

624.012.35

B191

БЕЛОРУСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 669.982:620.169.1

**ВАСИЛЬЕВ**

Александр Анатольевич

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

Минск 2007

Работа выполнена в УО «Белорусский государственный университет транспорта».

**Научный руководитель:**

**Бабицкий Вячеслав Вацлавович,**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Технология бетона  
и строительные материалы» Белорусского  
национального технического университета,  
г. Минск

**Официальные оппоненты:**

**Казачек Владимир Георгиевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Железобетонные и  
каменные конструкции» Белорусского  
национального технического университета,  
г. Минск;

**Вайтович Ольга Михайловна,**  
кандидат технических наук,  
начальник мостового управления филиала  
«Институт дорожных исследований»  
РУП «Белдорцентр», г. Минск

**Оппонирующая организация:** УО «Полоцкий государственный университет», г. Полоцк

14<sup>00</sup> на заседании совета по защите  
в Белорусском национальном техническом  
университете по проспекту Независимости, 150, к. 15,  
Минск, тел. (8-017) 265-96-79, факс. (8-017) 267-61-56.

Библиотеке Белорусского национального

2007 года.

Рак Н.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

624.012.3  
B 191

**Связь работы с крупными научными программами, темами.**

Тема диссертации связана с Государственной программой фундаментальных исследований «Поверхность». Тема НИР №2765 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», утвержденной Институтом металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. Номер государственной регистрации 2005223. Срок выполнения НИР 1.07.2002 г. – 1.07.2005 г.

### Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах, на основе методов рН- и карбометрии для использования при обследовании ЖБК. Объект исследования – различные типы ЖБК с разными сроками и условиями эксплуатации, что позволяет по сравнению с исследованием лабораторных образцов, изучить изменение технического состояния реально эксплуатируемых железобетонных конструкций в зависимости от времени и условий эксплуатации.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи: на основе использования методов рН- и карбометрии:

- исследовать изменения карбонатной составляющей (КС) и параметра рН водной вытяжки цементного камня в защитном слое бетона эксплуатируемых ЖБК в зависимости от времени и условий эксплуатации;
- исследовать изменения показателей рН и КС по глубине ЖБК в зависимости от условий эксплуатации;
- разработать критерии оценки состояния бетона, арматуры и в целом – технического состояния ЖБК, эксплуатируемых в воздушной среде;
- разработать методики оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах.

### Положения, выносимые на защиту

- Результаты комплексного экспериментального исследования распределения показателей рН и КС в защитном слое и по глубине ЖБК, полученные с применением физико-химического анализа бетона методами рН- и карбометрии конструкций, эксплуатируемых длительные сроки в различных воздушных средах, позволяющие на их основе оценивать и прогнозировать техническое состояние железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных атмосферных условиях.
- Новые научно-обоснованные критерии оценки технического состояния железобетонных конструкций по параметрам рН и КС бетона, находящегося в зоне расположения арматуры, назначенные на основе анализа результатов обследования различных типов железобетонных конструкций методами рН- и карбометрии. Критерии включают многоуровневую оценку состояния бетона и стальной арматуры, и по ним – оценку технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных воздушных средах в зависимости от срока и условий эксплуатации.

н/в

- Методика оценки состояния защитных свойств бетона защитного слоя по отношению к арматуре, состояния стальной арматуры и технического состояния железобетонных конструкций, позволяющая, на основе разработанных критериев оценки технического состояния ЖБК, оценить техническое состояние конструкции, эксплуатируемой в воздушной среде на момент обследования, в зависимости от срока и условий эксплуатации.

- Методика прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, позволяющая на основе анализа зависимостей изменения показателей рН и КС во времени защитного слоя бетона, оценить изменение во времени состояние защитных свойств по отношению к арматуре бетона защитного слоя конструкций, в зависимости от условий эксплуатации, и, на основе разработанных критериев оценки технического состояния ЖБК, оценить изменение технического состояния конструкций, эксплуатируемых в воздушной среде через расчетный промежуток времени. В соответствии с предлагаемой методикой, возможно выполнение прогнозирования изменения во времени защитных свойств бетона и технического состояния, как новых конструкций, так и длительно эксплуатируемых, по физико-химическим характеристикам бетона, полученным при обследовании ЖБК.

- Методика оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре и состояния стальной арматуры по сечению железобетонных конструкций, позволяющая, на основе разработанных критериев оценки технического состояния ЖБК, оценить на момент обследования состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре и состояние стальной арматуры на любой глубине конструкции, эксплуатируемой в воздушной среде.

- Методика оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре железобетонных конструкций в полевых условиях, разработанная на основе исследования изменения карбонатной составляющей и щелочности поровой жидкости по глубине бетона конструкций, сочетающая в себе простоту индикаторного метода и точность методов рН- и карбометрии, позволяющая не разрушая конструкцию, оценивать, на момент обследования, состояние защитных свойств бетона защитного слоя по отношению к арматуре в зоне ее расположения и состояние стальной арматуры железобетонных конструкций, эксплуатируемых в воздушной среде.

#### **Личный вклад соискателя**

Представленные в диссертационной работе результаты получены и проанализированы 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 и конференциях: Могилев, 2005 г., Сумы, Украина, 2005 г, Минск, 2006 г.

#### **Опубликованность результатов**

Основные положения работы опубликованы в 9 печатных работах общим объемом 4 авторских листа. Из них 6 – статьи в журналах (5 – единолично), 3 – материалы конференций (2 – единолично).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложений. Полный объем диссертации составляет 190 страниц, в том числе: 3 приложения на 48 страницах, 73 рисунка и 8 таблиц на 42 страницах, библиографический список из 145 наименований литературных источников (включая собственные публикации) на 11 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

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

Первая глава посвящена обзору существующих методов оценки и прогнозирования состояния железобетонных конструкций.

Рассмотрены основные внешние факторы, воздействующие на ЖБК и определяющие их долговечность. На основании анализа причин аварий и значительных повреждений конструкций выявлены наиболее характерные факторы, приводящие к снижению долговечности ЖБК, эксплуатирующихся в различных средах. Объяснены причины необходимости технической диагностики строительных конструкций. Показано, что качественная оценка состояния конструкций и прогнозирование долговечности с высокой достоверностью возможны только при применении комплекса технических методов диагностики.

Приведены сведения из истории развития и современной практики методов технической диагностики конструкций зданий и сооружений на основе работ В.М. Калинина, А.А. Калинина, М.Ю. Лещинского, О.В. Лужина, Р.И. Аронова, А.А. Землянско-го, И.Г. Овчинникова, М.Г. Коревицкой, К.И. Попова, Ю.Д. Золотухина и др.

Рассмотрены основные методы технической диагностики железобетонных конструкций зданий и сооружений, входящие в комплекс работ по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений, включающие механические, физические, комплексные методы, а также натурные испытания конструкций. На основе их анализа показано, что данные методы позволяют оценивать отдельные физические и физико-механические характеристики материала конструкций и техническое состояние конструкций в целом на момент обследования. При этом они не дают возможности прогнозировать изменение характеристик материалов и технического состояния конструкции 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 среды эксплуатации, и их влияние на долговечность конструкций.

Для железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, основным процессом нейтрализации бетона является его карбонизация (результат взаимодействия углекислого газа воздуха с продуктами гидратации цемента), 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, что ведет к деградации бетона, снижению его защитных свойств по отношению к арматуре и

коррозии арматуры 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 долговечность ЖБК.

Карбонизация и ее влияние на изменение физико-механических свойств бетонов исследовались в работах С.Н. Алексеева, Н.К. Розенталя, В.В. Бабицкого, В.И. Бабушкина, Ю.М. Баженова, Ю.М. Бутга, Р. Бэррер, Л.А. Вандамовской, А.И. Васильева, М. Даймон, В.М. Москвина, Н.Л. Полейко, В. Рамачандран, Д.А. Франк-Каменецкого и др. Выполненный анализ 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 конструкциям, что не могло отразить изменения физико-механических и физико-химических характеристик бетона конструкций в зависимости от сроков и условий эксплуатации.

На основе анализа существующих экспериментальных методов оценки параметров карбонизации показано, что индикаторный метод, применяемый для оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре, дает заниженную толщину нейтрализованного слоя бетона и не позволяет с необходимой точностью и достоверностью оценивать и прогнозировать состояние ЖБК. Методы термического анализа (ДТА), количественного рентгенофазового анализа, химического анализа методом титриметрии по содержанию  $\text{CO}_2$ , анализа по величине сорбции бетоном водяного пара, применяемые для оценки степени карбонизации, достаточно сложны, трудоемки и не позволяют напрямую оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре, поскольку основным параметром оценки защитных свойств бетона по отношению к арматуре является показатель pH, характеризующий щелочность поровой жидкости бетона. Метод ускоренных электрохимических испытаний для оценки коррозионного состояния стальной арматуры ЖБК, подверженной карбонизации, позволяет установить только два состояния стали – устойчивое пассивное и коррозия стали. При анализе отсутствуют промежуточные состояния, что не позволяет оценивать и прогнозировать изменение состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре как в защитном слое, так и по глубине конструкций.

Таким образом, на основании проведенного литературного обзора показано, что существующие экспериментальные методы оценки параметров карбонизации не позволяют с достаточной степенью точности и достоверности оценивать скорость и глубину карбонизации бетона, состояние его защитных свойств по отношению к арматуре и, как следствие, оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБК, эксплуатирующихся в воздушных средах.

**Во второй главе** рассмотрены использованные методы исследования железобетонных конструкций, методы исследования состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре, методики проведения экспериментов и оценки экспериментальных результатов.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований длительно эксплуатируемых ЖБК.

Выполнено исследование содержания показателей рН и КС в защитном слое свежеизготовленных железобетонных конструкций различных типов, что позволило оценить изменение состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре на стадии изготовления конструкций. Полученные результаты показали, что после твердения изделий показатель рН поровой влаги снизился в среднем до  $12,15 \pm 0,15$ . При этом сохранилось пассивное состояние арматуры в бетоне. В поверхностных слоях бетона толщиной 10–20 мм в результате карбонизации во всех конструкциях с расходом цемента менее  $500 \text{ кг/м}^3$  нейтрализовался максимальный запас  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , достигающий 15 %, в остальных – сохранился некоторый остаток кристаллического  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Однако во всех случаях рН поровой влаги остался постоянным. Такое постоянство обусловлено достаточно высокой буферной емкостью бетона, под которой понимают содержание СаО в единице всего объема. Полученные величины ПВК показывают, что в свежеизготовленных конструкциях существует значительный запас клинкера для поддержания арматуры в пассивном состоянии.

Прослеживается четкая связь между расходом цемента для приготовления  $1 \text{ м}^3$  бетона и предельной величиной карбонизации. Чем больше расход цемента, тем выше значения ПВК и, соответственно, тем медленней будет происходить снижение показателя рН поровой влаги цементного камня и тем дольше сохранятся защитные свойства бетона по отношению к арматуре.

Полученные значения показателя КС в защитном слое различных конструкций показывают, что уже на стадии изготовления железобетонных конструкций степень карбонизации поверхностных слоев достигает существенных значений, что не учитывается в существующих прогнозных моделях.

Исследовано изменение показателей щелочности поровой жидкости и карбонатной составляющей в бетоне защитного слоя ЖБК в зависимости от времени и условий эксплуатации. По результатам анализов построены регрессионные модели зависимостей  $\sqrt{t}$  -рН и  $\sqrt{t}$  -КС в отдельных конструкциях (колоннах, ригелях (прогонах), плитах типа ПР) и суммарные зависимости  $\sqrt{t}$  -рН и  $\sqrt{t}$  -КС для всех обследованных конструкций при эксплуатации в различных условиях. В качестве примера на рисунке 1 приведены полученные суммарные экспериментальные зависимости для атмосферных условий.

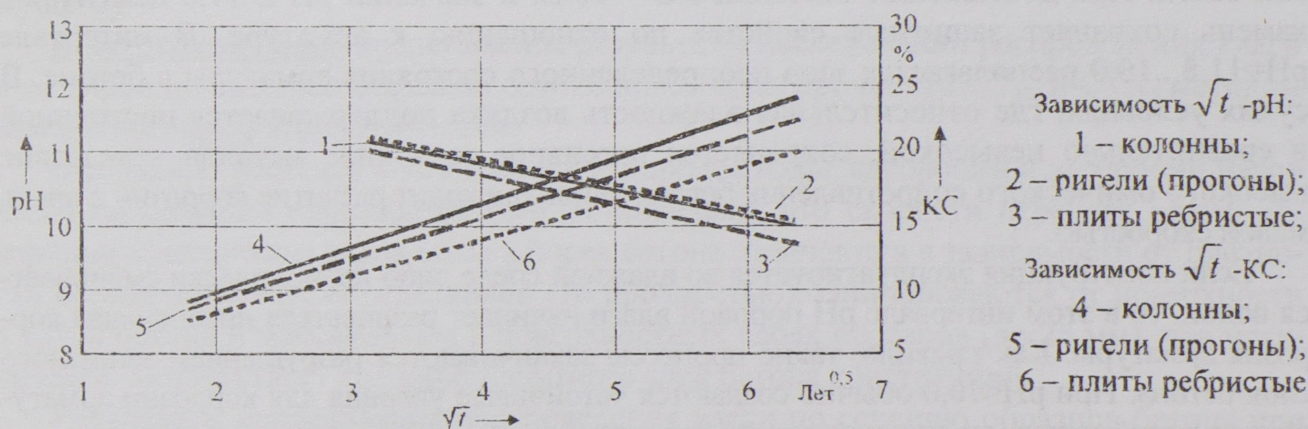


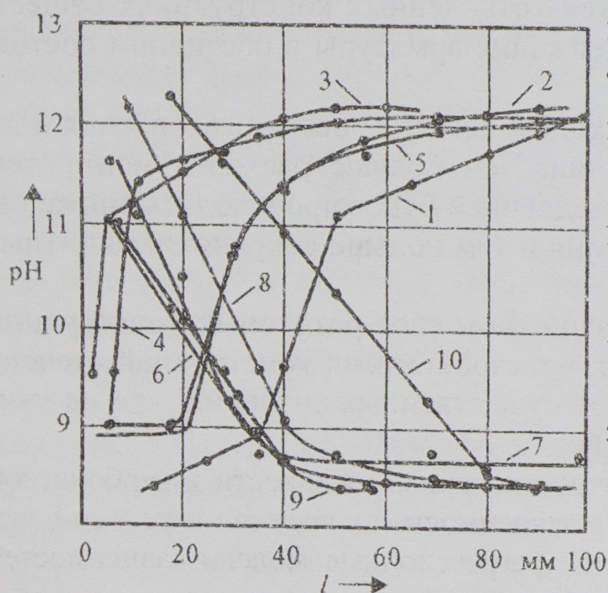
Рисунок 1 – Суммарные экспериментальные зависимости  $\sqrt{t}$  -рН и  $\sqrt{t}$  -КС для атмосферных условий

Они показывают, что с увеличением срока эксплуатации конструкций практически линейно возрастает содержание карбонатов в бетоне, а рН поровой влаги также снижа-

ется, что дает основание утверждать о существовании параболической зависимости изменения показателей щелочности поровой жидкости и карбонатной составляющей в поверхностных слоях бетона во времени.

Экспериментальные суммарные зависимости для различных условий эксплуатации отличаются углами наклона, что указывает на некоторое различие скоростей изменения физико-химических показателей бетона конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Это позволяет при прогнозировании технического состояния конструкций учитывать различие скоростей изменения защитных свойств бетона по отношению к арматуре для разных условий эксплуатации.

Выполнено исследование распределения показателей рН и КС по глубине железобетонных конструкций. Полученные экспериментальные зависимости для отдельных конструкций приведены на рисунке 2.



1-*l*-рН; 10-*l*-КС — для продольной балки после 40 лет эксплуатации в атмосферных условиях;  
 2-*l*-рН; 9-*l*-КС — для колонны после 40 лет эксплуатации в атмосферных условиях;  
 3-*l*-рН; 8-*l*-КС — для колонны после 30 лет эксплуатации в общественном помещении;  
 4-*l*-рН; 7-*l*-КС — для колонны после 40 лет эксплуатации в помещении коровника;  
 5-*l*-рН; 6-*l*-КС — для колонны после 30 лет эксплуатации в помещении свинарника

Рисунок 2 — Экспериментальные зависимости *l*-рН и *l*-КС

Исследование зависимостей *l*-рН и *l*-КС позволило установить некоторые особенности поведения бетона в контакте с воздухом. Снижение содержания  $\text{CaCO}_3$  по глубине залегания бетона сопровождается резким повышением показателя рН поровой влаги. При достижении значений  $\text{КС} = \text{const}$  и значений  $\text{рН} \geq 11,8$  цементный камень сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре. В интервале  $\text{рН} = 11,8 \dots 10,0$  располагается зона неопределенного состояния арматуры в бетоне. В сухих условиях, где относительная влажность воздуха поддерживается постоянной и сравнительно невысокой, сохраняется пассивное состояние металла вследствие высокого омического сопротивления бетона или происходит развитие коррозии с очень малой скоростью.

Если конструкция эксплуатируется во влажной среде либо периодически смачивается водой, то в этом интервале рН поровой влаги начинает развиваться интенсивная коррозия арматуры. Как правило, такие процессы заканчиваются разрушением защитного слоя бетона. При  $\text{рН} < 10,0$  обычно создаются устойчивые условия для коррозии арматуры при малейших изменениях условий эксплуатации.

Анализ экспериментальных зависимостей *l*-КС позволил выполнить определение предельной величины карбонизации (ПКВ), показывающей предельное содержание  $\text{CaCO}_3$  в бетоне при условии, что весь  $\text{CaO}$  прореагирует с  $\text{CO}_2$ , степени карбонизации (СК) — процента гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона.



Приведены аналитический и графический способы определения ПВК. Расчеты ПВК показали, что углы наклона зависимостей  $l$ -КС определяются не только временем и условиями эксплуатации, но также содержанием вяжущего и составом бетона. Чем меньше содержание цемента в бетоне, тем положе кривая  $l$ -КС.

Приведена методика расчета изначального содержания цемента в бетоне, позволяющая по известному значению ПВК и экспериментально определенной плотности бетона рассчитать содержание цемента в  $1 \text{ м}^3$  бетона на момент его приготовления, что позволяет расчетным путем оценить изначальную прочность бетона на сжатие.

Индикаторным методом и методами рН- и карбометрии выполнена оценка состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре по сечению различных ЖБК в зависимости от их месторасположения, высоты отбора проб, условий эксплуатации и др. Сравнительный анализ определения толщин нейтрализованных слоев бетона фенолфталеиновым тестом и методом рН-метрии показал, что индикаторный метод дает заниженные результаты. По сравнению с рН- метрией они отличаются, в среднем, до трех раз.

Таким образом, анализ результатов экспериментальных исследований различных типов ЖБК, эксплуатирующихся в воздушных средах, показал, что поскольку показатель рН поровой влаги цементного камня является многофункциональной характеристикой состояния бетона и позволяет судить о физико-химических изменениях в бетоне под воздействием внешней агрессивной среды и ее влиянии на защитные свойства бетона по отношению к арматуре, о толщине слоя, который потерял защитные свойства по отношению к стальной арматуре, а показатель КС позволяет оценивать распределение карбонатов по глубине бетона и его влияние на изменение щелочности поровой жидкости, использование методов рН- и карбометрии при обследовании ЖБК дает возможность получить с высокой степенью точности количественную и качественную оценку состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре на любой глубине конструкций. Кроме того, применение методов рН- и карбометрии позволяет определить изначальное содержание цемента в бетоне, вид использованного цемента, технологический брак (недовложение вяжущего).

**В четвертой главе** представлены результаты исследований распределения влаги и ее паров по сечению образцов бетона классов по прочности  $C^8/10$  и  $C^{20}/25$  методом измерения электросопротивления.

Выполнено исследование кинетики испарения воды, адсорбции и десорбции паров влаги по сечению образцов бетона. Установлено, что скорости переноса влаги, адсорбции и десорбции паров воды в порах бетона отличаются в зависимости от плотности бетона (косвенно определяемой его прочностью). Они снижаются от поверхности в глубь бетона и максимальны в поверхностных слоях образцов (до 25 мм), что практически соответствует толщине защитного слоя бетона конструкций.

Результаты исследования распределения влаги по сечению образцов бетона при ее испарении свидетельствуют об идентичности характера распределения влаги по сечению образцов бетона и зависимости распределения карбонатной составляющей по сечению длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что скорость карбонизации зависит от изменения влажности и будет определяться цикличностью измене-

ния параметров эксплуатационной среды (периодичностью дождевых осадков, изменений влажности воздуха, воздействий солнечной радиации и т.д.).

**В пятой главе** представлен комплекс методик оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, на основе методов рН- и карбометрии.

По результатам исследования состояния арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, предложена балльная система оценки ее состояния (таблица 1).

Таблица 1 - Оценка состояния стальной арматуры ЖБК

Степень коррозии арматуры, балл	Внешние признаки коррозии арматуры
I	Чистая поверхность
II	Сплошная коррозия до 50 % поверхности стержня
III	Сплошная коррозия более 50 % поверхности стержня
IV	Пластинчатая коррозия малой интенсивности (уменьшение площади сечения на величину до 20 %)
V	Пластинчатая коррозия высокой интенсивности (уменьшение площади сечения на величину более 20 %)

Для оценки зависимости коррозионного состояния арматуры от физико-химических показателей бетона определяли показатели рН и КС бетона, находящегося в зоне расположения арматуры. Путем статистической обработки полученных данных (исследовались по 40 проб бетона для каждой степени коррозии) получены области распределения показателей рН и КС с доверительной вероятностью 0,95 для различных степеней коррозии арматуры. По полученным значениям построены зависимости степени коррозионных повреждений арматуры от показателей рН и КС бетона защитного слоя (рисунки 3, 4).

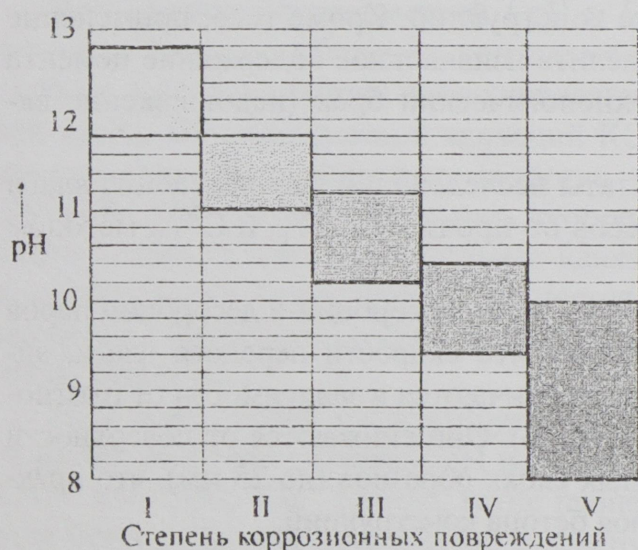


Рисунок 3 - Взаимосвязь степени коррозии арматуры и щелочности поровой жидкости

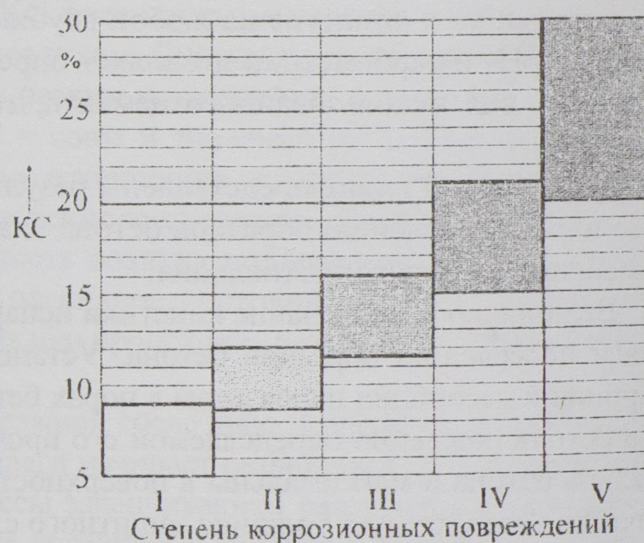


Рисунок 4 - Взаимосвязь степени коррозии арматуры и карбонатной составляющей

В соответствии с полученными данными стальная арматура железобетонных конструкций не корродирует при щелочности поровой жидкости  $pH \geq 11,8$ . Снижение же рН менее граничного значения  $pH=11,8$  вызывает коррозию арматуры разной степени интенсивности во влажных условиях и условиях переменной влажности.

Анализ полученных зависимостей показывает, что отсутствуют четкие границы областей показателей рН и КС изменения степени коррозии арматуры.

Большинство конструкций зданий и сооружений народнохозяйственного значения эксплуатируется в различных воздушных средах. Эксплуатация ЖБК в воздушных средах влияет на их долговечность, которая значительно изменяется в зависимости от времени и условий эксплуатации. Наибольший интерес представляют конструкции, эксплуатируемые в атмосферных условиях и условиях помещений сельскохозяйственного назначения, поскольку их условия эксплуатации значительно отличаются от условий эксплуатации жилых и общественных зданий.

Обследование большого числа зданий сельскохозяйственных комплексов показало, что условия эксплуатации в них значительно отличаются от классов, предлагаемых в СНБ 5.03.01-02. Для оценки состояния конструкций, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений для СНБ 5.03.01-02 предложен класс среды по условиям эксплуатации конструкций ХС5 ( $70\% < RH \leq 90\%$ , концентрация  $CO_2$  0,2...0,3 %).

Результаты обследования различных типов конструкций с использованием методов рН- и карбометрии и оценкой состояния арматуры позволили назначить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБК для условий эксплуатации конструкций классов ХС3 и ХС5 по физико-химическим показателям цементно-песчаной фракции бетона рН и КС и степени коррозии арматуры.

Критерии оценки состояния ЖБК для класса среды по условиям эксплуатации ХС5 представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Критерии оценки технического состояния ЖБК

рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры Техническое состояние железобетонной конструкции (в соответствии с СНБ 1.04.01-04)
12,5–11,8	<5	Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры – хорошее. Техническое состояние ЖБК – хорошее
12,5–11,8	5–7	Происходит плавное снижение показателя рН, свидетельствующее о нейтрализации бетона и падении его защитных свойств по отношению к арматуре. Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное
12,5–11,8	6–9	Происходит плавное снижение показателя рН. Его значения приближаются к границе, после которой бетон полностью нейтрализуется и теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре, что вызывает возможность развития коррозии во влажной среде либо условиях переменной влажности. Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное

Продолжение таблицы 2

11,8–11,3	8–18	<p>Происходит плавное снижение показателя рН. Его значения приближаются к границе, после которой начинается резкое снижение, свидетельствующее о полной потере бетоном защитных свойств по отношению к арматуре.</p> <p>2-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 25 лет.</p> <p>Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное</p>
11,3–10,9	9–18	<p>Развитие деградационных процессов в бетоне.</p> <p>2-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 10 лет.</p> <p>Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное.</p> <p>3-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 15 лет.</p> <p>Состояние бетона – удовлетворительное. Состояние арматуры – не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное</p>
10,9–10,5	9–20	<p>3-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 20 лет.</p> <p>Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное.</p> <p>Образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры.</p> <p>4-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 25 лет.</p> <p>Состояние бетона – не вполне удовлетворительное. Состояние арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное</p>
10,5–10,3	13–20	<p>Образование трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. Раскрытие трещин в местах недостаточной толщины защитного слоя. Отслаивание защитного слоя бетона в местах его недостаточной толщины.</p> <p>4-я степень коррозии арматуры.</p> <p>Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное</p>
10,3–9,5	13–25	<p>Деградация бетона повышенной интенсивности. Раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона.</p> <p>4-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 10 лет.</p> <p>Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное.</p> <p>5-я степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 15 лет.</p> <p>Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное</p>

## Окончание таблицы 2

<9,5	16–29	Полная деградация бетона. Потеря сцепления цементного камня с заполнителем. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона. 5 степень коррозии арматуры. Состояние бетона и арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – предаварийное.
<10	2–9	Нарушен рецептурный состав (недостаток вяжущего и избыток заполнителей). Состояние конструкций оценивается по результатам детального обследования.

Примечание – показатели рН и КС определены для цементно-песчаной фракции бетона.

Разработанные критерии соответствуют только тяжелым бетонам, в составе которых отсутствуют добавки, повышающие содержание карбонатной составляющей.

В зависимости от выявленных дефектов и повреждений в железобетонных элементах и конструкциях необходимо проведение комплекса работ по восстановлению их целостности и несущей способности. Разработанные критерии оценки технического состояния ЖБК в зависимости от их определенного технического состояния позволили назначить категорию по восстановлению ЖБК. Для каждой категории предложен комплекс мероприятий по восстановлению конструкций.

Предлагаемые критерии оценки технического состояния ЖБК в совокупности с мероприятиями по восстановлению конструкций значительно расширяют возможности обследования ЖБК с целью более объективной оценки их технического состояния и выдачи рекомендаций по дальнейшей безопасной эксплуатации конструкций.

Выполнена оценка перемещения фронта карбонизации по глубине конструкций на основе методов рН- и карбометрии. Поскольку распределение карбонатной составляющей по глубине конструкций происходит практически линейно, перемещение фронта карбонизации представлено в виде треугольника, в котором катетами являются степень карбонизации и толщина карбонизированного слоя, а гипотенузой – распределение карбонатной составляющей. Так как изменение показателя рН происходит обратно изменению карбонатной составляющей (он уменьшается к поверхности), зная толщину карбонизированного слоя с рН=10 (определенную фенолфталеиновой пробой) и изменение степени карбонизации по глубине конструкции, из подобия треугольников получили зависимость для определения толщины карбонизированного слоя с рН=11,8. Исследования железобетонных конструкций по глубине показали, что для атмосферных условий степень карбонизации на границе с рН=10 изменяется в пределах 45–55 %, на границе с рН=11,8 – в пределах 12–28 %. Для условий общественных помещений – соответственно в пределах 25–40 % и 10–20 %. Для условий сельскохозяйственных помещений – соответственно в пределах 45–85 % и 20–50 %.

Приняв средние значения степеней карбонизации для каждого граничного значения рН, получили аналитические выражения для определения в полевых условиях толщины нейтрализованного слоя бетона по сечению конструкций в зависимости от условий эксплуатации:

для атмосферных условий

$$x_k = 1,60x_{\phi}; \quad (1)$$

для условий общественных помещений

$$x_k = 1,25x_f; \quad (2)$$

для условий сельскохозяйственных помещений

$$x_k = 1,85x_f, \quad (3)$$

где  $x_k$  – толщина карбонизированного слоя с граничным значением  $pH=11,8$ ;

$x_f$  – толщина карбонизированного слоя, определенная индикаторным методом с граничным значением  $pH=10$ .

Суммируя результаты исследования отдельных конструкций, построили суммарные экспериментальные зависимости  $\sqrt{t}$  -  $pH$  и  $\sqrt{t}$  -  $KC$  для всех обследованных конструкций в зависимости от условий эксплуатации. В качестве примера на рисунках 5,6 приведены суммарные экспериментальные зависимости  $\sqrt{t}$  -  $pH$  и  $\sqrt{t}$  -  $KC$  для конструкций, эксплуатирующихся в атмосферных условиях. Пунктирной линией обозначен 95 % - ный доверительный интервал для средних значений  $pH$  ( $KC$ ).

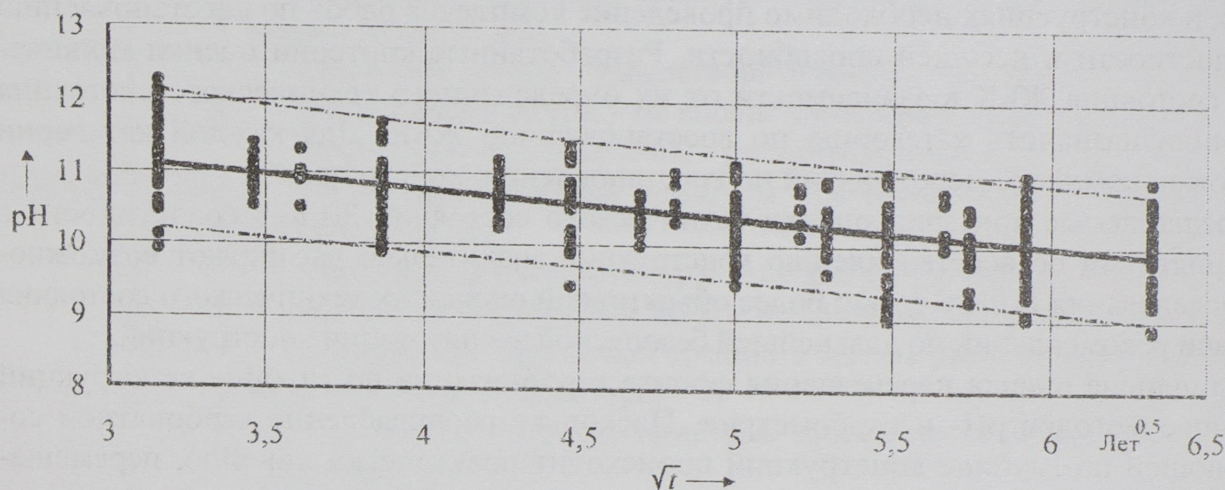


Рисунок 5 – Суммарная экспериментальная зависимость  $\sqrt{t}$  -  $pH$  для колонн, ригелей (прогонов), плит типа ПР, эксплуатирующихся в атмосферных условиях

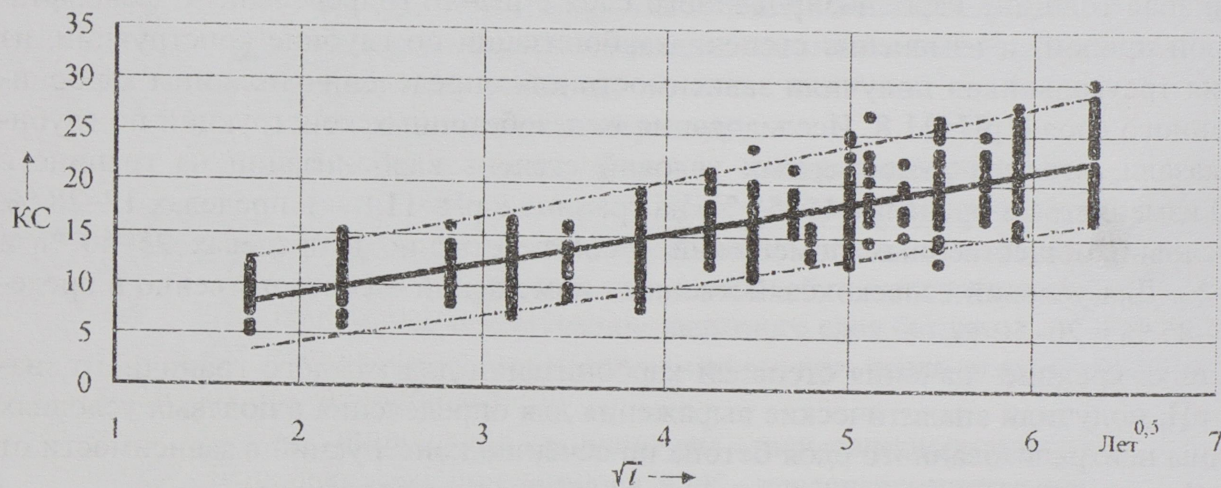


Рисунок 6 – Суммарная экспериментальная зависимость  $\sqrt{t}$  -  $KC$  для колонн, ригелей (прогонов), плит типа ПР, эксплуатирующихся в атмосферных условиях

Путем статистической обработки данных выведенных экспериментальных зависимостей получены аналитические выражения, позволяющие прогнозировать во времени средние значения изменения показателей рН и КС, % для свежизготовленных железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах.

Так, для атмосферных условий

$$pH = 12,33 - 0,39\sqrt{t}, \quad (4)$$

$$КС = 2,66 + 3,13\sqrt{t}, \quad (5)$$

для условий общественных зданий

$$pH = 12,10 - 0,28\sqrt{t}, \quad (6)$$

$$КС = 2,04 + 2,77\sqrt{t}, \quad (7)$$

для условий помещений сельскохозяйственных комплексов

$$pH = 12,33 - 0,55\sqrt{t}, \quad (8)$$

$$КС = 2,18 + 3,52\sqrt{t}. \quad (9)$$

где  $t$  – величина прогнозного периода, лет.

На основании зависимостей (4)–(9) получены выражения для прогнозирования изменения показателей рН и КС защитного слоя бетона для длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций по полученным на момент обследования значениям показателей щелочности поровой жидкости и карбонатной составляющей, % в зависимости от условий эксплуатации.

Так, для атмосферных условий

$$pH_{\text{прог}} = pH_0 - 0,39(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \quad (10)$$

$$КС_{\text{прог}} = КС_0 + 3,13(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \quad (11)$$

для условий общественных зданий

$$pH_{\text{прог}} = pH_0 - 0,28(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \quad (12)$$

$$КС_{\text{прог}} = КС_0 + 2,77(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \quad (13)$$

для условий помещений сельскохозяйственных комплексов

$$pH_{\text{прог}} = pH_0 - 0,55(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \quad (14)$$

$$КС_{\text{прог}} = КС_0 + 3,52(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \%. \quad (15)$$

где

- $pH_{\text{прог}}$  – прогножное значение щелочности поровой жидкости;
- $КС_{\text{прог}}$  – прогножное значение карбонатной составляющей, %;
- $pH_0$  – фактическое значение щелочности поровой жидкости, полученное при обследовании конструкции;
- $КС_0$  – фактическое значение карбонатной составляющей, %, полученное при обследовании конструкции;
- $t_{\text{прог}}$  – величина прогнозного периода, лет;
- $t_3$  – величина срока эксплуатации конструкции, лет.

Применение данных зависимостей в совокупности с разработанными критериями оценки состояния ЖБК позволяет выполнить прогнозирование во времени изменения технического состояния конструкций и, как следствие, оценить их долговечность в зависимости от условий эксплуатации.

На основании исследования изменения во времени физико-химических свойств бетона в зависимости от условий эксплуатации конструкций, исследования их изменения по глубине конструкций, назначенных критериев оценки технического состояния железобетонных конструкций по показателям рН и КС разработан комплекс методик для оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях. Он включает в себя: методику оценки состояния защитных свойств бетона защитного слоя по отношению к арматуре, состояния стальной арматуры и технического состояния конструкций в целом; методику прогнозирования изменения технического состояния железобетонных конструкций во времени; методику оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре и состояния стальной арматуры по сечению железобетонных конструкций; методику оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре железобетонных конструкций в полевых условиях.

Предлагаемый комплекс методик в совокупности составляет комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах.

Он позволяет при детальном обследовании ЖБК, в зависимости от цели исследования, по значениям показателей рН и КС цементно-песчаной фракции бетона в зоне расположения арматуры и разработанным критериям оценки технического состояния ЖБК оценивать техническое состояние конструкций и прогнозировать его как для свежееизготовленных, так и для длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций, оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре и состояние стальной арматуры по сечению железобетонных конструкций, в полевых условиях оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре. И в зависимости от полученного (прогнозируемого) при обследовании ЖБК технического состояния конструкций назначать комплекс мероприятий по их восстановлению для дальнейшей длительной безопасной эксплуатации зданий и сооружений.

Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах, по сути, является дополнительным неразрушающим методом обследования железобетонных конструкций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. По результатам экспериментального исследования физико-химических параметров бетона защитного слоя свежееизготовленных ЖБК различных типов, показано, что уже на стадии изготовления конструкций степень карбонизации поверхностных слоев бетона достигает существенных значений, что не учитывается в существующих прогнозных моделях [1, 2, 4].



2. На основании исследований изменения физико-химических свойств бетона в поверхностных слоях при карбонизации реальных железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных воздушных средах, выполненных с использованием методов рН- и карбометрии и статистических методов обработки данных, получены регрессионные зависимости распределения щелочности поровой жидкости и карбонатной составляющей в поверхностных слоях бетона во времени ( $\sqrt{t}$ -рН,  $\sqrt{t}$ -КС) для различных условий и сроков эксплуатации. Выявлено, что между временем эксплуатации  $t$ , показателями рН и КС существует устойчивая связь. Для различных видов конструкций полученные зависимости носят практически линейный характер. С возрастанием срока эксплуатации происходит снижение показателя рН и увеличение показателя КС. Путем статистической обработки выведенных зависимостей получены аналитические выражения, позволяющие прогнозировать во времени средние значения изменения показателей рН и КС для железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах [6].

3. По результатам экспериментального исследования изменения физико-химических свойств бетона по глубине реальных железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных воздушных средах, получены зависимости распределения по глубине конструкций показателя щелочности поровой жидкости и карбонатной составляющей ( $l$ -рН,  $l$ -КС). Показано, что в конструкциях, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах, происходит близкое к линейному снижению содержания карбонатов и увеличение показателя рН по сечению конструкций с поверхности вглубь бетона [3, 6, 8]. По результатам анализа распределения карбонатной составляющей по глубине бетона предложены понятие и расчет предельной величины карбонизации, расчет степени карбонизации бетона по глубине конструкции; методика определения количества цемента, использованного для приготовления бетона [3, 7, 8]. Результаты экспериментального исследования распределения влаги и ее паров по сечению образцов бетона различных классов по прочности на сжатие показали, что скорость переноса влаги, адсорбции и десорбции паров воды в порах бетона снижается от поверхности вглубь бетона. Она максимальна в поверхностных слоях бетона (до 25 мм), что практически соответствует толщине защитного слоя бетона. Характер распределения влаги в порах бетона по сечению конструкций совпадает с характером изменения содержания карбонатов по сечению бетона длительно эксплуатируемых конструкций [5].

4. На основе экспериментального исследования изменения карбонатной составляющей и щелочности поровой жидкости по глубине бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных воздушных средах, выполнена оценка перемещения фронта карбонизации бетона. Получены экспериментальные зависимости, увязывающие толщину слоя бетона при граничном значении рН=10 (определенную фенолфталеиновой пробой) с толщиной слоя при граничном значении рН=11,8, позволяющие в полевых условиях более достоверно оценивать защитные свойства бетона по отношению к арматуре железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных атмосферных условиях [6, 9].

5. Для конструкций, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений для СНБ 5.03.01-02 предложен класс среды по условиям эксплуатации ХС5 ( $70\% < RH \leq 90\%$ , концентрация  $CO_2$  0,2...0,3 %) [6].

6. На основании экспериментальных исследований изменения физико-химических свойств бетона при карбонизации, изучения результатов обследования многочисленных железобетонных конструкций, эксплуатирувавшихся в различных атмосферных условиях, предложена балльная система оценки коррозионного состояния арматуры, определены качественные критерии многоуровневой оценки технического состояния ЖБК для условий эксплуатации классов ХС3, ХС5 по количественным показателям рН и КС цементно-песчаной фракции бетона, выведены аналитические зависимости для прогнозирования изменения показателей рН и КС во времени [6]. На их основе предложены методики оценки и прогнозирования состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре, состояния арматуры, оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре по сечению конструкций, оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре в полевых условиях [6], составляющие в совокупности комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах.

### Рекомендации по практическому использованию результатов

Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций является дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных атмосферных условиях. Он позволяет при выполнении детального обследования железобетонных конструкций оценить их техническое состояние на момент обследования и выполнить его прогнозирование на любой срок в зависимости от условий эксплуатации.

Его применение дает возможность:

- в лабораторных условиях: по образцам бетона защитного слоя конструкций оценить состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре, состояние арматуры, и по ним – техническое состояние конструкции в целом на момент обследования, в зависимости от условий эксплуатации; выполнить прогнозирование изменения технического состояния ЖБК в зависимости от времени и условий эксплуатации; по образцам бетона, отобраным по сечению конструкции, оценить на момент обследования состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре и состояние стальной арматуры на любой глубине конструкции, эксплуатируемой в воздушной среде;

- в полевых условиях: по образцам бетона, отобраным в защитном слое конструкций, определить толщину слоя бетона, потерявшего свои защитные свойства по отношению к арматуре и в зависимости от расположения арматуры, на момент обследования, оценить состояние защитных свойств бетона защитного слоя по отношению к арматуре и состояние стальной арматуры конструкций.

Основными достоинствами предлагаемого комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в воздушных условиях, являются несложность выполнения анализов, сохранение целостности конструкций и приемлемая точность. Для анализов используются образцы бетона (цементно-песчаная фракция), получаемые скалыванием на глубину 10–20 мм, либо порошок, получаемый выбуриванием по глубине конструкций, что не приводит к разрушению исследуемой конструкции. Анализ образцов не требует применения специального дорогостоящего оборудования. Полный анализ одного образца занимает в среднем 90 минут. Предлагаемый метод позволяет определить границу поте-

ри защитных свойств бетона по отношению к арматуре, оценить состояние стальной арматуры и дает возможность проследить с высокой точностью изменение защитных свойств бетона по отношению к арматуре по глубине конструкций.

При лабораторном исследовании показатели рН и КС определяются с точностью – 0,01.

Предлагаемый комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций применяется при детальном обследовании железобетонных конструкций, его результаты используются при разработке проектов реконструкции и проведении реконструкций зданий и сооружений для оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах и выборе мероприятий по восстановлению конструкций, проектными и строительными организациями Беларуси.

Акты внедрения (использования) разработки представлены в Приложении В.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

### *Статьи в журналах*

1. Кудрявцев, И.А. Исследование карбонизации бетонов в контакте с углекислым газом на стадии их изготовления/ И.А. Кудрявцев, В.П. Богданов, А.А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты. – 2003.– Т. 8, №1.– С. 67–71.

2. Васильев, А.А. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с момента их изготовления/ А.А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты.– 2004.– Т.9, № 4.– С. 30–33.

3. Васильев, А. А. Об оценке карбонизации железобетонных конструкций/ А.А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2005.– № 1 (10). – С. 37–41.

4. Васильев, А. А. Оценка изменения состояния железобетонных конструкций при длительном контакте с атмосферой/ А.А. Васильев // Материалы, технологии, инструменты. – 2005.– Т. 10, № 2. – С. 39–42.

5. Васильев, А.А. Исследование механизма и кинетики карбонизации железобетонных конструкций/А.А. Васильев //Строительная наука и техника.– 2006.– 1(4).– С.52–57.

6. Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, на основе методов рН- и карбометрии/А.А. Васильев //Строительная наука и техника.–2006.–№4(7).–С.81-88.

### *Материалы конференций*

7. Васильев, А. А. Сравнительная оценка состояния чаши плавательного бассейна/ А.А. Васильев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2005. – Ч.1.– С. 348–349.

8. Васильев, А. А. Опыт использования рН- и карбометрии для оценки состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций/ А.А. Васильев // Научно-технические проблемы современного железобетона: материалы Всеукраинской науч.-техн. конф. – Сумы, 2005.– Т 2. – С. 110–117.

9. Бабицкий, В.В. Коррозионная стойкость железобетона в воздушной среде/ В.В. Бабицкий, А.А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XIV научно-практич. семинара.– Минск, 2006.– С. 170–175.

## РЕЗЮМЕ

Васильев Александр Анатольевич

### ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Железобетонные конструкции (ЖБК), долговечность, карбонизация бетона, методы рН- и карбометрии, показатель рН водной вытяжки цементного камня, карбонатная составляющая (КС), критерии оценки технического состояния конструкций, комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК.

Цель работы – разработка комплексного метода оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах, на основе методов рН- и карбометрии для использования при обследовании ЖБК.

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 КС цементно-песчаной фракции бетона.

По результатам обследования различных типов ЖБК получены аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать изменение показателей рН и КС во времени как для свежеизготовленных конструкций, так и длительно эксплуатируемых в различных воздушных средах; аналитические выражения для оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре по сечению ЖБК в полевых условиях.

Для оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений, для СНБ 5.03.01-02 предложен класс среды по условиям эксплуатации конструкций ХС5 ( $70\% < RH \leq 90\%$ , концентрация  $CO_2$  0,2...0,3 %).

Назначены количественные критерии многоуровневой качественной оценки технического состояния ЖБК для условий эксплуатации конструкций классов сред ХС3 и ХС5 по физико-химическим показателям рН и КС цементно-песчаной фракции бетона и степени коррозии арматуры.

На основании разработанных критериев оценки технического состояния железобетонных конструкций по показателям рН и КС, полученных аналитических выражений для прогнозирования изменения показателей рН и КС во времени разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах. Предлагаемый метод является новым дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБК, эксплуатирующихся в воздушных средах.

Область применения – диагностика железобетонных конструкций при выполнении их детального обследования.

Результаты работы использованы при разработке проектов реконструкции зданий и сооружений, а также при оценке их технического состояния эксплуатирующимися организациями.

## РЭЗІЮМЭ

Васільеў Аляксандр Анатольевіч

### АЦЭНКА І ПРАГНАЗІРАВАННЕ ДАЎГАВЕЧНАСЦІ ЖАЛЕЗАБЕТОННЫХ КАНСТРУКЦЫЙ, ЯКІЯ ЭКСПЛУАТУЮЦА ў ПАВЕТРАНЫМ АСЯРОДДЗІ

Жалезабетонныя канструкцыі (ЖБК), даўгавечнасць, карбанізацыя бетону, метады рН- і карбаметрыі, паказчык рН воднай выцяжкі цэментнага камя, карбанатная складальная (КС), крытэрыі ацэнкі тэхнічнага стану канструкцый, комплексны метады ацэнкі і прагназіравання тэхнічнага стану ЖБК.

Мэта работы – распрацоўка комплекснага метаду ацэнкі і прагназіравання тэхнічнага стану ЖБК, эксплуатаемых доўгі тэрмін у розным паветраным асяроддзі, на аснове метадаў рН- і карбаметрыі для выкарыстання пры абследаванні ЖБК.

Выкарыстаны аналітычныя метады абагульнення вынікаў даследавання, статыстычныя метады ацэнкі атрыманых вынікаў, стардантызаваныя метадыкі, прыборы і абсталяванне для даследавання фізіка-хімічных уласцівасцяў бетону, а таксама распрацаваная ўстаноўка для вызначэння паказчыка КС цэментна-пясчанай фракцыі бетону.

Па выніках абследавання розных тыпаў ЖБК атрыманы аналітычныя залежнасці, якія дазваляюць прагназіраваць змяненні паказчыкаў рН і КС у часе як для свежавырабленых канструкцый, так і доўгатэрмінова эксплуатаемых у розным паветраным асяроддзі; аналітычныя выражэнні для ацэнкі стану ахоўных уласцівасцяў бетону ў адносінах да арматуры па сячэнні ЖБК у палявых умовах.

Для ацэнкі тэхнічнага стану жалезабетонных канструкцый, якія эксплуатаюцца ва ўмовах сельскагаспадарчых памяшканняў, для СНБ 5.03.01-02 прапанаваны клас асяроддзя па ўмовах эксплуатацыі канструкцый ХС5 ( $70 \% < \text{RH} \leq 90 \%$ , канцэнтрацыя  $\text{CO}_2$  0,2...0,3%).

Назначаны колькасныя крытэрыі шматступенчатай якаснай ацэнкі тэхнічнага стану ЖБК для ўмоў эксплуатацыі канструкцый класа асяроддзя ХС3 і ХС5 па фізіка-хімічных паказчыках рН і КС цэментна-пясчанай фракцыі бетону і ступені карозіі арматуры.

На аснове распрацаваных крытэрыяў ацэнкі тэхнічнага стану жалезабетонных канструкцый па паказчыках рН і КС, атрыманых аналітычных выражэнняў для прагназіравання змяненняў паказчыкаў рН і КС у часе распрацаваны комплексны метады ацэнкі і прагназіравання тэхнічнага стану жалезабетонных канструкцый, якія эксплуатаюцца доўгі тэрмін у розным паветраным асяроддзі. Прапанаваны метады з'яўляецца новым дапаўняльным неразбуральным метадам абследавання ЖБК, якія эксплуатаюцца ў паветраным асяроддзі.

Галіна выкарыстання – дыягностыка жалезабетонных канструкцый пры выкананні іх дэталёвага абследавання.

Вынікі работы выкарыстаны пры распрацоўцы праектаў рэканструкцыі будынкаў і збудаванняў, а таксама пры ацэнцы іх тэхнічнага стану эксплуатаемыхі арганізацыямі.

## SUMMARY

Vasilyev Alexandr Anatolyevich

### DURABILITY ESTIMATION AND FORECASTING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES MAINTAINED IN ATMOSPHERIC CONDITIONS

Reinforced concrete structures (RCS), durability, concrete carbonization, methods of pH- and carbometry, methods of pH- and carbometry, pH index of cement stone water extract, carbonate component (CC), estimation criteria of structures technical condition, complex method of estimation and forecasting of reinforced concrete structures technical condition.

The aim of the work is complex method development of evaluation and forecasting of technical condition of reinforced concrete structures which are exploited for long terms in different air environment on the basis of pH- and carbometry methods for use at reinforced concrete structures examination.

In the work there were used analytical methods of investigation results generalization, statistical methods of obtained results evaluation, standardized methods, instruments and equipment for concrete physical chemical properties investigation and also a developed apparatus for determination of CC index of concrete cement-sand fraction.

According to investigation results of different reinforced concrete structures types we obtained analytical dependences which allow to forecast pH and CC indexes change against time both for fresh made and exploited for long terms in different air environments structures; analytical expressions for evaluation of concrete protecting properties condition relative to reinforcement on reinforced concrete structure cross section in field conditions.

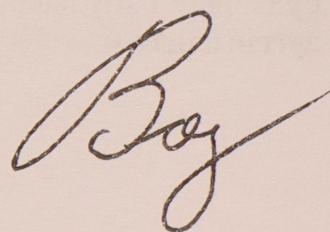
For evaluation of condition of constructions exploited in agricultural premises conditions for SNB 5.03.01-02 we offer an environment class according to construction exploitation XC5 ( $70\% < RH \leq 90\%$ ,  $CO_2$  concentration – 0,2...0,3%).

Quantitative criteria of multilevel qualitative evaluation of reinforced concrete structure technical condition for exploitation condition of class XC3 and XC5 constructions according to physical chemical indicators of cement sand concrete fraction and corrosion degree are predetermined.

On the basis of developed criteria of reinforced concrete structures technical conditions evaluation on pH and CC indicators, obtained analytical expressions for forecasting of pH and CC indicators change against time we developed a complex method of evaluation and forecasting of technical condition of reinforced concrete structures exploited for long terms in various air environments. The suggested method is a new additional non destructive method of examination of reinforced concrete structures exploited in air environments.

Sphere of application - reinforced concrete structure diagnostics at their detailed examination.

The results of the work are used at structures reconstruction projects development and also at evaluation of their technical state by operating organizations.



Научное издание

ВАСИЛЬЕВ Александр Анатольевич

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

05. 23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 02.02.2007.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Печать на ризографе. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,37. Тираж 80. Зак. 494.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Лицензия №02330/0148780 от 30.04.2004.  
246022, Гомель, ул. Кирова, 34.