 20111895), ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал», подпрограмма «Полимеры и композиты» (ГР № 20140546).

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния бетонных и железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах с учетом влияния карбонизации бетона на изменение его защитных свойств во времени по отношению к стальной арматуре.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи исследований:

- обобщить результаты исследований различными авторами поврежденности ЖБЭ и выполнить анализ поврежденности ЖБЭ от воздействия коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре;

- выполнить экспериментальные исследования распределения показателей карбонатной составляющей (КС) и водородного показателя водной вытяжки цементного камня (рН) по сечению бетона сразу после его изготовления с применением тепловлажностной обработки (ТВО) и по сечению бетона длительно эксплуатируемых ЖБЭ;

- на основе комплекса результатов экспериментально-теоретических исследований получить расчетно-экспериментальные зависимости изменения параметров карбонизации (карбонатной составляющей и степени карбонизации) во времени по сечению бетонов для различных классов по прочности на сжатие (составов) и условий эксплуатации;

- на основе комплекса результатов экспериментально-теоретических исследований карбонизации по сечению бетона, как сразу после изготовления с применением ТВО, так и длительно эксплуатируемых ЖБЭ, разработать методику оценки изначального содержания цемента в эксплуатируемых в различных атмосферных средах, бетонных и железобетонных элементах и конструкциях;

- установить взаимосвязь физико-химических показателей бетона защитного слоя в зоне расположения стальной арматуры с ее коррозионным состоянием;

- на основании выявленной зависимости коррозионного состояния стальной арматуры от степени карбонизации (показателя СК) бетона в зоне ее расположения и полученных регрессионных зависимостей изменения во времени по сечению показателя СК бетонов различных классов по прочности на сжатие получить зависимости глубины и скорости коррозии стальной арматуры во времени от толщины защитного слоя бетона для бетонов различных классов по прочности на сжатие и условий эксплуатации;

- на основе комплекса результатов экспериментально-теоретических исследований разработать количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом карбонизации по физико-химическим показателям це-

ментно-песчаной фракции бетона защитного слоя, степеням карбонизации и коррозии стальной арматуры;

– разработать комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона.

Научная новизна. Научную новизну диссертационного исследования составляют:

– системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонатной составляющей и степени карбонизации во времени по сечению бетонов для различных классов по прочности на сжатие (количества использованного цемента) и условий эксплуатации;

– расчетно-экспериментальные зависимости глубины и скорости коррозии стальной арматуры во времени по сечению бетона от толщины защитного слоя бетона для бетонов различных классов по прочности на сжатие и условий эксплуатации;

– количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных атмосферных средах по физико-химическим показателям бетона защитного слоя;

– методика оценки изначального содержания цемента в эксплуатируемых в различных атмосферных средах, бетонных и железобетонных элементах и конструкциях;

– комплексный метод и программный комплекс оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона.

Положения, выносимые на защиту:

– системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонатной составляющей (показателя КС) и степени карбонизации (показателя СК) во времени по сечению бетонов для различных классов по прочности на сжатие и условий эксплуатации;

– методика оценки и прогнозирования состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, основанная на взаимосвязи физико-химических показателей защитного слоя бетона с его коррозионным состоянием;

– новые научно-обоснованные критерии оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК), назначенные на основе анализа результатов обследования различных типов ЖБЭ методами pH- и карбометрии и выявленных зависимостей состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре от физико-химических показателей бетона, находящегося в зоне расположения стальной арматуры. Критерии включают многоуровневую оценку состояния бетона и стальной арматуры, и по ним – оценку технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатируемых в различных воздушных средах в зависимости от срока и условий эксплуатации;

– комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона, позволяющий, на основе выполненных исследований и предложенных критериев оценки, оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБЭ (ЖБК), как на момент обследования, так и при их проектировании;

– методика оценки изначального содержания цемента в бетоне, позволяющая определять количество использованного цемента ($\text{кг}/\text{м}^3$) в эксплуатируемых в различных атмосферных средах бетонных и железобетонных элементах и конструкциях.

Личный вклад соискателя. Диссертационная работа является квалификационным научным трудом, выполненным лично соискателем.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации были представлены в виде докладов и сообщений: на международных научно-практических конференциях Белорусского государственного университета транспорта, начиная с 2001 г., на международных и региональных научно-технических семинарах, симпозиумах и конференциях: Брест, 2003, 2004, 2009, 2014, 2018, 2020 гг., Минск, 2001–2003г., 2006, 2007, 2009, 2011–2015, 2017–2020 гг., Гродно, 2010, 2016 гг., Могилев 2004–2006, 2009, 2011–2013, 2016, 2017 гг., Новополоцк, 2008–2010, 2012, 2021 гг., Slovak Republic, 2003 г., Польша, 2004, 2011, 2018 гг., Шотландия 2005 г., Украина, 2005, 2008, 2011–2014, 2019 гг., Литва, 2020 г., Россия, 2006–2010, 2013, 2014, 2017–2021 гг.

Опубликованность результатов. По результатам выполненных исследований опубликовано 105 печатных работ, включающие: 4 монографии, 72 статьи в научных журналах и сборниках (в том числе 27 по перечню ВАК), 23 статьи в сборниках материалов конференций, 5 учебных и практических пособий, 1 учебник. Общий объем публикаций составляет 180 авторских листов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных библиографических источников из 582 наименований (включая собственные публикации) и десяти приложений. Полный объем диссертации составляет 448 страниц, в том числе: основная часть – 247 страниц (117 рисунков, 74 таблицы).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона, вызывающей во времени изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и снижающей долговечность ЖБЭ и ЖБК.

В первой главе выполнен анализ общего состояния вопроса, осуществлены обобщение и оценка имеющихся исследований в области теории и практики железобетона и бетоноведения. Отмечен большой вклад отечественных и зарубежных ученых И.Н. Ахвердова, Н.П. Блещика, В.В. Шапиро, Т.Е. Шалимо, Н.И. Шепелевича, И.В. Смеха, Т.М. Пецольда, Л.К. Лукши, Н. Фролова, А.И. Мордича, В. А. Потершука, В. Г. Казакеча, В. В. Тура, Н. А. Рака, Я. Д. Семенюка, Ю.М. Баженова, Ф. М. Иванова, Ф. М. Ли, Г. В. Несветаева, П. И. Юхневского, С.Н. Алексеева, В.И. Бабушкина, В. М. Москвина, Н.К. Розенталя, В.Ф. Степановой, Э. И. Батыновского, В. В. Бабицкого и др.

Рассмотрены и проанализированы основные атмосферные факторы, воздействующие на ЖБЭ и ЖБК и определяющие их техническое состояние. Показано, что основными видами повреждений ЖБЭ и ЖБК любых типов зданий и сооружений являются физические, химические, биологические, коррозия стальной арматуры. На основании результатов исследований различных ученых выполнен анализ основных видов повреждений, причин их возникновения и факторов, влияющих на скорость их развития.

Проведен анализ поврежденности основных типов ЖБЭ по 10 зданий для эксплуатационных условий открытой атмосферы, общественных зданий и промышленных с неагрессивной эксплуатационной средой, и сельскохозяйственных помещений для различных сроков эксплуатации. Выявлено, что основными видами повреждения ЖБЭ, независимо от условий эксплуатации, являются повреждения, вызванные коррозионными процессами в бетоне и (или) стальной арматуре. На основе проведенного анализа для возможности укрупненной оценки развития коррозионных повреждений

бетона и стальной арматуры при проектировании либо обследовании строительных конструкций получены регрессионные зависимости изменения во времени коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре вида

$$П = A + B\sqrt{t}, \quad (1)$$

где А и В – коэффициенты, t – прогнозный период, годы.

В таблице 1 представлены полученные аналитическим путем коэффициенты А и В для различных эксплуатационных условий.

Таблица 1. – Значения коэффициентов А и В

Конструктивный элемент	С/Х		А		ОПЗ	
	А	В	А	В	А	В
Колонны	17,0	0,620	7,33	1,75	8,60	1,07
Стропильные балки (фермы)	11,7	2,07	13,8	1,99	5,80	1,24
Стеновые панели	28,9	1,07	7,68	1,52	7,83	0,840
Плиты покрытия	49,5	1,09	21,0	1,70	0,345	1,45
Примечание – С/Х; ОПЗ; А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий, открытой атмосферы; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой.						

Тем не менее, логичное поступательное развитие во времени коррозионных повреждений не всегда подтверждается результатами обследования. Показано, что достаточно часто, коррозионные повреждения более высокой интенсивности (при эксплуатации ЖБЭ и ЖБК в однопипных условиях) наблюдаются в ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся менее длительные сроки, с другой стороны, – при практически одинаковой (внешне) поврежденности ЖБЭ и ЖБК, их техническое состояние (эксплуатирующийся в одном здании (сооружении), и подверженных, соответственно, схожим атмосферным воздействиям) за счет различного течения коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре, может разительно отличаться. Это определяет необходимость при оценке и прогнозировании поврежденности ЖБЭ (ЖБК), учитывать не только физико-механические характеристики бетона и стальной арматуры, определенные на момент детального обследования, но и внутренние процессы, происходящие в бетоне и изменяющие состояние его защитных свойств по отношению к стальной арматуре и, соответственно, способствующие возникновению и развитию коррозионных процессов в стальной арматуре. Однако, основные методы технической диагностики ЖБЭ и ЖБК зданий и сооружений, входящие в комплекс работ по обследованию строительных конструкций, позволяют оценивать только отдельные физические и физико-механические характеристики материалов элементов и конструкций и их техническое состояние в целом на момент обследования. При этом они не дают возможности прогнозировать изменение характеристик материалов и технического состояния ЖБЭ и ЖБК с течением времени как в одних и тех же условиях эксплуатации, так и при их изменении. Кроме того, существующие методы не позволяют оценить качественные и количественные изменения состава бетона, происходящие в нем под воздействием эксплуатационной среды, и их влияние на долговечность конструкций.

Для ЖБЭ, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, основным процессом нейтрализации бетона является его карбонизация, поскольку основную долю кислых газов атмосферы составляет углекислый газ. Она приводит к увеличению содержания карбонатной составляющей, по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня, снижая его защитные свойства по отно-

шению к стальной арматуре и ее коррозии с последующим разрушением защитного слоя. Дальнейшее развитие этих процессов приводит к потере конструкцией несущей способности и возникновению аварийной ситуации, что обуславливает актуальность изучения процессов карбонизации и их влияния на изменение технического состояния ЖБЭ и ЖБК. Исследование параметров карбонизации и ее влияния на изменение коррозионного состояния бетона и стальной арматуры, позволит установить взаимосвязь физико-химических показателей бетона защитного слоя с коррозионным состоянием бетона и стальной арматуры, выявить характер их изменения во времени в зависимости от параметров бетона и эксплуатационной среды, назначить критерии оценки защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и разработать комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона.

Во второй главе представлен анализ результатов исследований карбонизации и влияющих на нее факторов различных ученых, а также, результаты авторских экспериментальных исследований параметров карбонизации, и ее влияния на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

Карбонизация, ее влияние на изменение физико-механических свойств бетонов и влияние различных факторов на нее исследовались в работах С.Н. Алексева, Н.К. Розенталя, В.В. Бабицкого, В.И. Бабушкина, Ю.М. Баженова, Ю.М. Бутта, Р. Бэррер, Л.А. Вандаловской, Ф.М. Иванова, В.Ф. Степановой, М. Даймон, В.М. Москвина, Н.Л. Полейко, В. Рамачандран, Д.А. Франк-Каменецкого и др.

Выполненный анализ результатов их исследований показал, что рассчитанные на основе их работ скорости и глубины карбонизации даже для одинаковых по составу бетонов значительно отличаются. Также значительно отличаются результаты исследования влияния различных факторов на карбонизацию бетона. Необходимо отметить, что подавляющее большинство исследований проводилось в лабораторных условиях на экспериментальных образцах бетона с привязкой полученных данных к реально эксплуатируемым ЖБЭ (ЖБК), что не могло отразить изменения физико-механических и физико-химических характеристик бетона в зависимости от сроков и условий их эксплуатации

Для оценки карбонизации и ее влияния на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре были выполнены исследования отдельных параметров карбонизации. Так, результаты исследования распределения показателей КС и рН по сечению бетона сразу после ТВО, показали, что сразу после изготовления бетона характер их распределения по сечению бетона и последующим хранением в различных атмосферных условиях идентичен для различных классов бетона по прочности на сжатие. Анализ исследования распределения по сечению бетона показателей рН и КС по сечению бетона длительно эксплуатируемых железобетонных изделий показал, что для колонн, эксплуатирувавшихся различные сроки в одинаковых условиях с увеличением сроков эксплуатации возрастает степень карбонизации бетона и, соответственно, величина слоя бетона, потерявшего защитные свойства по отношению к стальной арматуре. Во всех случаях с увеличением глубины залегания бетона в ЖБЭ концентрация CaCO_3 снижается, а показатель рН поровой влаги возрастает по сложной экспоненциальной зависимости. При достижении $\text{pH} \geq 12$ содержание CaCO_3 становится постоянным, и в глубине бетона стремится к $\text{КС} \leq 4\%$.

В поверхностном слое значения показателя рН – минимальны, а КС – максимальны. На глубине более 30 мм независимо от класса бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации значения показателей рН и КС стремятся к постоянным величинам.

В поверхностных слоях (до 15 мм) наблюдается резкое снижение показателей pH и КС.

Анализ экспериментальных данных указывает на значительную разницу при определении толщины прокарбонизированного бетона методами pH-метрии. Поскольку при ФФТ резкий переход окраски бетона происходит при $\text{pH} \approx 10,3$ ($\text{pH}_{\text{ффт}}$), по термодинамическим расчетам возникновение коррозии стальной арматуры возможно при $\text{pH} < 11,8$ ($\text{pH}_{\text{тр}}$); общепринято, что бетон полностью карбонизируется при $\text{pH} = 9,00$ ($\text{pH}_{\text{нк}}$), при определении толщины нейтрализованного бетона ФФТ результаты по сравнению с $\text{pH}_{\text{тр}}$ и $\text{pH}_{\text{нк}}$ отличаются от двух с половиной до пяти с половиной раз.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что использование ФФТ не позволяют с достаточной степенью точности и достоверности оценивать скорость и глубину карбонизации бетона, состояние его защитных свойств по отношению к стальной арматуре и, как следствие, оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБК, эксплуатирующихся в воздушных средах. Оценка карбонизации ФФТ является частным случаем, для объективной оценки карбонизации необходимо ее исследование во времени по сечению бетона для различных составов, условий твердения и эксплуатации по физико-химическим показателям бетона (pH и КС).

Третья глава посвящена разработке систем расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонатной составляющей и степени карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для разных эксплуатационных условий.

Задача реализована путем объединения регрессионных зависимостей начальной карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) и регрессионных зависимостей изменения карбонизации в зоне расположения стальной арматуры различных типов ЖБЭ, эксплуатировавшихся разные сроки в различных атмосферных условиях.

Для получения системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона исследовали изменение показателя КС_0 (начальную карбонизацию) сразу после изготовления бетона с применением ТВО. Исследовали кубики бетона $100 \times 100 \times 100$ мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности на сжатие $\text{C}^{12}_{/15}$, $\text{C}^{16}_{/20}$, $\text{C}^{18}_{/22,5}$, $\text{C}^{20}_{/25}$, $\text{C}^{22}_{/27,5}$, $\text{C}^{25}_{/30}$, $\text{C}^{28}_{/35}$ и $\text{C}^{30}_{/37}$ различных типовых составов для основных видов ЖБЭ. Для подбора составов бетона различных классов по прочности на сжатие (смесь П1 с ОК = 1 и 4 см) использовался многофакторный метод проф. В. В. Бабицкого. Был получен набор значений показателя КС_0 для каждого сечения (по 10 значений с учетом отбраковки с погрешностью более 10 %), по которым были построены усредненные экспериментальные регрессионные зависимости $l\text{-КС}_0$ для каждого класса бетона по прочности на сжатие составов с ОК = 1 и 4 см. Проверка значимости регрессионных зависимостей выполнялась методами математической статистики. Для каждого сечения (2,5–25 мм) всех классов бетона по прочности на сжатие с шагом 2,5 мм строились гистограммы остатков. Проверялась гипотеза о нормальном распределении остатков с нулевым математическим ожиданием. Проверка «нормальности» остатков осуществлялась критериями Шапиро-Вилка, Колмогорова-Смирнова, реализованными в пакете «Statgraphics». Отсутствие систематической ошибки определялось критерием Стьюдента. Значимость регрессионной модели оценивалась критерием Фишера. Статистическая проверка показала, что все полученные уравнения регрессии адекватно описывают начальную карбонизацию.

Для построения математической зависимости, адекватно отражающей процесс карбонизации бетона по его сечению, на основе экспериментальных данных использовали методы регрессионного и корреляционного анализа.

При подборе уравнения зависимости $KC(l)$ наилучшие результаты (хорошее сглаживание точек, большой R^2 , соответствие здравому смыслу) дали пятипараметрические уравнения вида

$$KC(l) = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 l) / (\alpha_3 + \alpha_4 l^3); \quad (2)$$

$$KC(l) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \exp[-((l - \beta_2) / \beta_3)\beta_4], \quad (3)$$

где параметры α_i и β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) определялись методом наименьших квадратов, реализованным в пакетах Statgraphics и MathCAD.

Регрессионная зависимость изменения показателя KC_0 (начальной карбонизации) по сечению для свежизготовленных бетонов (после ТВО)

$$KC_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left(-\frac{(l-\beta_2)^{\beta_3}}{\beta_4}\right)}, \quad (4)$$

где $\beta_0 - \beta_4$ – коэффициенты, определяющие соответственно: β_0 – наименьшее значение $KC(l)$ [обычно, $\beta_0 = KC(l > 100 \text{ мм})$]; β_1 – разность минимального и максимального значений $KC(l)$; β_2 – минимальное значение глубины l (обычно, $\beta_2 = 0$); β_3 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_3 > 0$; β_4 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_4 > 0$.

При описании регрессионных уравнений были подобраны параметры β_i ($i = 0 \dots 4$), позволившие получить максимальные значения коэффициента детерминации (R^2) для каждого уравнения, однако параметры $\beta_0 - \beta_4$ для каждого класса бетона, соответственно, хоть и близки, но отличаются, что не дает возможность их использовать при создании единой системы уравнений, позволяющей прогнозировать изменение генерального элемента (показателя KC_0) для любого класса бетона по прочности на сжатие по значению показателя, в первую очередь определяющего карбонизацию бетона (количеству использованного цемента). Поэтому, в дальнейшем, подбор параметров β_i осуществляли из условия равенства показателей β_2, β_3 и β_4 для всех классов бетона по прочности на сжатие. Это несколько снизило показатель R^2 для каждого регрессионного уравнения, но позволило создать систему взаимосвязанных уравнений с достаточной точностью.

По результатам анализа показателей KC_0 составов с ОК = 1 и 4 см бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15} - C^{30/37}$ получено, что для наиболее различных по составу (количеству использованного цемента) бетонов (с ОК = 1 и 4 см) во всех сечениях значения карбонатной составляющей различаются не более чем на 9 %, т. е. средние значения показателя KC отличаются от крайних не более чем на 4,5 %, что практически не превышает погрешность самих методов измерения. Поэтому в дальнейшем состав бетона (количество использованного цемента) для одного класса по прочности на сжатие можно считать статистически незначимым, что позволило предложить единые усредненные для одного класса бетона по прочности на сжатие регрессионные зависимости начальной карбонизации по сечению бетона. В общем виде полученные зависимости

$$KC_0(l/t=0) = \alpha_1 + \alpha_2 e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (5)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты.

Значения коэффициентов α_1 и α_2 для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ приведены в таблице 2.

Для получения регрессионных зависимостей изменения во времени карбонатной составляющей бетона в зоне расположения стальной арматуры начальную карбонизацию (показатель KC_0) устанавливали для усредненной толщины защитного слоя $l = 15$ мм, поскольку в исследуемых областях значения показателей KC были определены для толщины защитного слоя, в основном, 10–20 мм.

Регрессионная зависимость изменения показателя KC в зоне расположения стальной арматуры во времени для постоянного значения толщины защитного слоя

Таблица 2. – Значения коэффициентов α_1 и α_2

Класс бетона по прочности на сжатие	α_1	α_2
$C^{12}/_{15}$	2,39	759364
$C^{16}/_{20}$	2,77	874723
$C^{18}/_{22,5}$	3,04	937631
$C^{20}/_{25}$	3,22	971835
$C^{22}/_{27,5}$	3,39	1005627
$C^{25}/_{30}$	3,62	1059095
$C^{28}/_{35}$	4,12	1175041
$C^{30}/_{37}$	4,32	1220706

$$KC(t / l = \text{const}) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t}, \quad (6)$$

где α_0 – показатель начальной карбонизации, %; α_1 – показатель скорости карбонизации; t – величина прогнозного периода, лет.

Для объединения двух предложенных регрессионных зависимостей необходимо получить значительное количество однотипных экспериментальных данных по карбонизации бетонов различных возрастов на разных глубинах для одинаковых составов, классов по прочности и т. д. В связи со сложностью их получения предложена эвристическая модель $KC(t, l)$, базирующаяся на допущении, что для каждого возраста бетона справедлива модель изменения карбонатной составляющей по сечению бетона (4), за исключением, что различные значения (для разных возрастов бетона) может принимать параметр β_1 :

$$KC(t, l) = \beta_0 + \beta(t) e^{\left(-\left(\frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}. \quad (7)$$

Для только что изготовленного бетона $\beta(t = 0) = \beta_1$, а для иных моментов времени $\beta(t)$ определяется решением уравнения

$$KC(l / t = 15) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} = \beta_0 + \beta_1(t) e^{\left(-\left(\frac{15 - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}. \quad (8)$$

В общем виде регрессионная зависимость изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона:

$$KC(t, l) = \beta_0 + \left(\alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0 \right) e^{\left(\left(\frac{15 - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} - \left(\frac{l - \beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}. \quad (9)$$

На основании предложенной зависимости были получены расчетно-экспериментальные зависимости изменения показателя KC во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$, $C^{16}/_{20}$, $C^{18}/_{22,5}$, $C^{20}/_{25}$, $C^{22}/_{27,5}$, $C^{25}/_{30}$, $C^{28}/_{35}$ и $C^{30}/_{37}$ составов с ОК = 1 и 4 см для условий эксплуатации открытой атмосферы, об-

щественных зданий и промышленных с неагрессивной эксплуатационной средой и сельскохозяйственных помещений. В данных зависимостях граничные значения показателя КС определяются максимальной величиной карбонизации – $КС_{\max}$.

Величина $КС_{\max}$ для различных возрастов бетона

$$КС_{\max} = ПВК \cdot \alpha. \quad (10)$$

где ПВК – предельная величина карбонизации бетона, %, α – степень гидратации цемента.

Показатель ПВК определялся для цементно-песчаной фракции бетона из следующей пропорции:

$$ПВК = \frac{m_{CaCO_3} \cdot 100}{m_{цп}}. \quad (11)$$

где m_{CaCO_3} – масса $CaCO_3$ (кг) при карбонизации m_{CaO} в 1 м^3 бетона; $m_{цп}$ – масса цементно-песчаной фракции, кг, в 1 м^3 бетона с учетом привеса за счет полного превращения CaO в $CaCO_3$:

$$m_{CaCO_3} = \frac{m_{CaO} M_{CaCO_3}}{M_{CaO}}, \quad (12)$$

где m_{CaO} – масса CaO , кг, в 1 м^3 бетона; M_{CaCO_3} – молекулярная масса $CaCO_3$ (100 г/моль, или 100 кг); M_{CaO} – молекулярная масса CaO (56 г/моль, или 56 кг);

$$m_{CaO} = m_{ц} \cdot 0,6, \quad (13)$$

где $m_{ц}$ – масса цемента в 1 м^3 бетона;

$$m_{цп} = 1,15Ц + П + (m_{CaCO_3} - m_{CaO}), \quad (14)$$

где Ц – масса цемента, кг, в 1 м^3 бетона; П – масса песка, кг, в 1 м^3 бетона.

Степень гидратации цемента и ее изменение во времени определяли по зависимостям, полученным профессором В.В. Бабицким.

Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток твердения, %,

$$\alpha_{28}^{20} = 60X - \sqrt[3]{(1,65X)^2} \cdot e^{1,65X}, \quad (15)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста. Для исследуемых бетонов принимали $X_{cp} = 1,25$ ($X = 1,2; \dots; 1,3$).

Увеличение степени гидратации цемента с течением времени

$$\alpha = \alpha_{28}^{20} [1 + 0,21g \tau (X - 0,63)(\varphi - 0,6)], \quad (16)$$

где τ – время твердения цементного камня (бетона), месяцы; φ – относительная влажность воздуха среды, доли единицы.

Для области обычной карбонизации принимали $\varphi = 0,65$ для условий общественных (промышленных) зданий, $\varphi = 0,70$ – открытой атмосферы и $\varphi = 0,75$ – сельскохозяйственных помещений. Для области ускоренной карбонизации – $\varphi = 0,80$ для условий общественных (промышленных) зданий, $\varphi = 0,85$ – открытой атмосферы, $\varphi = 0,95$ – для условий сельскохозяйственных помещений.

По результатам анализа расчетных значений прогнозируемой карбонизации для различных эксплуатационных условий для составов с ОК = 1 и 4 см бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ установлено, что для любых условий эксплуатации для наиболее различных по составу (количеству использованного цемента) бетонов прогнозные значения карбонатной составляющей различаются, в среднем, не более чем на 17 % в поверхностных слоях (до 5 мм) и не более 3 % – в остальных сечениях бетона. Высокая погрешность в слое до 5 мм объясняется повышенной гидратацией цемента в поверхностных слоях при ТВО и не является определяющей для карбонизации бетона в зоне расположения стальной арматуры. Поэтому в дальнейшем состав бетона (количество использованного цемента) для одного класса бетона по прочности на сжатие можно считать статистически незначимым (наряду с другими влияющими факторами).

Полученные результаты анализа позволили предложить усредненные для одного класса бетона по прочности на сжатие расчетно-экспериментальные регрессионные зависимости изменения карбонизации во времени по сечению для каждого типа эксплуатационных условий.

В общем виде полученные зависимости

$$KC(l, t) = \alpha_1 + \left(\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}; KC(l, t)_{\max} = \alpha_4 \alpha, \quad (17)$$

где α – степень гидратации цемента, %; α_1 – α_4 – коэффициенты.

Значения коэффициентов α_1 – α_4 для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$ и различных эксплуатационных условий приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Значения коэффициентов α_1 – α_4 для различных эксплуатационных условий

Класс бетона по прочности на сжатие	α_1	α_2	α_4	α_3					
				СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У
$C^{12}/_{15}$	2,39	0,500	27,3	0,619	1,16	0,312	0,882	0,676	0,962
$C^{16}/_{20}$	2,77	0,560	36,1	0,577	1,11	0,274	0,825	0,634	0,906
$C^{18}/_{22,5}$	3,04	0,585	39,6	0,549	1,07	0,249	0,791	0,609	0,869
$C^{20}/_{25}$	3,22	0,625	43,1	0,529	1,05	0,223	0,758	0,586	0,843
$C^{22}/_{27,5}$	3,39	0,655	45,6	0,512	1,03	0,208	0,729	0,567	0,818
$C^{25}/_{30}$	3,62	0,710	49,6	0,485	0,996	0,172	0,688	0,538	0,782
$C^{28}/_{35}$	4,12	0,760	56,3	0,438	0,937	0,105	0,621	0,485	0,717
$C^{30}/_{37}$	4,32	0,790	58,8	0,419	0,913	0,077	0,585	0,464	0,692

Примечание – СХ; ОПЗ; А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; О – область обычной карбонизации; У – область ускоренной карбонизации.

Проверка значимости полученных регрессионных зависимостей изменения показателя КС выполнялась методами математической статистики в программе «Statgraphics». Адекватность предлагаемых расчетно-экспериментальных зависимостей карбонизации бетона оценивалась (критериями Фишера, Шапиро-Вилка, χ^2 -Пирсона, Колмогорова-Смирнова, пересечений медианы, спадов и возрастаний, Бокса-Пирса, t-статистикой Стьюдента) для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации.

Для каждой проверки адекватности предлагаемых зависимостей подбирались по два реально эксплуатируемых ЖБЭ с одинаковыми классом бетона по прочности на сжатие и сроком эксплуатации, схожими эксплуатационными условиями. Определялись фактические значения карбонатной составляющей по сечению бетона с шагом 5 мм, до глубины 50 мм.

Проверка адекватности расчетно-экспериментальных зависимостей для различных классов бетона по прочности на сжатие, сроков и условий эксплуатации показала, что предлагаемые выражения в значительной степени описывают существующие в действительности физические процессы карбонизации бетона.

Полученные регрессионные зависимости изменения карбонатной составляющей позволяют прогнозировать во времени изменение показателя КС по сечению бетона с момента изготовления. Для прогнозирования роста показателя КС_{прог} при выполнении детального обследования эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК получены регрессионные зависимости, учитывающие значение показателя КС на момент обследования для различных эксплуатационных условий.

В общем виде:

$$КС_{\text{прог}} = КС_{\phi} + \alpha e^{\left(14,2 - \left(\frac{t+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} \left(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_{\phi}}\right), \quad (18)$$

где КС_φ – фактическое значение показателя КС, %, на момент обследования; α – коэффициент; t_{прог} – прогнозное значение возраста бетона, лет; t_φ – фактическое значение возраста бетона на момент обследования, лет.

Значения показателей α соответствуют значениям α₃ (таблица 3).

Приведенные в разд. 2 расчетно-экспериментальные зависимости карбонизации бетона показывают изменение во времени карбонатной составляющей (показателя КС). Для различных классов бетона по прочности величина карбонатной составляющей зависит от количества использованного цемента (Ц), В/Ц, способа твердения бетона и др. Одно и то же численное значение карбонатной составляющей для одних бетонов может свидетельствовать о начале карбонизации, а для других – уже о полной карбонизации в рассматриваемом сечении.

Для оценки карбонизации необходим параметр, который бы независимо от состава бетона позволял бы оценивать его коррозионное состояние. Таким показателем предложено принять степень карбонизации бетона (показатель СК) – величину, определяющую процент гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона.

Показатель СК рассчитывается из пропорции

$$X \% СК_i = \frac{\% КС_i \cdot 100}{\% КС_{\text{max}}}, \quad (19)$$

где СК_i и КС_i – соответственно, значения степени карбонизации и карбонатной составляющей, %, в рассматриваемом сечении бетона.

С учетом пересчета значений показателей КС, получены системы расчетно-экспериментальных зависимостей изменения во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие C¹²/₁₅–C³⁰/₃₇ степени карбонизации для различных эксплуатационных условий.

В общем виде полученные зависимости

$$CK(l,t) = \alpha_1 + (\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} / \alpha_4 \alpha \quad (20)$$

где α – степень гидратации цемента, %; α_1 – α_4 – коэффициенты.

Значения показателей α_1 – α_4 представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Значения показателей α_1 – α_4 для различных эксплуатационных условий

Класс бетона по прочности на сжатие	α_1	α_2	α_3						α_4
			СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У	
C ¹² / ₁₅	2,39	0,500	0,619	1,16	0,312	0,882	0,676	0,962	19,5
C ¹⁶ / ₂₀	2,77	0,565	0,577	1,11	0,274	0,825	0,634	0,906	25,8
C ¹⁸ / _{22,5}	3,04	0,585	0,549	1,07	0,249	0,791	0,609	0,869	28,3
C ²⁰ / ₂₅	3,22	0,625	0,529	1,05	0,223	0,758	0,586	0,843	30,8
C ²² / _{27,5}	3,39	0,655	0,512	1,03	0,208	0,729	0,567	0,818	32,6
C ²⁵ / ₃₀	3,62	0,710	0,485	0,996	0,172	0,688	0,538	0,782	35,4
C ²⁸ / ₃₅	4,12	0,760	0,438	0,937	0,105	0,621	0,485	0,717	40,2
C ³⁰ / ₃₇	4,32	0,790	0,419	0,913	0,077	0,585	0,464	0,692	42,0

Примечание – СХ; ОПЗ; А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; О – область обычной карбонизации; У – область ускоренной карбонизации.

Предлагаемый показатель не имеет никакого отношения к общепринятому понятию степени карбонизации, в соответствии с которым степень карбонизации бетона определяется количеством поглощенного бетоном CO₂ воздуха.

В четвертой главе выполнено исследование карбонизации бетона в зависимости от изначального количества использованного цемента.

На основе исследования начальной карбонизации и карбонизации бетона в зоне расположения стальной арматуры путем интерполяции были получены регрессионные зависимости l,t -КС(Ц) для дискретных значений расхода цемента 200, 300, 400, 500 и 600 кг/м³ для различных эксплуатационных условий.

Зависимость изменения карбонатной составляющей от расхода цемента

$$КС(Ц,l,t) = \gamma_1 + (\gamma_2 + \gamma_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (21)$$

где γ_1 – γ_3 – коэффициенты.

Значения показателей γ_1 – γ_3 представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных эксплуатационных условий

Расход цемента, кг/м ³	γ_1	γ_2	γ_3					
			СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У
200	2,37	0,487	0,629	1,170	0,321	0,889	0,693	0,977
300	3,06	0,603	0,557	1,090	0,249	0,806	0,620	0,895
400	3,83	0,715	0,485	0,955	0,175	0,712	0,547	0,801

Окончание таблицы 5.

Расход цемента, кг/м ³	γ_1	γ_2	γ_3					
			СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У
500	4,67	0,844	0,413	0,893	0,101	0,609	0,474	0,699
600	5,57	0,987	0,341	0,780	0,031	0,499	0,401	0,586

Примечание – СХ, ОПЗ, А – условия, соответственно, сельскохозяйственных зданий; общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; О – область обычной карбонизации; У – область ускоренной карбонизации.

Зависимость степени карбонизации от расхода цемента

$$СК(Ц, l, t) = \gamma_1 + \left(\gamma_2 + \gamma_3 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)} / (\varphi \alpha), \quad (22)$$

где γ_1 – γ_3 , φ – коэффициенты.

Путем математической обработки получена зависимость изменения показателей γ_1 – γ_3 от расхода цемента (выражения 23, 24 и таблица 6).

$$КС(l, t) = (0,0080Ц + 0,6747) + \left((0,0012,97Ц + 0,2308) + \gamma_3 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}; \quad (23)$$

$$СК(l, t) = \frac{(0,0080Ц + 0,6747) + \left[(0,0012Ц + 0,2308) + \gamma_3 \sqrt{t} \right] e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05} \right)^{0,85} \right)}}{(0,0912Ц + 0,2581)\alpha}, \quad (24)$$

где Ц – расход цемента, кг/м³.

Таблица 6. – Значения показателя γ_3

Условия эксплуатации	Коэффициент « γ_3 »
СХ О	$-0,0007Ц + 0,7730$
СХ У	$-0,001Ц + 1,3791$
ОПЗ О	$-0,0007Ц + 0,4672$
ОПЗ У	$-0,0010Ц + 1,0964$
А О	$-0,0007Ц + 0,8390$
А У	$-0,0010Ц + 1,1854$

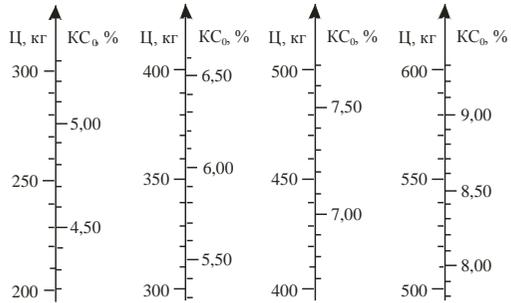
Основными параметрами, определяющими развитие во времени карбонизации бетона являются: изначальное содержание цемента, степень гидратации цемента, степень карбонизации, условия эксплуатации. И если количество цемента – величина постоянная, агрессивность среды в процессе эксплуатации может оставаться постоянной, либо изменяться незначительно, степени гидратации и карбонизации – величины непостоянные, характер изменения во времени которых зависит от различных факторов. Таким образом, для возможности разработки способа определения изначального содержания цемента в эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК необходимо исключить одну из переменных. С учетом полученных ранее результатов, в соответствии с которыми уже сразу после ТВО в поверхностном слое бетон карбонизируется практически полностью, для дальнейших исследований, можно принять, что на глубине 2,5 мм степень карбонизации бетона – 100 %, и таким образом, ее можно исключить из системы уравнений для определения количества использованного цемента по значению карбонатной составляющей.

На основании результатов исследований (п.3.1) выявлена линейная зависимость начальной карбонизации бетона от количества использованного цемента.

Зависимость карбонизации бетона в поверхностном слое (2,5 мм) от количества использованного цемента приведена на рисунке 1.

Приведенные выше исследования изменения карбонизации во времени по сечению бетона позволили получить регрессионные зависимости $KC = f(t, \rho)$, представленные поверхностями 2-го рода. Полученные зависимости дают возможность оценивать карбонизацию во времени по сечению бетона и прогнозировать ее изменение в зависимости от количества использованного цемента.

В графическом виде, на рисунке 2 представлена расчетно-экспериментальная зависимость изменения карбонатной составляющей для условий сельскохозяйственных зданий, области ускоренной карбонизации.



KC_0 – начальное значение карбонатной составляющей (сразу после ТВО), ρ – количество цемента, $кг/м^3$

Рисунок 1. – Зависимость KC_0 - ρ (для сечения 2,5 мм)

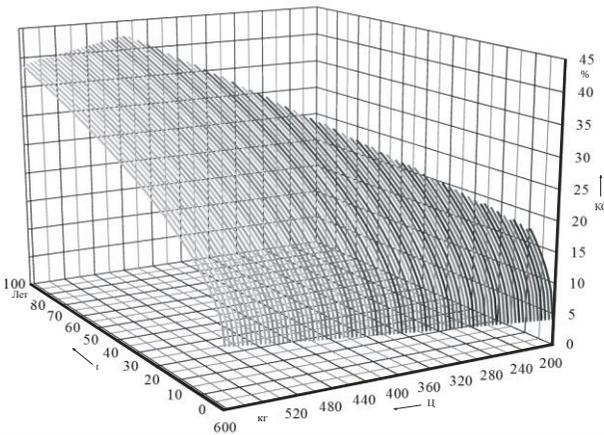


Рисунок 2. –
Расчетно-
экспериментальная
зависимость
 $KC = f(t, \rho)$
для условий
сельскохозяйствен-
ных зданий
области ускоренной
карбонизации

Для возможности практического использования зависимостей $KC = f(t, \rho)$, выполнено их исследование в линейном виде. Получены в графическом выражении регрессионные зависимости t - $KC(\rho)$ для дискретных значений количества использованного цемента $\rho = 200, 300, 400, 500$ и 600 кг/м^3 и различных эксплуатационных условий. Все зависимости носят одинаковый характер, для всех эксплуатационных условий изменение карбонатной составляющей во времени происходит от начального значения до равновесной (узловой) точки (KC_p). Так, для условий обычной карбонизации $KC_p \approx 11,5$ лет, ускоренной карбонизации – $KC_p \approx 17,0$ лет.

Для возможности использования их с достаточной точностью, определяемой точностью дозирования вяжущего в заводских условиях (5 кг/м^3), зависимости t - $KC(\rho)$ для каждого типа эксплуатационных условий разбиты на два интервала: с момента изготовления до момента уравнивания скоростей карбонизации (узловой

точки) и от него до 100 лет и для каждого типа эксплуатационных условий разбиты на диапазоны 200–300, 300–400, 400–500 и 500–600 кг/м³ с шагом 10 кг/м³.

Необходимо отметить, что, несмотря на то, что практическое значение имеют оба интервала (с момента изготовления до момента уравнивания скоростей карбонизации (равновесной точки) и от него до 100 лет), реально востребованы, конечно же, в первую очередь, могут быть, построенные до равновесной точки, поскольку определение изначального содержания цемента особенно актуально в первые годы эксплуатации объектов для оценки не только качества изготовления бетона, но и несущей способности ЖБЭ и ЖБК. Поэтому, для повышения оперативности и удобства использования для каждого типа эксплуатационных условий, построены номограммы, позволяющие определить изначальное содержание цемента с точностью до 2 кг/м³ с момента изготовления бетона, до момента времени уравнивания скоростей карбонизации.

На рисунке 3 приведена номограмма для определения изначального содержания цемента в диапазоне 500–600 кг/м³ для условий сельскохозяйственных зданий, области ускоренной карбонизации.

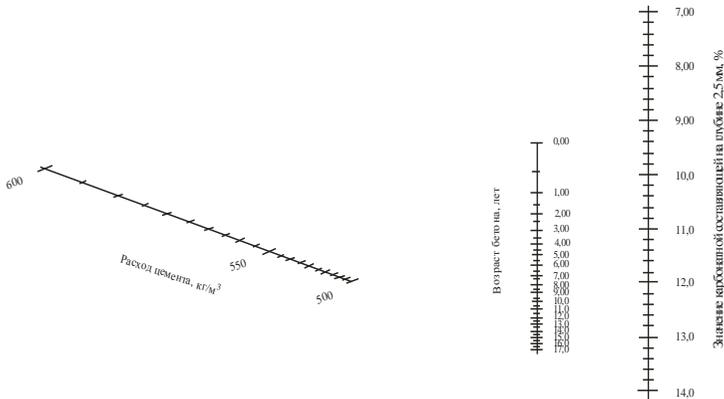


Рисунок 3. – Номограмма для определения количества изначального содержания цемента в бетоне в диапазоне 500 – 600 кг/м³ для условий сельскохозяйственных зданий, области ускоренной карбонизации

В пятой главе выполнены исследования зависимостей защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и стальной арматуры от параметров карбонизации, глубины и скорости коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона. Выполнена оценка различными методами толщины бетона, потерявшего защитные свойства по отношению к стальной арматуре. Проведен анализ возможностей применения показателя степени карбонизации бетона. Определены скорости развития коррозии стальной арматуры, оценено время предельного коррозионного повреждения стальной арматуры и выполнена оценка времени образования трещин граничной ширины раскрытия для бетонов различных классов по прочности на сжатие. Назначены критерии оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом карбонизации бетона и представлен комплекс методик оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом процессов карбонизации бетона.

По результатам исследования состояния стальной арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, предложена балльная система оценки ее состояния (таблица 7).

Таблица 7. – Оценка состояния стальной арматуры

Степень коррозии стальной арматуры (балл)	Внешние признаки коррозии стальной арматуры
0	Чистая поверхность
I	Сплошная коррозия глубиной до 0,20 мм
II	То же глубиной до 0,5 мм (малая степень интенсивности)
III	То же глубиной до 0,90 мм (средняя степень интенсивности)
IV	То же глубиной до 1,50 мм (высокая степень интенсивности)
V	То же глубиной более 1,50 мм (повышенная степень интенсивности)

Для каждой степени коррозии стальной арматуры получены области изменения показателя рН бетона, находящегося в зоне расположения стальной арматуры. Границы областей назначены на основании результатов опытных исследований и общепринятых представлений.

С учетом того, что именно показатель рН определяет защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, по результатам многолетних исследований состояния стальной арматуры в зависимости от показателя рН бетона в зоне расположения арматуры предложено шесть категорий оценки потери защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре (таблица 8).

Таблица 8. – Взаимосвязь состояния стальной арматуры и защитных свойств бетона с показателями рН

Степень коррозии стальной арматуры	Категория потери защитных свойств бетона	Граничные значения показателя рН	Состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре
0	0	>11,80	Бетон полностью сохраняет защитные свойства по отношению к стальной арматуре
I	I	11,80–10,80	Потеря защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Начало деградации бетона
II	II	<10,80–10,30	Деградация бетона малой степени интенсивности
III	III	<10,30–9,80	Деградация бетона средней степени интенсивности
IV	IV	<9,80–9,00	Деградация бетона высокой степени интенсивности
V	V	<9,00	Полная деградация бетона

Для установления взаимосвязи показателей рН и СК исследовали пробы бетона (600 шт), находящегося в зоне расположения арматуры ЖБЭ, эксплуатировавшихся различными сроками в разных атмосферных средах. Полученная область значений показателей рН и СК приведена на рисунке 4.

Граничные значения показателей рН были назначены следующим образом: >11,80; 11,80–10,80; 10,80–10,30; 10,30–9,80; 9,80–9,00. Граничные значения показателя СК x_{ij} определялись с учетом вероятностного характера распределения показателей СК. По результатам расчетов с применением пакета статистического анализа данных «Statgraphics Centurion» были найдены граничные значения x_{ij} : $X_{12} = 13,40$; $X_{23} = 18,00$; $X_{34} = 25,50$; $X_{45} = 36,25$; $X_{56} = 47,00$; $X_{67} = 73,50$ %.

Кроме того, в данной программе были найдены межквартильные размахи значений СК для объектов каждого класса.

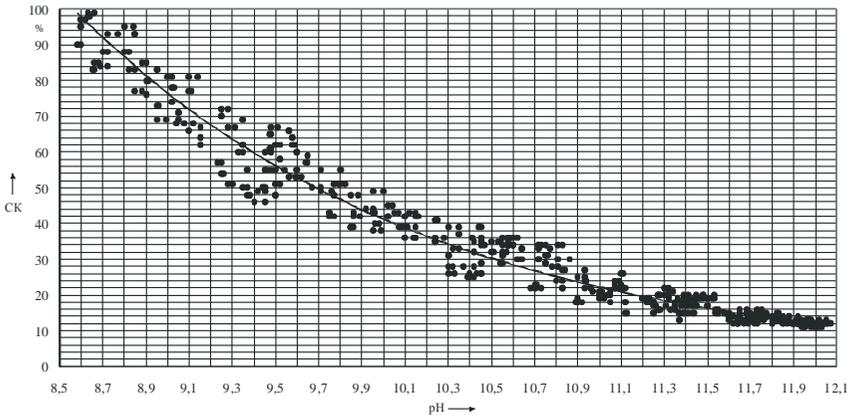


Рисунок 4. – Область значений параметров pH и СК

Полученная, таким образом, взаимосвязь состояния стальной арматуры, состояния защитных свойств бетона при карбонизации для любой точки по сечению бетона представлена в таблице 9.

Таблица 9. – Взаимосвязь состояния стальной арматуры, параметров pH и СК по сечению бетона

Степень коррозии стальной арматуры	Категория потери защитных свойств бетона	Граничные значения показателя pH	Степень карбонизации СК	Граничные значения показателя СК, %
0	0	> 11,80	0	<13
I	I	11,80–10,80	I	13–26
II	II	< 10,80–10,30	II	>26–36
III	III	< 10,30–9,80	III	>36–47
IV	IV	< 9,80–9,00	IV	>47–74
V	V	< 9,00	V	>74

Для оценки применимости полученных результатов был выполнен анализ сроков изменения степеней карбонизации, для условий сельскохозяйственных зданий, общественных и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой, открытой атмосферы, и по его результатам – анализ изменения во времени степени карбонизации бетона для каждого класса бетона по прочности на сжатие, дискретных значений толщин защитного слоя ЖБЭ, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях для областей обычной и ускоренной карбонизации. По его результатам были определены минимальные классы бетона по прочности на сжатие, которые возможно применять при проектировании ЖБЭ и ЖБК для различных условий эксплуатации для обеспечения заданной долговечности (по принятой граничной степени карбонизации) при межремонтном сроке 25 и планируемом сроке эксплуатации 50 лет. Это позволило выполнить сравнение европейских, белорусских рекомендаций и авторских исследований по применению классов бетона по прочности на сжатие для категорий по условиям эксплуатации ХС1–ХС4 с учетом карбонизации бетона. Анализ выполнялся для граничных условий: СК = 18 %, pH = 11,3; СК = 26 %, pH = 10,8, СК = 36 %, pH = 10,3; СК = 74 %, pH = 9,00.

В таблице 10 приведен анализ рекомендуемых классов бетона по прочности на сжатие для граничных условий СК = 36 %; рН = 10,3.

Таблица 10. – Анализ применения рекомендуемых классов бетона по прочности на сжатие для планируемого срока службы 50 лет (СК = 36 %; рН = 10,3)

Категория по условиям эксплуатации	Условия эксплуатации	Толщина защитного слоя, мм	Рекомендуемый класс бетона по прочности на сжатие		
			СТБ EN 206-1-2009	СП 5.03.01-2020	Авторский
XC1	ОПЗ О	10	C ²⁰ / ₂₅	C ²⁰ / ₂₅	C ¹⁶ / ₂₀
		15			C ¹² / ₁₅
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC2	А О	10	C ²⁵ / ₃₀	C ²⁵ / ₃₀	C ²⁵ / ₃₀
		15			C ¹⁶ / ₂₀
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC3	ОПЗ У	10	C ³⁰ / ₃₇	C ³⁰ / ₃₇	C ²⁸ / ₃₅
		15			C ¹⁸ / _{22,5}
		20			C ¹² / ₁₅
		25			C ¹² / ₁₅
XC4	А У	10	C ³⁰ / ₃₇	C ³⁰ / ₃₇	C ³⁰ / ₃₇
		15			C ¹⁸ / _{22,5}
		20			C ¹⁶ / ₂₀
		25			C ¹² / ₁₅
Предлагаемая XC5	СХ У	10	–	–	> C ³⁰ / ₃₇
		15			C ²² / _{27,5}
		20			C ¹⁶ / ₂₀
		25			C ¹² / ₁₅

Примечание – ОПЗ; А; СХ – условия, соответственно, общественных зданий и промышленных – с неагрессивной эксплуатационной средой; открытой атмосферы; сельскохозяйственных зданий; О; У – области, соответственно, обычной и ускоренной карбонизации.

Результаты анализа показывают, что при применении граничных условий: СК = 36 %, рН = 10,3 (по ФФТ) и $l = 15$ мм (усредненной толщине защитного слоя бетона, принятой по результатам обследований) рекомендуемые европейскими и белорусскими нормами классы по прочности бетона на сжатие для всех эксплуатационных условий, кроме сельскохозяйственных зданий, превышают, полученные автором. Однако, необходимо отметить, что рекомендуемый класс бетона по прочности на сжатие в значительной степени зависит от толщины защитного слоя бетона, что не учитывается в существующих нормах.

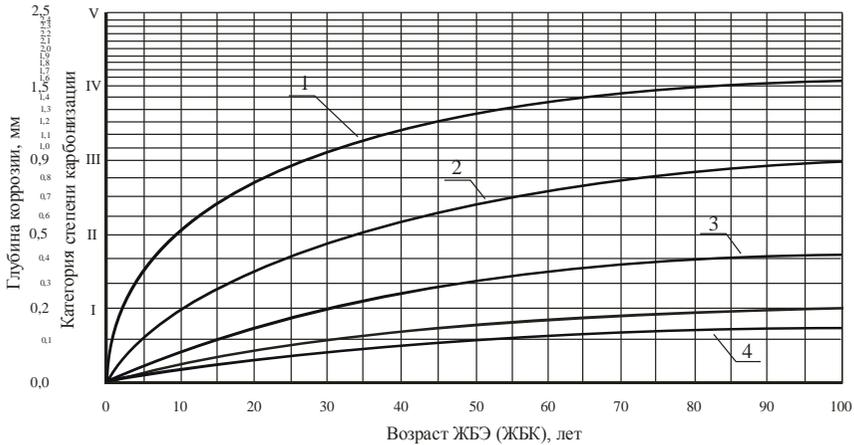
При применении остальных граничных условий рекомендуемые европейскими и белорусскими нормами классы по прочности бетона на сжатие для всех эксплуатационных условий, в основном, ниже полученных автором.

С учетом того, что обследование большого числа зданий сельскохозяйственных комплексов показало на значительное отличие эксплуатационных условий в них от классов, предлагаемых в СП 5.03.01-2020, для повышения объективности оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатируемых в условиях сельскохозяйствен-

ных зданий предложен класс среды по условиям эксплуатации конструкций ХС5 ($RH \leq 100\%$, концентрация $CO_2 \leq 1\%$).

На основании полученных регрессионных зависимостей l -СК и выявленной зависимости коррозионного состояния стальной арматуры от показателя СК в зоне ее расположения, построены (в графическом выражении) регрессионные зависимости изменения во времени коррозионного повреждения стальной арматуры для толщин защитного слоя бетона 10, 15, 20 и 25 мм классов бетона по прочности на сжатие $C^{12/15}$ – $C^{30/37}$ и различных условий эксплуатации.

На рисунке 5 приведены, в графическом выражении, регрессионные зависимости глубины коррозионного повреждения стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона класса по прочности на сжатие $C^{16/20}$ для условий открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации.



Толщина защитного слоя: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 25 мм

Рисунок 5. – Зависимости глубины коррозионных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона класса по прочности $C^{16/20}$ для условий открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации

Полученный характер зависимостей и физический смысл задачи оценки глубины повреждения стальной арматуры, позволили предложить в общем виде регрессионную зависимость скорости повреждения стальной арматуры для фиксированных значений толщины защитного слоя бетона и экспоненциального характера развития коррозии стальной арматуры:

$$h(t) = \alpha_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha_1 t)), \quad (22)$$

где h – глубина коррозии стальной арматуры, мм; t – время эксплуатации, годы; α_0 и α_1 – коэффициенты, определяющие соответственно: α_0 – максимальную скорость коррозии при $t = \infty$; α_1 – скорость развития процесса коррозии.

При получении регрессионной зависимости принимали граничное значение времени эксплуатации – 100 лет.

Коэффициенты α_0 и α_1 определялись автоматизировано методом наименьших квадратов в разделе «Nonlinear regression» компьютерного пакета статистического

анализа данных «Statgraphics Centurion». Решение соответствующей системы нелинейных уравнений выполнялось методом Марквардта.

Для получения зависимости развития коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона необходимо было получить зависимость параметров a_0 и a_1 (по 4 толщинам защитного слоя) для различных толщин защитного слоя (s).

Методами регрессионного анализа по диаграммам рассеяния $a_0(s)$ и $a_1(s)$ было установлено, что эффективным образом данные зависимости описываются аппроксимирующими уравнениями гипербол:

$$a_0(s) = b_0 + b_1 / s, \quad (25)$$

$$a_1(s) = c_0 + c_1 / s, \quad (26)$$

где b_0, b_1, c_0, c_1 – коэффициенты; s – толщина защитного слоя бетона, мм.

Таким образом, глубина коррозии стальной арматуры для любой толщины защитного слоя:

$$h(t, s) = \left(b_0 + \frac{b_1}{s} \right) \left(1 - \exp \left(- \left(c_0 + \frac{c_1}{s} \right) t \right) \right). \quad (27)$$

Параметры гипербол определялись автоматически в разделе «Simple regretssion» пакета «Statgraphics Centurion» методом наименьших квадратов.

Полученные значения коэффициентов b_0, b_1, c_0, c_1 для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$, условий открытой атмосферы, приведены в таблице 11.

Таблица 11. – Значения показателей b_0, b_1, c_0 и c_1

Класс бетона по прочности на сжатие	Коэффициент			
	b_0	b_1	c_0	c_1
$C^{12}/_{15}$	-0,754420	32,3350	0,002997	0,332003
$C^{16}/_{20}$	-0,622000	26,4950	0,000310	0,305000
$C^{18}/_{22,5}$	-0,522100	22,6725	-0,001990	0,279000
$C^{20}/_{25}$	-0,439000	19,8800	-0,003500	0,258000
$C^{22}/_{27,5}$	-0,391000	17,0900	-0,004800	0,241000
$C^{25}/_{30}$	-0,319000	14,9950	-0,005200	0,232000
$C^{28}/_{35}$	-0,278000	13,0010	-0,005350	0,229900
$C^{30}/_{37}$	-0,251132	11,3354	-0,005288	0,229624

Приняв, что потеря 25 % площади поперечного сечения стальной арматуры является ее критическим повреждением, и коррозия развивается по всей поверхности стержня построены регрессионные зависимости времени критического повреждения стальной арматуры диаметров $\varnothing 6 \div 25$ мм от толщины защитного слоя для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$ в различных эксплуатационных условиях.

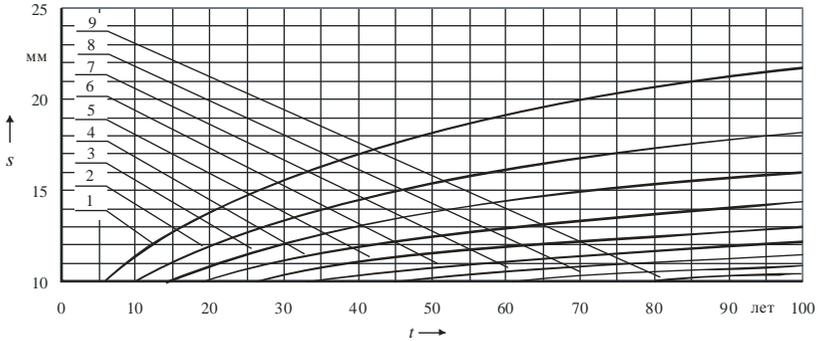
На рисунке 6 представлены регрессионные зависимости времени критического повреждения стальной арматуры для бетона класса по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$ условий открытой атмосферы.

Скорость коррозии стальной арматуры в карбонизированном бетоне:

$$v(t, s) = \left(b_0 + \frac{b_1}{s} \right) \cdot \left(c_0 + \frac{c_1}{s} \right) \cdot \exp \left(- \left(c_0 + \frac{c_1}{s} \right) t \right). \quad (28)$$

Анализ результатов расчетов по выражению (28) для любых классов бетона по прочности на сжатие показывает, что скорость коррозии стальной арматуры уменьшается по сечению бетона с поверхности вглубь по сложной зависимости, причем с уменьшением толщины защитного слоя бетона (менее 20 мм) она значительно выше, предлагаемой сегодня европейскими исследователями и равной в карбонизированном бетоне 0,005 мм/год.

Результаты исследования скорости коррозии бетона и стальной арматуры позволили оценить время образования трещин граничной ширины раскрытия для ЖБЭ, выполненных из бетонов различных классов по прочности на сжатие, для разных эксплуатационных условий.



Диаметры стальной арматуры (Ø): 1 – 6; 2 – 8; 3 – 10; 4 – 12; 5 – 14; 6 – 16; 7 – 18; 8 – 20; 9 – 22 мм

Рисунок 6. – Регрессионные зависимости времени наступления критических коррозионных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона класса по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$ для условий открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации

Поскольку оценка срока службы изгибаемых железобетонных элементов выполняется по второй группе предельных состояний, для случая образования трещин шириной раскрытия до 1 мм:

$$a_{cr} = 0,05 + 0,0125(X_{corr} - X_{corr,0}), \quad (29)$$

где a_{cr} – ширина раскрытия трещины, мм; X_{corr} – глубина коррозионного повреждения стальной арматуры, мм;

$$X_{corr} = V_{corr} \alpha_{pit} t, \quad (30)$$

где V_{corr} – скорость коррозии стальной арматуры, мм/год; α_{pit} – питтинговый фактор, учитывающий характер коррозии; при поверхностной коррозии вследствие карбонизации $\alpha_{pit} = 2$; t – время, лет.

$$V_{corr} = V_{corr,ar} \frac{N_w}{365}, \quad (31)$$

где $V_{corr,ar}$ – средняя скорость коррозии стальной арматуры, мм/год, определяемая условиями эксплуатации, для открытого воздуха $V_{corr,ar} = 0,005$ мм/год; N_w – количество дней в году с осадками более 2,5 мм.

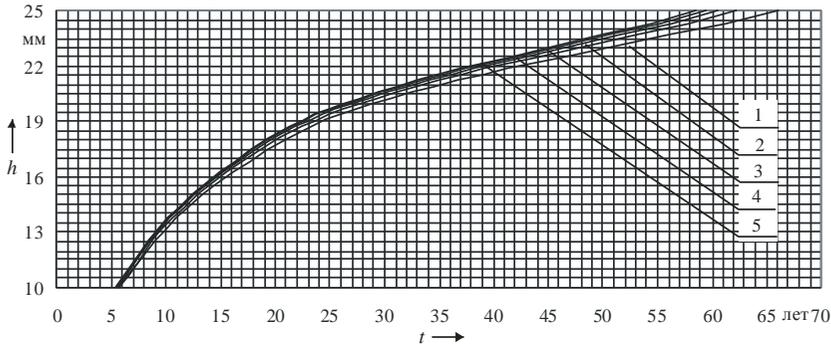
$X_{corr,0}$ – глубина коррозионного повреждения стальной арматуры, соответствующая началу образования трещин, мм; определяемая эмпирическим выражением:

$$X_{corr,0} = 83 + 7,4 \cdot \frac{d_{cover}}{D} - 22,6 \cdot R_{b,sh}, \quad (32)$$

где d_{cover} – толщина защитного слоя бетона, мм; D – диаметр арматуры, мм; $R_{b,sh}$ – прочность бетона на скалывание при изгибе, МПа.

Приняв граничное значение ширины раскрытия трещины $a_{cr} = 1,0$ мм, что соответствует критической ширине раскрытия трещины для изгибаемых элементов, на основании выражений (29–32) получены регрессионные зависимости времени образования трещин от толщины защитного слоя бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$, эксплуатирующихся в разных атмосферных средах.

На рисунке 7 представлены регрессионные зависимости времени образования трещины шириной раскрытия 1,0 мм для бетона класса по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$ условий открытой атмосферы.



Диаметры стальной арматуры (Ø): 1 – 8; 2 – 12; 3 – 16; 4 – 20; 5 – 25 мм

Рисунок 7. – Регрессионные зависимости скорости образования трещин шириной раскрытия 1,0 мм от толщины защитного слоя бетона класса по прочности на сжатие $C^{16}/_{20}$ для условий открытой атмосферы, области ускоренной карбонизации

Зависимости для трещин шириной раскрытия до 1,0 мм, бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{30}/_{37}$, диаметров стальной арматуры 6–25 мм и различных степеней агрессивности эксплуатационных условий носят аналогичный характер. Они показывают, что скорость образования трещин подчиняется сложной экспоненциальной зависимости, она значительна в поверхностных слоях и уменьшается по сечению вглубь бетона.

Результаты обследования различных типов ЖБЭ с оценкой состояния защитных свойств бетона и стальной арматуры от значений физико-химических показателей цементно-песчаной фракции бетона защитного слоя, позволили назначить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК (таблица 12) в зависимости от показателя бетона СК (рН). Критерии разработаны для элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях. При снижении показателя рН бетона в зоне стальной арматуры ниже $pH = 11,8$ возможно нарушение ее пассивного состояния. Развитие коррозии стальной арматуры и бетона будет зависеть от условий эксплуатации. В сухих условиях скорость коррозии стальной арматуры будет тормозиться большим омическим сопротивлением сухого бетона, с одновременным замедлением карбонизации самого бетона, если относительная влажность воздуха составит менее 60 %.

Таблица 12. – Критерии оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом карбонизации бетона

СК, % (рН)	Коррозионное состояние бетона и стальной арматуры. Техническое состояние железобетонного элемента (конструкции) (СН 1.04.01-2020)
<13 (>11,8)	<p>Структурные свойства бетона находятся в уровне свежеприготовленного. Происходит плавное снижение показателя рН, свидетельствующее о последующей нейтрализации бетона и падении его защитных свойств по отношению к стальной арматуре. Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к стальной арматуре, стальная арматура находится в пассивном состоянии.</p> <p>0 степень карбонизации бетона, потери бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – хорошее</p>
13–26 (11,80 – 10,80)	<p>Начало деградации бетона. Происходит снижение показателя рН ниже граничного значения, свидетельствующее о потере бетоном защитных свойств по отношению к стальной арматуре.</p> <p>I степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Коррозионное состояние бетона – удовлетворительное.</p> <p>Образование сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,1 мм на отдельных участках при СК = 15...18 %.</p> <p>Образование сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,2 мм на отдельных участках при СК = 18...26 %.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ – удовлетворительное</p>
Св.26–36 (<10,80 – 10,30)	<p>Развитие деградационных процессов в бетоне.</p> <p>II степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>СК = 26...30 %.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,35 мм на многочисленных участках, уменьшение площади поперечного сечения стальной арматуры диаметров Ø 10–22 мм на, соответственно, 14–6 %.</p> <p>Образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры диаметров ≥ 16 мм, образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры с недостаточной толщиной защитного слоя бетона.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – не вполне удовлетворительное.</p> <p>СК = 30...36 %.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,55 мм на многочисленных участках, уменьшение площади поперечного сечения арматуры диаметров Ø 10–22 мм на, соответственно, 21–10 %.</p> <p>Раскрытие волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) – не вполне удовлетворительное</p>

Продолжение таблицы 12.

СК, % (рН)	Коррозионное состояние бетона и стальной арматуры. Техническое состояние железобетонного элемента (конструкции) (СН 1.04.01-2020)
Св.36–47 (<10,30 – 9,80)	<p>Деградация бетона средней степени интенсивности.</p> <p>III степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>СК = 36...40 %.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 0,8 мм на многочисленных участках, уменьшение площади поперечного сечения стальной арматуры диаметров Ø 10–22 мм на, соответственно, 30–14 %; уменьшение (критическое) площади поперечного сечения на 30 % арматуры диаметром Ø 10 мм.</p> <p>Интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры.</p> <p>Отслаивание защитного слоя на отдельных участках в зоне расположения стальной арматуры диаметров ≤ 12 мм.</p> <p>Разрушение защитного слоя бетона на отдельных участках в местах недостаточной его толщины, оголение и коррозия стальной арматуры средней степени интенсивности.</p> <p>Коррозионное состояние стальной арматуры – диаметров Ø ≤ 10 мм – неудовлетворительное, диаметров Ø 12 – 22 мм – не вполне удовлетворительное.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК), с рабочей стальной арматурой диаметров Ø ≤ 10 мм – неудовлетворительное, с рабочей стальной арматурой Ø 12 – 22 мм – не вполне удовлетворительное.</p> <p>СК = 40...47 %.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 1,15 мм на многочисленных участках, уменьшение площади поперечного сечения стальной арматуры диаметрами Ø 10–22 мм на, соответственно, 41–20 %, уменьшение (критическое) площадей поперечного сечения на 41–31 % стальной арматуры диаметров, соответственно, Ø 10–14 мм.</p> <p>Интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры, отслаивание защитного слоя на многочисленных участках.</p> <p>Разрушение защитного слоя бетона на отдельных участках в местах недостаточной его толщины, оголение и коррозия стальной арматуры средней степени интенсивности.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК), с рабочей стальной арматурой диаметров Ø ≤ 14 мм – неудовлетворительное, с рабочей стальной арматурой Ø 16–22 мм – не вполне удовлетворительное.</p>

Продолжение таблицы 12.

СК, % (рН)	Коррозионное состояние бетона и стальной арматуры. Техническое состояние железобетонного элемента (конструкции) (СН 1.04.01-2020)
Св.47–74 (<9,80 – 9,00)	<p>Деградация бетона высокой степени интенсивности.</p> <p>IV степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>СК = 47...57 %.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 1,60 мм на многочисленных участках, уменьшение (критическое) площадей поперечного сечения стальной арматуры диаметров Ø 10–22 мм, соответственно, на 54–27 %.</p> <p>Интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры, отслаивание защитного слоя на многочисленных участках и его частичное разрушение с оголением на отдельных участках стальной арматуры и ее коррозией высокой степени интенсивности.</p> <p>Полное разрушение на отдельных участках стальной арматуры диаметрами до Ø 10 мм.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) с рабочей стальной арматурой диаметра Ø 10 мм – неудовлетворительное (предаварийное); арматурой диаметров Ø 12–20 – неудовлетворительное, с рабочей стальной арматурой Ø 22 мм – не вполне удовлетворительное.</p> <p>СК = 57...74 %.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной до 2,30 мм на многочисленных участках, уменьшение (критическое) площадей поперечного сечения на 71–38 % стальной арматуры диаметров, соответственно, Ø 10–22 мм.</p> <p>Интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры, отслаивание и разрушение защитного слоя бетона на многочисленных участках.</p> <p>Оголение и коррозия стальной арматуры высокой степени интенсивности на многочисленных участках.</p> <p>Полное разрушение на отдельных участках стальной арматуры диаметрами до Ø 12 мм.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) с рабочей стальной арматурой диаметров Ø 10–14 мм – неудовлетворительное (предаварийное); арматурой диаметров Ø 16–22 – неудовлетворительное.</p>

Окончание таблицы 12.

СК, % (pH)	Коррозионное состояние бетона и стальной арматуры. Техническое состояние железобетонного элемента (конструкции) (СН 1.04.01-2020)
Св. 74 (<9,00)	<p>Полная деградация бетона. Потеря сцепления цементного камня с заполнителем.</p> <p>V степень карбонизации бетона, потери им защитных свойств по отношению к стальной арматуре и коррозии стальной арматуры.</p> <p>Возникновение сплошной коррозии стальной арматуры глубиной более 2,30 мм, уменьшение (критическое) площади поперечного сечения на 34 % стальной арматуры диаметром Ø 25 мм.</p> <p>Интенсивное раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной стальной арматуры, массовое отслаивание защитного слоя бетона.</p> <p>Полное разрушение защитного слоя бетона на многочисленных участках, оголение и коррозия высокой степени интенсивности стальной арматуры. Полное разрушение стальной арматуры диаметрами до Ø 12 мм на многочисленных участках.</p> <p>Техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) с рабочей стальной арматурой диаметров Ø 10–16 мм – предаварийное; арматурой диаметров Ø 18–22 – неудовлетворительное.</p>

В зависимости от выявленных дефектов и повреждений в ЖБЭ и ЖБК необходимо проведение комплекса работ по восстановлению их целостности и несущей способности. Разработанные «Критерии оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона» позволили в зависимости от полученных значений степени карбонизации бетона защитного слоя в зоне расположения стальной арматуры и определенного технического состояния ЖБЭ (ЖБК) предложить ориентировочный состав работ по восстановлению ЖБЭ (ЖБК) в зависимости от результатов обследования (Таблица 13).

Таблица 13. – Мероприятия по восстановлению ЖБЭ (ЖБК)

Категория степени карбонизации бетона	Мероприятия по восстановлению ЖБЭ (ЖБК)
0	Специальных мероприятий по защите бетона, стальной арматуры, восстановлению либо усилению ЖБЭ (ЖБК) не требуется
I	<p>Восстановление защитных, отделочных и облицовочных покрытий бетона.</p> <p>Специальных мероприятий по защите бетона, стальной арматуры, восстановлению либо усилению ЖБЭ (ЖБК) не требуется</p>
II	Гидроизоляция бетона составами проникающего действия для ослабления воздействия агрессивности среды и снижения интенсивности коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре

Окончание таблицы 13.

Категория степени карбонизации бетона	Мероприятия по восстановлению ЖБЭ (ЖБК)
III	<p>Ревизия защитного слоя бетона с удалением поврежденных и отслоившихся фрагментов.</p> <p>Расшивка и заделка трещин ремонтными составами.</p> <p>Зачистка оголенной стальной арматуры механическими способами (без применения преобразователей ржавчины) и покрытие ее антикоррозионным составом.</p> <p>Восстановление защитного слоя бетона ремонтными составами.</p> <p>Обработка поверхности бетона составами проникающего действия для ослабления воздействия агрессивности среды и снижения интенсивности коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре</p> <p>Усиление элемента (необходимость усиления и степень усиления элемента определяются расчетом)</p>
IV	<p>Ревизия защитного слоя бетона с удалением поврежденных и отслоившихся фрагментов.</p> <p>Расшивка и заделка трещин ремонтными составами.</p> <p>Зачистка оголенной стальной арматуры механическими способами (без применения преобразователей ржавчины) и покрытие ее антикоррозионным составом.</p> <p>Восстановление защитного слоя бетона ремонтными составами.</p> <p>Обработка поверхности бетона составами проникающего действия для ослабления воздействия агрессивности среды и снижения интенсивности коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре</p> <p>Усиление элемента (необходимость усиления и степень усиления элемента определяются расчетом)</p>
V	<p>Прекращение эксплуатации помещения (его участка) в зоне расположения ЖБЭ (ЖБК), находящихся в предаварийном состоянии.</p> <p>Временное раскрепление ЖБЭ (ЖБК).</p> <p>Детальное обследование ЖБЭ (ЖБК).</p> <p>Выполнение в полном объеме рекомендаций по результатам детального обследования с учетом физико-химического анализа бетона</p>

На основании исследования изменения во времени по сечению ЖБЭ и ЖБК физико-химических показателей бетона и их влияния на коррозионное состояние стальной арматуры, в зависимости от условий эксплуатации элементов и конструкций, предложенных расчетно-экспериментальных зависимостей параметров карбонизации, назначенных «Критериев оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона», разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях, с учетом карбонизации бетона.

Комплексный метод позволяет:

– оценивать и прогнозировать изменение во времени по сечению ЖБЭ и ЖБК карбонизацию бетона (карбонатную составляющую);

- оценивать и прогнозировать изменение во времени по сечению ЖБЭ и ЖБК степень карбонизации бетона;
 - оценивать и прогнозировать изменение во времени по сечению бетона ЖБЭ и ЖБК состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре;
 - на основании полученных результатов по «Критериям оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона» оценивать, а с использованием предложенных расчетно-экспериментальных зависимостей карбонизации и прогнозировать техническое состояние ЖБЭ и ЖБК;
 - оценивать количество использованного цемента при приготовлении бетона.
- Он представляет собой набор методик, и его укрупненная структурная схема приведена на рисунке 8.



Рисунок 8. – Структурная схема комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях, с учетом карбонизации бетона

Предлагаемый метод, по сути, является дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах.

На основе полученных расчетно-экспериментальных моделей карбонизации и назначенных критериев оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК) разработан расчетно-графический метод оценки и прогнозирования состояния бетона и технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона, позволяющий оперативно рассчитывать параметры и получать информацию в числовом, текстовом и графическом виде.

Весь расчетный комплекс расчленен на блоки, имеющие разнообразные, взаимно увязанные функции:

- блок расчета предельной величины карбонизации (показателя ПВК) по составу бетона;
- блок расчета степени гидратации цемента (α);
- блок расчета степени карбонизации бетона (показателя СК);

- блок расчета прогнозируемого значения карбонатной составляющей (показателя $KC_{\text{прог}}$) на стадии проектирования ЖБЭ (ЖБК);
- блок расчета прогнозируемого значения $KC_{\text{прог}}$ для эксплуатируемого ЖБЭ (ЖБК);
- блок расчета прогнозируемого значения $СК_{\text{прог}}$ на стадии проектирования ЖБЭ (ЖБК);
- блок расчета прогнозируемого значения $СК_{\text{прог}}$ для реально эксплуатируемого ЖБЭ (ЖБК);
- блок критериев оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК), с учетом карбонизации бетона.

Для автоматизации расчетов, реализации предложенных оценочных и прогнозных моделей разработан соответствующий программный продукт – вычислительный комплекс «ОКАВА». Его укрупненная структурная схема представлена на рисунке 9.



Рисунок 9. – Структурная схема вычислительного комплекса «ОКАВА»

Пример окна программы «ОКАВА» приведен на рисунке 10.

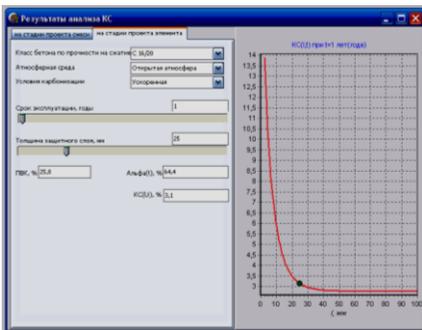


Рисунок 10. – Пример окна программы «ОКАВА»

Для оценки применимости методики прогнозирования коррозионных свойств бетона выполнено исследование изменения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре при использовании вторичной защиты составом проникающего действия «ГС Пенетрат» и добавки в бетон «Стахемент-2010». Полученные количественные показатели карбонизации по сечению бетона (их значительное снижение по сравнению с прогнозируемыми для необработанного и бездобавочного бетонов) свидетельствуют о существенном росте коррозионной стойкости бетона, что существенно повышает его защитные

свойства по отношению к стальной арматуре и, как следствие, долговечность ЖБЭ и ЖБК.

Для качественного прогнозирования карбонизации необходима разработка расчетно-экспериментальной модели карбонизации, в которую должны входить основные параметры, такие как условия твердения, расход цемента, В/Ц, плотность бетона, условия эксплуатации (температура, влажность, содержание CO_2) и др.

Полученные автором системы усредненных расчетно-экспериментальных зависимостей позволяют прогнозировать изменение карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}-C^{30}/_{37}$, в зависимости от сроков и условий эксплуатации. Поскольку они выведены не эмпирически, а на основании исследования изменения во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) реально эксплуатируемых ЖБЭ, в них уже косвенно (а, отдельные – и прямо) учтены такие факторы как: расход цемента, температура воздуха, относительная влажность, содержание углекислого газа, условия твердения и др, что позволяет использовать их как базу при разработке расчетно-экспериментальной модели карбонизации бетона для любых составов и условий твердения и эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана новая концепция, базирующаяся на принципиально новом подходе к решению проблемы по определению степени коррозионного (карбонизационного) поражения бетона эксплуатируемых бетонных и железобетонных строительных конструкций, обеспечивающей высокую степень достоверности оценки изменений (снижения) прочностных и защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, оценки ее коррозионного состояния, а в совокупности – обеспечивающий оценку и прогноз изменений во времени технического состояния строительных железобетонных конструкций при последующей эксплуатации с учетом развития процесса карбонизации бетона [1–103].

2. Принципиальные изменения в методах оценки карбонизационного поражения цементного бетона при воздействии углекислотной составляющей эксплуатационной воздушной среды включают:

– отличающийся от известных аналогов «механизм» карбонизации цементного бетона, сущность которого в том, что взаимодействие углекислого газа воздуха с гидроксидом кальция в жидкости, находящейся в порах цементного камня в бетоне, развивается в тонком слое контакта поверхности жидкости и газа с последующим отложением продукта реакции – карбоната кальция, на стенках пор, что предполагает разную по величине степень карбонизации бетона на разном удалении от поверхности конструкции [1, 4, 7, 14, 24, 102, 103];

– измененный подход и предложенные математические зависимости для оценки карбонатной составляющей процесса карбонизации (КС) как переменной, изменяющейся во времени и в зависимости от параметров эксплуатационной среды (содержания CO_2) функции, определяемой не по отношению к массе цементного камня, как это принято в известных методиках, а к массе растворной (цементно-песчаной) составляющей бетона, что упрощает ее определение при отборе проб бетона эксплуатируемых конструкций и повышает достоверность оценки, в сравнении с отбором проб цементного камня из бетона [3, 4, 19, 20, 22, 26, 28, 35, 41, 61, 66, 102, 103];

– предложенный подход и математические зависимости количественной оценки развития процесса карбонизации в виде показателя степени карбонизации (СК), соответствующего проценту гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных минералов, перешедших в карбонаты, с учетом градации этой величины на разном удалении (и соответствующем изменении) по сечениям от внешнего контура конструкции вглубь бетона [3, 4, 19, 20, 22, 26, 28, 35, 41, 61, 66, 102, 103];

– систему расчетно-эмпирических зависимостей, отражающих через показатели «КС» и «СК» развитие во времени процесса карбонизации по произвольным сечениям бетона конструкции для различных по степени агрессивности эксплуатационных сред: неагрессивной, открытой атмосферы, зданий общественного, промышленного и сельскохозяйственного назначения, характеризующихся наибольшей насыщенностью воздуха углекислым газом [3, 4, 19, 23, 26, 28, 35, 41, 61, 66];

– оценочную балльную систему и методику количественной оценки защитных свойств бетона эксплуатируемых в различной по степени агрессивности среды железобетонных конструкций по отношению к стальной арматуре, а также подобную систему оценки коррозионного состояния стальной арматуры, что позволяет рассчитывать скорость и глубину развития процесса коррозии арматуры и время наступления ее критического коррозионного повреждения, а на этом основании – прогнозировать ожидаемую долговечность (срок службы) строительных конструкций [1, 2, 4, 12, 25, 27, 34, 57, 67, 82, 84, 102, 103];

– систему количественных критериев по совокупности выявленных результатов количественной оценки защитных свойств бетона, коррозионного состояния арматуры, данных рН-метрии бетона и разработанных физико-химических показателей растворной составляющей проб исследуемого бетона защитных слоев, позволяющую оценить техническое состояние конструкций, эксплуатируемых в различных по степени агрессивности средах [2, 4, 15, 36, 58, 60, 62, 90, 103].

3. Получена система математических зависимостей, отражающих выявленные (экспериментально и путем натурных обследований эксплуатируемых конструкций) закономерности изменений оценочных факторов коррозионного (карбонатного) поражения бетона: карбонатной составляющей (КС), степени карбонизации (СК), уровня щелочности (рН) с учетом степени агрессивности среды, а также наличие, скорость и глубину развития процесса коррозии стальной арматуры в бетоне, что в совокупности позволяет оценить фактическое техническое состояние железобетонных конструкций, то есть оценить возможность и перспективу их дальнейшей эксплуатации [3, 4].

4. На основании предложенного механизма карбонизации [1, 4, 7, 14, 80], результатов исследования изменения во времени по сечению бетона физико-химических свойств бетона при карбонизации, полученных расчетно-экспериментальных зависимостей изменения во времени по сечению бетона параметров карбонизации, предложенных критериев оценки состояния бетонных и железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона, разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах [2, 4, 16, 55, 67, 69, 103].

Предлагаемый метод позволяет оценивать фактическое и прогнозировать изменения в перспективе их технического состояния и, как следствие, долговечность конструкций с учетом карбонизации бетона при эксплуатации в различных воздушных средах.

5. Предложена методика количественной оценки исходного содержания цемента в бетоне по пробам, отобранным из эксплуатируемых в различных атмосферных средах бетонных и железобетонных элементах и конструкциях [4, 73, 74].

6. Для оперативного расчета параметров оценки и прогнозирования технического состояния обследуемых конструкций и получения информации в числовом, текстовом и графическом виде, разработан расчетно-графический метод (разделенный на блоки, имеющие разнообразные, взаимно увязанные функции) оценки и прогнозирования состояния бетона и технического состояния железобетонных элементов конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом карбонизации бетона [4, 65].

Для автоматизации расчетов, реализации и получения количественных величин предложенных оценочных и прогнозных показателей разработан программный продукт – вычислительный комплекс «ОКАВА» [4, 65].

7. Результаты диссертационного исследования получили практическое применение при разработке нормативной документации, выполнении проектных работ, обследовании объектов общественного, промышленного и сельскохозяйственного назначений, учебном процессе, подтвердившее их актуальность, научную, практическую и экономическую значимость (приложение К).

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационных исследований имеют практическое применение в учебной, проектной, обследовательской деятельности, при разработке нормативной документации.

1. Регрессионные зависимости изменения во времени коррозионных повреждений в бетоне и (или) стальной арматуре для различных типов ЖБЭ, эксплуатирующихся в разных атмосферных средах могут быть использованы для укрупненного прогнозирования поврежденности различных типов ЖБЭ и ЖБК при оценке и прогнозировании их долговечности, как при проектировании, так и общем (детальном) обследовании зданий и других сооружений.

2. Расчетно-экспериментальные зависимости развития карбонизации во времени по сечению бетона, позволяющие для различных классов бетона по прочности на сжатие в зависимости от условий эксплуатационной среды прогнозировать развитие параметров карбонизации и изменение во времени физико-химических свойств бетона, совместно с назначенными «Критериями оценки технического состояния ЖБЭ и ЖБК с учетом карбонизации бетона» рекомендуется применять в учебном процессе для пояснения действия коррозии второго рода и влияния карбонизации на изменение структуры бетона, его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, технического состояния ЖБЭ и ЖБК, при разработке нормативной документации по защите железобетона, эксплуатирующегося в различных воздушных средах.

3. Предлагаемые методики оценки и прогнозирования параметров карбонизации, позволяющие прогнозировать развитие карбонизации, состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, технического состояния ЖБЭ (ЖБК), рекомендуется применять проектными либо производственными организациями, как на стадии проектирования состава бетона (по предполагаемому количеству цемента), так и при проектировании ЖБЭ (ЖБК) для обеспечения их длительной безаварийной эксплуатации различные сроки в разных атмосферных условиях, кроме

того, при разработке нормативной документации по оценке технического состояния ЖБЭ (ЖБК) при обследовании зданий и других сооружений.

4. Физический анализ (определение показателя pH) применяется для оценки, на момент обследования защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре и технического состояния ЖБЭ (ЖБК) в зависимости от времени и условий эксплуатации. Химический анализ универсален, он позволяет, и оценивать, и прогнозировать аналогичные показатели.

Для химического и физического анализов используются образцы бетона (цементно-песчаная фракция), получаемые скалыванием до стальной арматуры, либо порошок, получаемый выбуриванием по сечению бетона, что не приводит к разрушению исследуемых ЖБЭ (ЖБК). Анализ образцов не требует применения специального дорогостоящего оборудования. Полный (физико-химический) анализ одного образца занимает в среднем 90 минут (без учета приготовления образцов).

Физический и (или) химический анализ бетона рекомендуется выполнять: при возобновлении строительства объектов после длительных сроков отсутствия работ; детальном обследовании ЖБЭ, эксплуатирующихся в атмосферных условиях; любом виде обследования при наличии сомнений в состоянии конструкций; анализе причин коррозии стальной арматуры при отсутствии явных признаков агрессивной среды; расследовании причин создания аварийных ситуаций и аварий (обрушений ЖБЭ (ЖБК)). Его применение дает возможность не только значительно повысить объективность оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), но и эффективность выбора мероприятий по их восстановлению.

5. Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, основанный на химическом анализе как бетона защитного слоя в зоне расположения стальной арматуры, так и по сечению бетона, является дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся различные сроки в разных атмосферных условиях. Его применение дает возможность в лабораторных условиях по образцам бетона защитного слоя в зоне расположения стальной арматуры оценивать состояние бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, состояние стальной арматуры, и по ним – техническое состояние ЖБЭ (ЖБК) в целом на момент обследования, в зависимости от условий эксплуатации; выполнять прогнозирование изменения технического состояния ЖБЭ (ЖБК) в зависимости от времени и условий эксплуатации; по образцам бетона, отобранном по сечению ЖБЭ (ЖБК), оценивать на момент обследования состояние бетона, его защитных свойств по отношению к стальной арматуре и состояние стальной арматуры в любом сечении ЖБЭ (ЖБК), эксплуатируемого в атмосферной среде.

Основными достоинствами предлагаемого комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК), эксплуатирующихся в воздушных условиях, являются несложность выполнения анализов, сохранение целостности элементов (конструкций) и приемлемая точность. Его рекомендуется применять специализированными организациями при детальном обследовании зданий и сооружений.

6. Регрессионные зависимости глубины коррозии и времени наступления критической коррозии стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона позволяют учитывать скорость коррозии стальной арматуры и время наступления критических

значений ее коррозионных повреждений в прогнозных моделях долговечности ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях.

7. Номограммы для определения изначального содержания цемента рекомендуется использовать как при проектировании ЖБЭ (ЖБК) для определения состава бетона (количества цемента) под конкретные граничные значения показателя карбонатной составляющей (степени карбонизации) и планируемого возраста эксплуатации, так и (что очень важно и, практически сейчас не используется) при детальном обследовании зданий и сооружений для оценки количества использованного цемента в бетоне при сомнении в его качественных характеристиках, определяемых содержанием цемента.

8. Для возможности определения карбонизации в любом сечении бетона рекомендуется ввести в нормативные документы (разработать документ) экспресс-методы определения карбонатной составляющей и водородного показателя водной вытяжки цементного камня цементно-песчаной фракции бетона.

9. Для более объективной оценки воздействия эксплуатационных сред на ЖБЭ и ЖБК рекомендуется пересмотреть граничные значения параметров эксплуатации для категорий по условиям эксплуатации ХС1–ХС4 и для эксплуатационных условий сельскохозяйственных зданий ввести класс по условиям эксплуатации – ХС5 (концентрация CO_2 – до 1 %, относительная влажность – до 100 %).

10. Полученные результаты рекомендуется использовать при разработке национальных ТНПА для областей изготовления, проектирования и диагностики технического состояния ЖБЭ и ЖБК: в частях подбора состава бетона для заданных его физико-механических характеристик; оценки и прогнозирования параметров карбонизации; проектирования ЖБЭ и ЖБК с заданной долговечностью; разработке мероприятий по защите ЖБЭ и ЖБК от коррозии; оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК.

11. Предлагаемые методики оценки и прогнозирования состояния бетона, его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, технического состояния ЖБЭ (ЖБК) апробированы при обследовании многочисленных ЖБЭ и ЖБК [1, 2, 4, 25, 27, 34, 51, 57], оценке применимости бетонов и эффективности использования добавок в бетоны [37, 40, 44, 87, 88, 92, 97], создании модифицированных материалов и энергоэффективных изделий [30, 43, 59, 63, 85, 106], разработке учебной и нормативной литературы [102–105, 107].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 303 с.
3. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 263 с.
4. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 215 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах

5. Кудрявцев, И. А. Оценка некоторых факторов, влияющих на долговечность подземных коммуникаций из железобетона / И. А. Кудрявцев, А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2002. – № 1 (4). – С. 39–43.
6. Кудрявцев, И. А. Исследование некоторых факторов, влияющих на долговечность подземных коллекторов // И. А. Кудрявцев, А. А. Васильев // Вестник Брестского ГТУ: Строительство и архитектура. – Брест: ГТУ, 2003. – № 1. – С. 105–107.
7. Кудрявцев, И. А. Исследование механизма взаимодействия растворов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в контакте с CO_2 воздуха / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов, А. А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты. – 2003. – Т.8. – № 2. – С. 31–34.
8. Васильев, А. А. Определение прочности бетона длительно эксплуатируемых ЖБК методами рН- и карбометрии / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2004. – №1. – С.21–24.
9. Васильев, А. А. Оценка прочности бетона и ее прогнозирование для бетонных и железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ, 2005. – № 4. – С. 16–22.
10. Васильев, А. А. Оценка состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций различными методами / А. А. Васильев, О. Г. Канарская, С. В. Дзирко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2005. – № 1 (10). – С. 35–37.
11. Бабицкий, В. В. Графо-аналитический метод прогнозирования карбонизации бетона / В. В. Бабицкий, А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2006. – № 1-2 (12-13). – С. 82–86.
12. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций на основе методов рН- и карбометрии / А. А. Васильев, В. П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т. 11. – № 1. – С. 110–116.
13. Васильев, А. А. Графоаналитический метод прогнозирования карбонизации бетона / А. А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т.11. – № 2. – С. 113–119.
14. Васильев, А. А. Исследование кинетики и механизма карбонизации поровой влаги бетона в реальных условиях / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2007. – № 6. – С. 39–44.
15. Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных конструкций эксплуатирующихся длительные сроки в воздушных средах / А. А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты. – 2007. – Т. 12. – № 1. – С. 33–39.

16. Васильев, А. А. Неразрушающий метод обследования железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Прикладные науки. Строительство – Новополоцк, 2008. – № 6. – С. 34–43.

17. Васильев, А. А. Исследование коэффициента диффузии углекислого газа воздуха в карбонизированном бетоне / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2008. – № 2 (17). – С. 73–75.

18. Васильев, А. А. Оценка существующей модели карбонизации бетона / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.

19. Васильев, А. А. Модель карбонизации бетона в атмосферных условиях / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – Новополоцк, 2009. – № 12. – С. 69–82.

20. Васильев, А. А. Прогнозирование развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 6 (27). – С. 34–40.

21. Васильев, А. А. О подходах к оценке физического износа / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 5 (26). – С. 70–76.

22. Исследование скорости развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2009. – № 2 (19). – С. 80–85.

23. Васильев, А. А. Исследование карбонизации по сечению бетона после тепловлажностной обработки / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Строительная наука и техника. – 2010. – № 5. – С. 60–64.

24. Васильев, А. А. О необходимости разработки нормативного документа по обследованию зданий, сооружений и комплексов богослужебного и вспомогательного назначения / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2010. – № 2 (21). – С. 83–87.

25. Васильев, А. А. Совершенствование оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах с учетом их коррозионного износа / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – Новополоцк, 2010. – № 6. – С. 17–23.

26. Васильев, А. А. Уточнение прогнозной модели развития карбонизации бетона конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных условиях / А. А. Васильев, С. В. Дзирко // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – Т 15 (№4) – С. 27–34.

27. Васильев, А. А. Оценка технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / Васильев А.А. // Вестник гражданских инженеров. Серия: строительные конструкции, строительная механика и расчет сооружений. – Санкт-Петербург, 2010. – № 1 (22). – С. 43–50.

28. Модель карбонизации бетона в условиях агрессивности среды сельскохозяйственных зданий / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 2 (23). – С. 77–80.

29. Оценка поврежденности железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды сельскохозяйственных помещений / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 2 (23). – С. 81–83.

30. Васильев, А. А. Новый материал для конструкций стеновых ограждений энергоэффективных зданий / А. А. Васильев, М. В. Лапата, А. В. Герашенко // Строительная наука и техника. – 2011. – № 4. – С. 17–20.

31. Васильев, А. А. Исследование изменения степени гидратации цемента по сечению образцов для различных условий твердения / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 72–75.

32. Васильев, А. А. Исследование характера изменения щелочности поровой жидкости по сечению бетона / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Строительная наука и техника. – 2012. – № 1 (40). – С. 10–13.

33. Модель изменения щелочности поровой жидкости по сечению бетона для агрессивных условий эксплуатации / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2012. – № 2 (25). – С. 67–72.

34. Васильев, А. А. Совершенствование методов оценки технического состояния железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях атмосферной агрессии / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2 (41). – С. 21–28.

35. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона для эксплуатации среды жилых общественных зданий / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Прикладные науки. Строительство. – Новополоцк, 2012. – № 16. – С. 46–54.

36. Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко, Л. В. Пликус // Строительная наука и техника. – 2013. – № 2 (43). – С. 47–53.

37. Васильев, А. А. Оценка эффективности применения вторичной защиты бетона от карбонизации / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2013. – № 2 (27). – С. 94–97.

38. Васильев, А. А. Физический анализ бетона (РН-метрия) – основа оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре / А. А. Васильев, Л. В. Пликус // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2014. – № 1 (28). – С. 73–76.

39. Васильев, А. А. Оценка использования эффективного коэффициента диффузии углекислого газа воздуха для определения карбонизации бетона / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2014. – № 2 (29). – С. 91–93.

40. Васильев, А. А. Оценка изменения защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре для эксплуатационных условий открытой атмосферы при применении вторичной защиты бетона составом «ГС Пенетрат» / А. А. Васильев, Е. В. Беляева, А. Н. Булавко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 180–183.

41. Васильев, А. А. Математическая расчетно-экспериментальная модель начальной карбонизации бетона / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 176–179.

42. Васильев, А. А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 87–88.

43. Васильев, А. А. Расчеты на прочность композиционных элементов ограждающих конструкций энергоэффективных зданий вариационно-разностным методом / А. А. Васильев, О. В. Козунова // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 2 (35). – С. 148–151.

44. Васильев, А. А. Оценка применимости бетонов в железобетонных элементах и конструкциях для различных эксплуатационных условий / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 2 (35). – С. 133–135.

45. Васильев, А. А. Оценка скорости деградации железобетонных водопропускных труб / А. А. Васильев, С. В. Дашкевич // WORLD SCIENS. – 2018. – № 7 (35). – Vol. 2. – С. 15–22.

46. Васильев, А. А. Исследование изменения степени гидратации цемента по сечению образцов цементного камня / А. А. Васильев, Э. В. Швайликова, А. Н. Булавко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 1 (36). – С. 118–120.

47. Васильев, А. А. Модель прогнозирования долговечности железобетонных пролетных строений мостов / А. А. Васильев, Р. Ю. Доломанюк, С. В. Дашкевич // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2018. – № 1 (36). – С. 121–123.

48. Васильев, А. А. Система номограмм для оценки изначального содержания цемента в бетоне / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 1 (38). – С. 42–44.

49. Васильев, А. А. Прогнозирование коррозионной поврежденности железобетонных элементов для различных условий эксплуатации / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 2 (39). – С. 37–39.

50. Васильев, А. А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода. / А. А. Васильев // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – Брест, 2020. – № 1. – С. 77–80.

51. Васильев, А. А. Исследование различными методами распределения физико-химических показателей бетона по сечению железобетонных элементов / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 51–53.

Статьи в сборниках трудов

52. Кудрявцев, И. А. О прогнозе срока службы коллекторов сточных вод / И. А. Кудрявцев, А. А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : Междунар. сб. науч. тр.; матер. X науч.-метод. межвуз. семинара. – Гомель: БелГУТ, 2005. – С. 11–15.

53. Васильев, А. А. О необходимости проведения технического аудита объектов незавершенного строительства / А. А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : материалы X науч.-метод. межвуз. семинара – Гомель: БелГУТ, 2005. – С. 46–49.

54. Васильев А. А. О причинах обрушения плит покрытия формовочного цеха завода ЖБИ // Проблемы строительства и эксплуатации зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки : сб. статей Междунар. науч.-метод. конф. – Пенза, 2006. – С. 139–142.

55. Васильев, А. А. Дополнительный способ оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушной среде / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. тр. В 2 ч. Ч. 1 Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2007. – С. 113–129.

56. Васильев А. А. Некоторые аспекты эксплуатации и мониторинга комплексных плит покрытия совмещенных крыш крупнопанельных жилых домов серии 1-464А / А. А. Васильев, С. В. Дзирко // Современное градостроительство : сб. статей Междунар. науч.-метод. конф. – Пенза, 2007. – С. 41–42.

57. Васильев, А. А. Новый неразрушающий метод обследования железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / А. А. Васильев // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : сб. науч. тр. – Ровно: Издате-

льство Национального университета водного хозяйства та природокористування; 2008. – Вып. 17. – С. 417–432.

58. Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных конструкций по физико-химическим характеристикам бетона защитного слоя / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Международ. симпозиума. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 98–105.

59. Васильев, А. А. Исследование напряженно-деформированного состояния трехслойного стенового блока с учетом физической нелинейности материала / А. А. Васильев, О. В. Козунова, Е. А. Сига́й // Ресурсоекономні матеріали, конструкції будівлі та споруди : Междунар. сб. науч. статей. – Ровно, Украина, 2012. – Вып. 23 – С. 119–126.

60. Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных элементов по физико-химическим характеристикам бетона / А. А. Васильев // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. статей : В 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. Нац. техн. ун-т – Минск : БНТУ, 2012. – Ч. 2. – С. 39–47.

61. Васильев, А. А. Модель карбонизации бетона в условиях открытой атмосферы / А. А. Васильев, Е. О. Адарченко // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVIII Международ. науч.-метод. семинара : В 2 т., Новополоцк, 28–29 ноября 2012 г. : под общ. ред. Д. Н. Лазовского, А. А. Бакатовича. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – Т. II. – С. 128–133.

62. Васильев, А. А. Оценка поврежденности железобетонных элементов с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев // Будівельні конструкції : Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. пр. (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – Вып. 78 : в 2 кн. : Кн. 2. – Київ: ДП НДІБК, 2013. – С. 338–347.

63. Васильев, А. А. Нелинейный расчет трехслойного стенового блока на клеевых связях / А. А. Васильев; Е. А. Сига́й, О. В. Козунова // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. пр. (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – Вып. 78 : В 2 кн.: Кн. 1. – Київ, ДП НДІБК, 2013. – С. 444–451.

64. Васильев, А. А. О необходимости разработки национального нормативного документа по оценке карбонизации бетона / А. А. Васильев // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. статей. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 40–54.

65. Васильев, А. А. Программный комплекс оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов / А. А. Васильев // Эффективные строительные конструкции: теория и практика : сб. статей XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, Пензенский гос. университет арх. и стр-ва, 2014. – С. 30–33.

66. Васильев, А. А. Регрессионная модель карбонизации бетона неагрессивной эксплуатационной среды / А. А. Васильев // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. / Міністерство освіти і науки України. Академія будівництва України. Національний університет водного господарства та природокористування Північно-Західне територіальне відділення АБУ. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2014. – Вып. 29. – С. 15–22.

67. Васильев, А. А. Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатируемых в воздушных средах / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск: Издатель А. Н. Вараксин, 2014. – Вып. 6. – С. 59–67.

68. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование поврежденности железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях открытой атмосферы / А. А. Васильев, Е. И. Здитовец, Е. В. Евтухова // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. – Гомель: БелГУТ, 2014. – Ч. 1 – С. 42–46.

69. Васильев, А. А. Совершенствование оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 148–167.

70. Васильев, А. А. Оценка развития коррозии стальной арматуры в зависимости от толщины защитного слоя бетонов различных классов по прочности на сжатие / А. А. Васильев // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 121–134.

71. Васильев, А. А. Оценка реакционной емкости бетона сразу после его изготовления с учетом степени карбонизации / А. А. Васильев, А. А. Заяц // European Research : сб. статей XXI Междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2019. – Ч. 1 – С. 191–194.

72. Васильев, А. А. Оценка изменения во времени реакционной емкости бетона с учетом степени карбонизации / А. А. Васильев, А. А. Заяц // European Research : сб. статей XXI Междунар. науч.-практ. конф. В 3 ч. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2019. – Ч. 1 – С. 25–28.

73. Васильев, А. А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона / А. А. Васильев // сб. статей XXII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 29–34.

74. Васильев, А. А. Экспресс-метод определения водородного показателя водной вытяжки цементного камня (показателя pH) / А. А. Васильев // European Scientific Conference : сб. статей XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 52–57.

75. Васильев, А. А. К вопросу оценки влияния морозной деструкции на карбонизацию бетона / А. А. Васильев, А. А. Такунов, А. С. Чугунова // European Scientific Conference : сб. статей XV Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2019. – С. 59–62.

76. Васильев, А. А. Оценка граничных значений характеристик надежности для различных категорий технического состояния железобетонных конструкций / А. А. Васильев, В. М. Швед, В. О. Бондаренко // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS : сб. статей XL Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2020. – С. 28–30.

Материалы конференций

77. Кудрявцев, И. А. Исследование влияния эксплуатационных факторов на долговечность подземных коллекторов / И. А. Кудрявцев, А. А. Васильев, С. В. Дзирко // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса: тезисы докладов Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2001. – С. 242–243.

78. Кудрявцев, И. А. Исследование факторов, влияющих на долговечность бетонных и железобетонных коллекторов / И. А. Кудрявцев, А. А. Васильев // Актуальные проблемы расчета зданий, конструкций и их частей: теория и практика: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – С. 97–100.

79. Васильев, А. А. О влиянии карбонизации на долговечность водопропускных труб / А. А. Васильев // Проблемы и перспективы транспортных систем и строительного комплекса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2003. – С. 235–237.

80. Васильев, А. А. Оценка кинетики адсорбции десорбции влаги и ее паров на растворы и бетоны методом измерения сопротивления / А. А. Васильев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2005. – С. 241–243.

81. Васильев, А. А. Современный подход к оценке карбонизации бетона железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2008. – С. 222–223.

82. Васильев, А. А. Оценка технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах, с учетом карбонизационных процессов / А. А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : материалы XVI Междунар. науч.-метод. семинара. – Брест: БрГТУ, 2009. – Ч.3. – С. 12–17.

83. Васильев, А. А. Совершенствование эксплуатации зданий – основа повышения их долговечности / А. А. Васильев, Е. И. Здитовец, Е. В. Евтухова // Проблемы безопасности на транспорте : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2010. – С. 302–304.

84. Васильев, А. А. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния несущих элементов фермы вследствие их коррозии / А. А. Васильев, О. В. Козунова, Р. В. Кумашов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп.; под общ. ред. В.И. Сенько. – Гомель : БелГУТ, 2012. – С. 312–314.

85. Васильев, А. А. Коррозионностойкий модифицированный бетон / А. А. Васильев, Е. О. Блоцкая, Р. И. Зументс // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2013. – С.333–334.

86. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование поврежденности железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях открытой атмосферы / А. А. Васильев, Е. И. Здитовец, Е. В. Евтухова // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Ч. I / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2014. – С.42–46.

87. Васильев, А. А. Особенности использования бетона в ЖБИ и ЖБК с учетом процессов карбонизации / А. А. Васильев // Особенности проектирования и эксплуатации бетонных конструкций. Современные технологии производства бетона : материалы практ. семинара – Минск, Отраслевые форумы, 2015. – С. 2–9.

88. Васильев, А. А. Исследование эффективности применения комплексных добавок для восстановления бетона искусственных сооружений / А. А. Васильев, М. Г. Осмоловская, К. И. Боровский // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2015. – С. 32–36.

89. Васильев, А. А. Предотвращение аварий зданий и сооружений – государственная задача / А. А. Васильев // Реконструкция зданий и сооружений : стандарты, тенденции, инновационные материалы : материалы III практ. конф. – Минск, Отраслевые форумы, 2015. – С. 3–7.

90. Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных элементов и конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XX Междунар. науч.-практ. семинара. – Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2016. – С. 225–229.

91. Васильев, А. А. Критерии оценки степени карбонизации бетона / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – С. 55–59.

92. Васильев, А. А. Анализ результатов различных авторов по применению бетона в железобетонных элементах / А. А. Васильев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2017. – С. 308–309.

93. Прохоренко, В. Н. Исследование влияния природного увлажнения на скорость карбонизации бетона / В. Н. Прохоренко, Р. Ю. Долманюк, А. А. Васильев // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. Г. Поддубного. – Гомель: БелГУТ, 2018. – С. 87–90.

94. Васильев, А. А. Алгоритм по прогнозированию и оценке срока службы железобетонных конструкций мостовых переходов / А. А. Васильев, Р. Ю. Долманюк // Строительство и восстановление искусственных сооружений : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. Г. Поддубного. – Гомель: БелГУТ, 2018. – С. 143–149.

95. Васильев, А. А. Оценка изначального содержания цемента в бетоне / А. А. Васильев // EUROPEAN RESEARCH : сб. ст. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2018. – С. 77–81.

96. Васильев, А. А. К вопросу оценки технического состояния железобетонных элементов / А. А. Васильев, Е. В. Беляева, В. И. Кирюшина // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Ч. 2 / М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2019 – С. 17–19.

97. Васильев, А. А. Оценка применения бетонов различных классов по прочности на сжатие с учетом карбонизации / А.А.Васильев // Респуб. науч.-практ. семинар «Актуальные вопросы защиты строительных конструкций от коррозии в связи с разработкой строительных норм Республики Беларусь СН «Защита строительных конструкций от коррозии» (с отменой ТКП 45-2.01-111-2008) / РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2019. – С. 11–15.

98. Швед, В. М. Оценка коэффициентов значимости строительных конструкций / В.М. Швед; В. О. Бондаренко; А. А. Васильев // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 244–248.

99. Vasiliev A. Assessment of the depth and rate of corrosion in steel reinforcement of reinforced concrete culverts / A. Vasiliev, S. Daškevič // 11th International Conference «Environmental Engineering» – Vilnius: Gediminas Technical University, Lithuania, 2020. – P. 21–22.

Учебные и практические пособия, учебники

100. Элементы зданий и сооружений : пособие по специальности «Технический надзор» / И. А. Кудрявцев [и др.]. – Гомель: БелГУТ, 2001. – 300 с.

101. Кудрявцев, И. А. Диагностика, эксплуатация и ремонт зданий и сооружений : пособие по специальности «Технический надзор» / И. А. Кудрявцев, А. А. Васильев, М. В. Беспалова. – Гомель: БелГУТ, 2003. – 265 с.

102. Комплексная оценка состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций : практическое пособие / Т. М. Пецольд [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 31 с.

103. Неразрушающие методы оценки и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практическое пособие / Т. М. Пецольд [и др.] ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 146 с.

104. Васильев, А. А. Дефекты и повреждения строительных конструкций : учебное пособие с приложением на оптическом диске / А. А. Васильев // Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 316 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 20 Мб.

105. Васильев, А. А. Техническое обследование строительных объектов (с электронным приложением) : учеб. / А. А. Васильев ; М-во трансп. – Гомель: БелГУТ, 2020. – 429 с. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 18 Мб.

Авторские свидетельства на изобретения

106. Блок стеновой трехслойный с гибкими связями : полез. модель ВУ 7498 / А. В. Герашенко, А. А. Васильев. – Опубл. 19.01.2011.

Нормативные документы

107. Защита строительных конструкций от коррозии : СН2.01.07-2020. – Введ. 17.09.2020. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – 59 с.

РЕЗЮМЕ**Васильев Александр Анатольевич****ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА**

Карбонизация бетона, техническое состояние, изначальное содержание цемента, критерии оценки технического состояния, комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния.

Цель работы – разработка комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах с учетом влияния карбонизации бетона на изменение его защитных свойств во времени по отношению к стальной арматуре.

Использованы аналитические методы обобщения результатов исследования, статистические методы оценки получаемых результатов, стандартизированные методики, приборы и оборудование для исследования физико-химических свойств бетона, а также разработанная установка для определения показателя карбонатной составляющей бетона.

По результатам лабораторных исследований и обследования различных типов ЖБЭ получены системы расчетно-экспериментальных зависимостей развития карбонизации (карбонатной составляющей и степени карбонизации) во времени по сечению бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}-C^{30}/_{37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред сельскохозяйственных, общественных и промышленных зданий с неагрессивной эксплуатационной средой, условий открытой атмосферы.

Разработана методика оценки изначального содержания цемента в бетоне по содержанию карбонатной составляющей для бетонных элементов, железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся различные сроки в разных атмосферных условиях.

Для оценки технического состояния ЖБЭ, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений, для СП 5.03.01-2020 предложен класс среды по условиям эксплуатации конструкций ХС5 ($RH \leq 100 \%$, концентрация $CO_2 \leq 1,0 \%$).

Назначены количественные критерии многоуровневой качественной оценки технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом процессов карбонизации бетона.

На основании результатов проведенных исследований разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах. Предлагаемый метод является новым дополнительным неразрушающим методом обследования железобетона. Область применения – диагностика железобетонных конструкций при выполнении их детального обследования.

Результаты работы использованы при оценке и прогнозировании технического состояния ЖБЭ (ЖБК) специализированными организациями, при разработке проектов реконструкции и при реконструкции зданий и сооружений.

SUMMARY

Vasilyev Alexander Anatolyevich

EVALUATION AND FORECASTING OF TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT CONCRETE CARBONIZATION

Carbonization of concrete, technical condition, initial cement content, criteria for assessment of technical condition, comprehensive method of assessment and forecasting of technical condition.

The aim of the work is to develop a comprehensive method of estimating and predicting the technical state of reinforced concrete elements (FCE) and structures (FCC) exploding in various air media taking into account the influence of concrete carbonization on the change of its protective properties in time relative to steel reinforcement.

Analytical methods of generalizing the results of the study, scientific methods of evaluating the obtained results, standardized methods, instruments and equipment for investigating the physical and chemical properties of concrete, as well as the developed installation for determining the index of the carbonate component of concrete have been used.

Based on the results of laboratory studies and surveys of different types of FCE, systems of calculated and experimental relationships of carbonation development (carbonate component and carbonization degree) over time have been obtained along the section of concrete classes on compression strength $C^{12}/_{15}-C^{30}/_{37}$ for different degrees of aggression of air media of agricultural, public and industrial buildings with non aggressive operating environment, conditions of open atmosphere.

A method of estimating the initial content of cement in concrete according to the comaintenance of the carbonate component for concrete elements, reinforced concrete elements and structures operating different terms in different atmospherical conditions has been developed.

To assess the technical condition of FCE operated in agricultural premises, a medium class is proposed for SP 5.03.01-2020 according to operating conditions XC5 designs $RH \leq 100 \%$, concentration of $CO_2 \leq 1.0 \%$).

Quantitative criteria of multilevel qualitative assessment of technical condition of FCE (FCC) taking into account processes of concrete carbonation are assigned.

Based on the results of the studies carried out, a comprehensive method of assessing and predicting the technical condition of of FCE and FCC operating long periods in various air environments has been developed. Proposed method is new additional non-destructive method of reinforced concrete examination. Field of application – diagnostics of reinforced concrete structures during their detailed examination.

The results of the work were used in the evaluation and forecasting of the technical condition of the FCE (FCC) by specialized organizations, in the development of reconstruction projects and in the reconstruction of buildings and structures.

РЭЗЬЮМЭ

Васільеў Аляксандр Анатольевіч

**АЦЭНКА І ПРАГНАЗАВАННЕ
ТЭХНІЧНАГА СТАНУ ЖАЛЕЗАБЕТОННЫХ КАНСТРУКЦЫЙ
З УЛІКАМ КАРБАНІЗАЦЫІ БЕТОНА**

Карбанізацыі бетону, тэхнічны стан, першапачатковае ўтрыманне цэменту, крытэрыі ацэнкі тэхнічнага стану, комплексны метады ацэнкі і прагнозыравання тэхнічнага стану.

Мэта працы - распрацоўка комплекснага метаду ацэнкі і прагназавання тэхнічнага стану жалезабетонных элементаў (ЖБЭ) і канструкцый (ЖБК), якія эксплуатауюцца ў розных паветраных асяроддзях з улікам уплыву карбанізацыі бетону на змяненне яго ахоўных уласцівасцяў ў часе ў адносінах да сталёвай арматуры.

Выкарыстаны аналітычныя метады абагульнення вынікаў даследавання, статыстычныя метады ацэнкі атрымоўваных вынікаў, стандартызаваныя метадыкі, прыборы і абсталяванне для даследавання фізіка-хімічных уласцівасцяў бетону, а таксама распрацаваная ўстаноўка для вызначэння паказчыка карбанатной складнікам бетону.

Па выніках лабараторных даследаванняў і абследавання розных тыпаў ЖБЭ атрыманы сістэмы разлікова-эксперыментальных залежнасцяў развіцця карбанізацыі (карбанатной складнікам і ступені карбанізацыі) ў часе па перасеку бетонаў класаў па трываласці $C^{12}/_{15}-C^{30}/_{37}$ для розных ступеняў агрэсіўнасці паветраных асяроддзяў сельскагаспадарчых, грамадскіх і прамысловых будынкаў з неагрэсіўнай эксплуатацыйнай асяроддзем, умоў адкрытай атмасферы.

Распрацавана метадыка ацэнкі першапачатковага ўтрымання цэменту ў бетоне па змесце карбанатной складнікам для бетонных элементаў, жалезабетонных элементаў і канструкцый, якія эксплуатауюцца розныя тэрміны ў розных атмасферных умовах.

Для ацэнкі тэхнічнага стану ЖБЭ, эксплуатаваных ва ўмовах сельскагаспадарчых памяшканняў, для СП 5.03.01-2020 прапанаваны клас асяроддзя па ўмовах эксплуатацыі канструкцый ХС5 ($RH \leq 100 \%$, канцэнтрацыя $CO_2 \leq 1,0 \%$).

Прызначаныя колькасныя крытэрыі шматзроўневай якаснай ацэнкі тэхнічнага стану ЖБЭ (ЖБК) з улікам працэсаў карбанізацыі бетону.

На падставе вынікаў праведзеных даследаванняў распрацаваны комплексны метады ацэнкі і прагназавання тэхнічнага стану ЖБЭ і ЖБК, якія эксплуатауюцца працягла тэрміны ў розных паветраных асяроддзях. Прапанаваны метады з'яўляецца новым дадатковым неразбуральнай метадам абследавання жалезабетону. Вобласць прымянення – дыягностыка жалезабетонных канструкцый пры выкананні іх дэталёвага абследавання.

Вынікі працы выкарыстаныя пры ацэнцы і прагназаванні тэхнічнага стану ЖБЭ (ЖБК) спецыялізаванымі арганізацыямі, пры распрацоўцы праектаў рэканструкцыі і пры рэканструкцыі будынкаў і збудаванняў.

Научное издание

ВАСИЛЬЕВ Александр Анатольевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С УЧЕТОМ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 06.10.2021.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,64. Тираж 100. Зак. 2447.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский государственный университет транспорта.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/361 от 13.06.2014.

№ 2/104 от 01.04.2014.

№ 3/1583 от 14.11.2017.

Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель