

УДК 624.011/014

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОБСЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ,  
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНЫХ СРЕДАХ***канд. техн. наук А.А. ВАСИЛЬЕВ**(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)*

*Представлен неразрушающий метод обследования железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах. Приведены результаты изучения методами рН- и карбометрии коррозионного поведения основных типов железобетонных конструкций в контакте с атмосферой для различных сроков и условий эксплуатации и разработанный на их основе комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния таких конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Проведенные исследования позволили более объективно оценить развитие карбонизационных процессов в реальных условиях эксплуатации. Их результаты показывают, что в реально эксплуатируемых конструкциях имеет место снижение по сечению конструкций (к поверхности) показателя рН с возрастанием концентрации карбонатов. Скорость процессов зависит от состава бетона, возраста конструкций и прежде всего от условий эксплуатации.*

**Введение.** Железобетонные конструкции (ЖБК) составляют основную долю конструкций капитальных зданий и сооружений, поэтому от их состояния зависят эксплуатационная надежность и долговечность большинства объектов народного хозяйства. Качественная и количественная оценка конструктивных и эксплуатационных свойств ЖБК зданий и сооружений при их обследовании осуществляется методами технической диагностики, включающей механические, физические, комплексные методы, а также натурные испытания конструкций. Данные методы позволяют оценивать отдельные физические и физико-механические характеристики материалов конструкций и техническое состояние конструкций в целом на момент обследования. При этом они не позволяют оценить качественные и количественные структурные изменения бетона, происходящие во времени под воздействием среды эксплуатации, и их влияние на долговечность конструкций. Кроме того, существующие методы не дают возможность прогнозировать изменение физико-химических характеристик материалов и технического состояния конструкций с течением времени в зависимости от условий эксплуатации.

Все железобетонные конструкции, эксплуатирующиеся в воздушных средах, подвержены влиянию находящихся в них кислых газов. Поскольку концентрация углекислого газа в воздухе в  $10 \dots 10^4$  раз выше концентрации других кислых газов, основным процессом нейтрализации бетона является карбонизация. При карбонизации изменяется содержание карбонатной составляющей (КС), по мере увеличения которой происходят структурные изменения цементного камня, вызывающие деградацию бетона, приводя к снижению его защитных свойств по отношению к арматуре. Развиваясь во времени, они способствуют развитию коррозии арматуры и приводят в итоге к потере конструкцией несущей способности и возникновению аварийной ситуации.

**Основная часть.** В настоящее время оценку и прогнозирование карбонизации в ЖБК, эксплуатирующихся в воздушной среде, осуществляют по изменению толщины нейтрализованного слоя бетона. Ее определяют с помощью 0,1 % спиртового раствора фенолфталеина (индикаторным тестом). При этом считается, что бетон в неокрашенной зоне нейтрализован и потерял свои защитные свойства по отношению к арматуре, а в окрашенной – находится в удовлетворительном состоянии.

В соответствии с общепринятыми представлениями карбонизация развивается линейно с поверхности вглубь конструкции, при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне [1]. Процесс карбонизации рассматривается как конечный во времени и по глубине [2]. Однако многолетние научные исследования ЖБК по глубине [3 – 7] полностью опровергают такие представления. Они показывают, что карбонизация бетона продолжается в течение всего эксплуатационного периода конструкций. Она развивается с поверхностных слоев вглубь бетона конструкций не фронтально, а по экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях). При этом значения толщины слоя бетона, в которой он потерял защитные свойства по отношению к арматуре, определенные индикаторным тестом и физико-химическим методом (методами рН- и карбометрии), отличаются в несколько раз, а коррозионные процессы различной интенсивности в арматуре присутствуют в зоне, в которой по индикаторному тесту бетон сохраняет свои защитные свойства по отношению к арматуре. Кроме того, в лабораторных условиях выявлено, что на границе перехода неокрашенной зоны бетона в окрашенную показатель рН  $\approx 10$  [8], а в соответствии с исследованиями [9] коррозия арматуры возможна при рН  $\leq 11,8$ .

Таким образом, индикаторный тест не позволяет детально судить об изменении показателя рН поровой влаги цементного камня в нейтрализованной зоне и за ее пределами, как следствие, и о состоянии

защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Применяемый в лабораторных и полевых условиях для оценки карбонизации бетона индикаторный метод не дает возможности объективно и достоверно оценивать и прогнозировать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Поэтому возникла необходимость разработки методик оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, основанных на изучении физико-химических процессов, происходящих в бетоне, и их влиянии на изменение защитных по отношению к арматуре свойств бетона.

**Постановка задачи**

Целью данной работы явилось:

- изучение контакта ЖБК из тяжелых бетонов с атмосферой при различных сроках и условиях их эксплуатации;
- разработка критериев оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатируемых в различных воздушных средах, на основе использования методов рН- и карбометрии;
- прогнозирование изменения показателей рН и КС защитного слоя бетона во времени в зависимости от условий эксплуатации конструкций;
- сравнительная оценка определения толщины карбонизированного бетона индикаторным методом и методом рН-метрии.

В основу исследований положено использование методов рН- и карбометрии, поскольку показатель рН (водородный показатель поровой влаги цементного камня) является основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты под воздействием внешней среды и является универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре, а показатель КС характеризует процентное содержание карбонатов в бетоне и позволяет оценить их влияние на изменение показателя рН.

**Объекты и методы исследования.** Объектами исследования служили железобетонные конструкции различных типов: колонны, балки (прогоны, фермы), плиты типа ПР, находившиеся в эксплуатации длительное время в различных воздушных средах.

Исследования проводились как в лабораторных условиях (на свежизготовленных образцах и образцах, отобранных из эксплуатируемых конструкций), так и в натуральных условиях на реально эксплуатируемых ЖБК.

Для анализа отбирались образцы бетона на глубине 10...25 мм, что соответствует зоне расположения арматуры, а также образцы в виде порошка, получаемые выбуриванием по сечению конструкций.

Показатель рН определялся по методике [10]. Показатель КС – объемно-газовым методом [11]. Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel» и пакета статистического анализа данных «Statgraphics» [12].

**Результаты и их обсуждение**

**Разработка критериев оценки технического состояния ЖБК.** В результате обследования многочисленных железобетонных конструкций, эксплуатировавшихся в различных воздушных средах, при оценке состояния арматуры были выявлены разные степени ее коррозионных повреждений. Полученные результаты систематизированы с целью сопоставления коррозионного состояния стальной арматуры с параметрами защитного слоя бетона. Для оценки состояния арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, разработана соответствующая балльная система, приведенная в таблице 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 степени интенсивности (уменьшение площади сечения на величину до 20 %)
V	Пластинчатая коррозия средней степени интенсивности (уменьшение площади сечения стержня на величину более 20 %)

Для оценки зависимости коррозионного состояния арматуры от физико-химических показателей бетона защитного слоя определяли показатели рН и КС бетона, находящегося в зоне расположения арматуры. Путем статистической обработки полученных результатов (исследовались по 40 проб бетона для ка-

ждой степени коррозии) получены области распределения показателей рН и КС с доверительной вероятностью 0,95 для различных степеней коррозии арматуры (рис. 1).

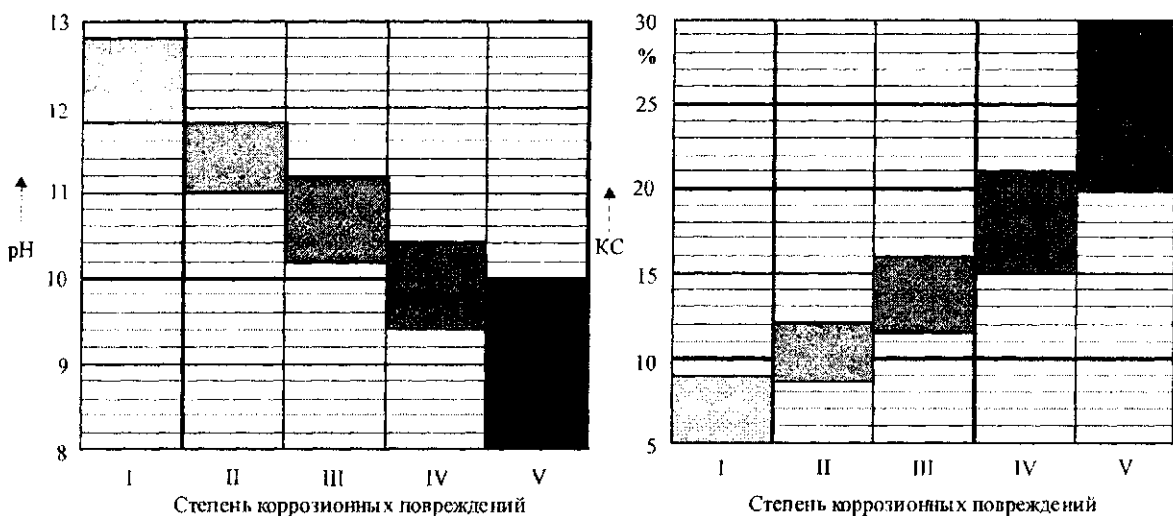


Рис. 1. Взаимосвязь степени коррозии арматуры с показателями рН и КС

Исследования показали, что стальная арматура железобетонных конструкций не корродирует при показателе щелочности поровой жидкости  $pH \geq 11,8$ . Снижение же показателя рН менее граничного значения ( $pH = 11,8$ ) вызывает коррозию арматуры различной степени интенсивности. Если сопоставить величину карбонатной составляющей с состоянием стальной арматуры, то здесь также можно отметить явно выраженную закономерность – с увеличением карбонатной составляющей степень коррозии стали возрастает.

**Критерии оценки технического состояния ЖБК.** Большинство конструкций зданий и сооружений эксплуатируются в различных воздушных средах (в атмосферных условиях, условиях жилых, общественных помещений и помещений сельскохозяйственного назначения). 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.

Результаты обследования различных типов конструкций с использованием методов рН- и карбонометрии и оценки состояния арматуры позволили назначить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБК для условий эксплуатации класса ХС3 в соответствии с [13] по физико-химическим показателям цементно-песчаной фракции бетона рН и КС и степени коррозии арматуры. Обследование большого числа зданий сельскохозяйственных комплексов показало, что условия эксплуатации в них значительно отличаются от классов, предлагаемых в [13]. Для оценки состояния конструкций, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений в [13], предложен класс по условиям эксплуатации ХС5 ( $70\% < RH \leq 90\%$ ; концентрация  $CO_2$  0,2...0,3 %).

Критерии оценки технического состояния ЖБК по показателям рН и КС защитного слоя бетона и степени коррозии арматуры для условий эксплуатации класса ХС5 представлены в таблице 2.

Таблица 2

Критерии оценки технического состояния ЖБК для класса по условиям эксплуатации ХС5

рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры Техническое состояние железобетонной конструкции (в соответствии с СНБ 1.04.01-04)	Категория восстановления
1	2	3	4
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	I
12,5...11,8	5...7	Происходит плавное снижение показателя рН, свидетельствующее о нейтрализации бетона и начале падения его защитных свойств по отношению к арматуре. Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре. Арматура находится в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК удовлетворительное	I

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
12,5...11,8	6...9	Происходит плавное изменение показателя pH. 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 находится в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК удовлетворительное	I
11,8...11,3	8...18	Происходит плавное изменение показателя pH. Его значения приближаются к границе, после которой начинается резкое снижение, свидетельствующее о полной потере бетоном защитных свойств по отношению к арматуре, что приводит к развитию коррозионных процессов в арматуре при длительных сроках эксплуатации. II степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 25 лет. Состояние бетона, арматуры удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК удовлетворительное	II
11,3...10,9	9...18	Развитие деградационных процессов в бетоне и арматуре. II степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 10 лет. Состояние бетона, арматуры удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК удовлетворительное	II
		III степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 15 лет. Состояние бетона – удовлетворительное. Состояние арматуры – не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК удовлетворительное	III
10,9...10,5	9...20	Ускорение деградационных процессов в бетоне и арматуре. III степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 20 лет. Состояние бетона, арматуры не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК не вполне удовлетворительное. Образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры	III
		IV степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 25 лет. Состояние бетона не вполне удовлетворительное. Состояние арматуры неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК не вполне удовлетворительное	IV
10,5...10,3	13...20	Ускорение деградационных процессов в бетоне и арматуре. 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. IV степень коррозии арматуры. Состояние бетона, арматуры неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК неудовлетворительное	IV
10,3...9,5	13...25	Деградация бетона повышенной интенсивности. Ускорение коррозионных процессов в арматуре. Раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона. IV степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 10 лет. Состояние бетона, арматуры неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК неудовлетворительное. V степень коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции более 15 лет. Состояние бетона, арматуры неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК неудовлетворительное	V
< 9,5	16...29	Полная деградация бетона. Потеря сцепления цементного камня с заполнителем. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона. Интенсивные коррозионные процессы в арматуре. V степень коррозии арматуры. Состояние бетона и арматуры неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК предаварийное	V
< 10	2...9	Нарушен рецептурный состав (недостаток вяжущего и избыток заполнителей). Техническое состояние конструкций оценивается по результатам детального обследования	–

Разработанные критерии соответствуют только тяжелым бетонам, обеспечивающим пассивное состояние стальной арматуры, начиная с момента изготовления конструкции.

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 позволяют в зависимости от полученных значений показателей рН и КС и определенного технического состояния ЖБК назначить категории по их восстановлению (см. табл. 2).

Ориентировочный состав работ по восстановлению конструкций в соответствии с категорией восстановления исходя из состояния обследованной конструкции приведен в таблице 3. В каждом конкретном случае состав работ может изменяться (дополняться) в зависимости от результатов детального обследования железобетонных элементов (конструкций).

Таблица 3

## Мероприятия по восстановлению конструкций

Категория восстановления	Мероприятия по восстановлению конструкций
I	Специальных мероприятий по восстановлению либо усилению конструкций не требуется
II	Применение способов вторичной защиты бетона (оштукатуривание, побелка, окрашивание и т.д.)
III	Гидроизоляция поверхности бетона составами проникающего действия для ослабления воздействия агрессивности среды и снижения интенсивности коррозионных процессов в бетоне и арматуре
IV	Ревизия защитного слоя бетона с удалением поврежденных и отслоившихся фрагментов. Расшивка и заделка трещин ремонтными составами. Зачистка оголенной арматуры и покрытие ее антикоррозионным составом. Восстановление защитного слоя бетона ремонтными составами. Обработка поверхности бетона составами проникающего действия для ослабления воздействия агрессивности среды и снижения интенсивности коррозионных процессов в бетоне и арматуре
V	Ревизия защитного слоя бетона с удалением поврежденных и отслоившихся фрагментов. Расшивка и заделка трещин ремонтными составами. Зачистка оголенной арматуры и покрытие ее антикоррозионным составом. Восстановление защитного слоя бетона ремонтными составами. Обработка поверхности бетона составами проникающего действия для ослабления воздействия агрессивности среды и снижения интенсивности коррозионных процессов в бетоне и арматуре. Усиление элемента (необходимость усиления и степень усиления элемента определяются расчетом)

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 разработки рекомендаций по дальнейшей безопасной эксплуатации конструкций.

**Исследование изменения во времени показателей рН и КС бетона защитного слоя.** Предложенные критерии позволяют более объективно оценить техническое состояние ЖБК на момент обследования, но не позволяют прогнозировать его изменение во времени.

Полученные ранее экспериментальные результаты показывают, что показатель рН поровой влаги цементного камня довольно точно отражает физико-химические процессы, происходящие в бетоне, начиная уже с момента его изготовления [3].

Для бетонов воздушного твердения взаимодействие  $\text{CO}_2$  воздуха с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  сразу после изготовления не оказывает заметное влияние на показатель рН, так как в них  $\text{pH} \geq 12,5$ .

При термической обработке изделий из бетона величина рН поверхностных слоев несколько снижается, составляя 12,0...12,5, при содержании карбонатов в тех же количествах, как и при воздушном твердении.

Это свидетельствует о том, что на начальной стадии эксплуатации ЖБК возрастание концентрации карбонатов не оказывает существенное влияние на показатель рН бетонов, изготовленных на портландцементе, к тому же в свежизготовленных изделиях значительный промежуток времени показатель рН либо не меняет своего значения, либо изменяется очень незначительно. Это обусловлено достаточно высокой буферной емкостью бетона, под которой понимается содержание СаО в единице всего объема.

На всех типах конструкций наблюдается временной период (от 2 до 10 лет), когда увеличение концентрации карбонатов не вызывает быстрое изменение показателя рН. Его можно назвать периодом неопределенности, но в то же время зоной устойчивого состояния бетона [4, 5, 7].

В условиях эксплуатации ЖБК вследствие малой концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе процесс накопления карбонатов идет медленно. Проследить это можно, если оценивать зависимость рН – КС с учетом фактора времени. Исследовали конструкции со сроками эксплуатации до 70-ти лет.

По результатам обследования ЖБК различных зданий и сооружений построены регрессионные модели зависимостей  $\sqrt{t}$  – рН (КС) в защитном слое бетона для основных типов ЖБК, эксплуатирующихся в различных условиях.

В качестве примера на рисунках 2, 3 приведены зависимости  $\sqrt{t}$  – рН и  $\sqrt{t}$  – КС для колонн, эксплуатирующихся в атмосферных условиях.

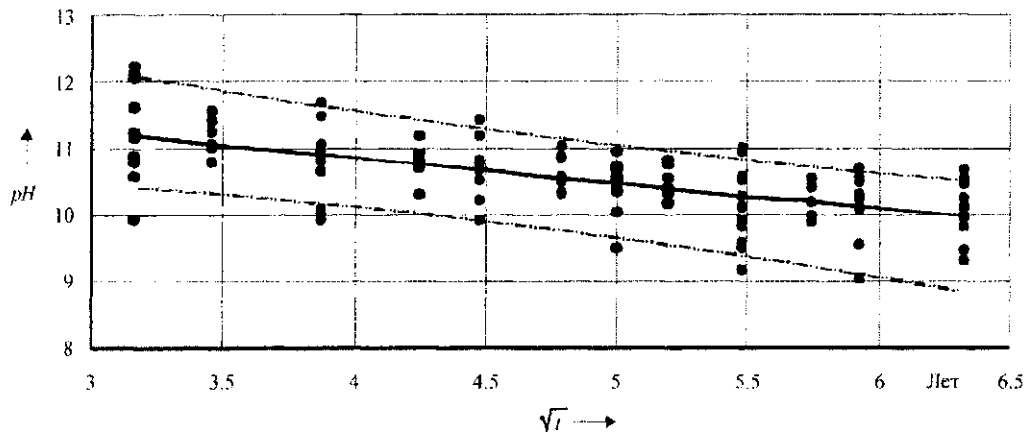


Рис. 2. Зависимость  $\sqrt{t}$  – рН для колонн (атмосферные условия)

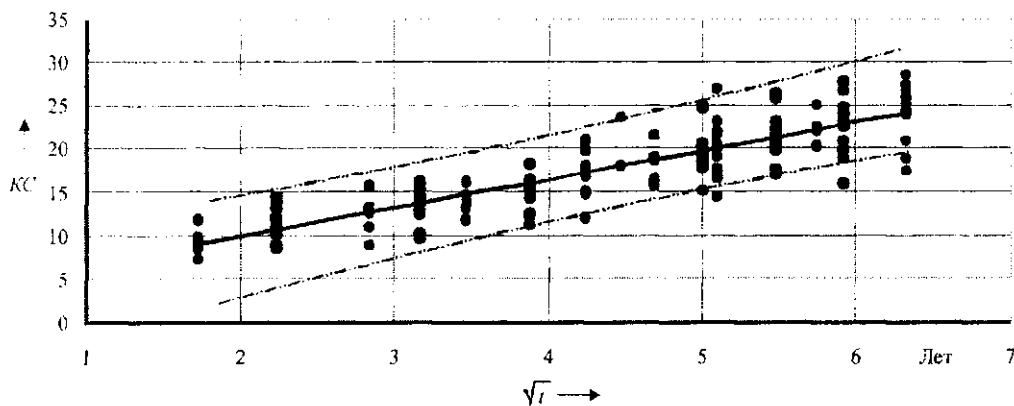


Рис. 3. Зависимость  $\sqrt{t}$  – КС для колонн (атмосферные условия)

Примечание. Пунктирной линией показан 95 % доверительный интервал для средних значений зависимых величин рН (КС).

Полученные регрессионные зависимости показывают, что с увеличением возраста эксплуатации конструкций показатель рН поровой влаги цементного камня линейно снижается, а содержание карбонатов растет, что подтверждает наличие квадратичной параболической зависимости развития карбонизационных процессов в поверхностных слоях бетона.

Для оценки изменения показателей рН и КС построены суммарные зависимости  $\sqrt{t}$  – рН и  $\sqrt{t}$  – КС основных типов ЖБК для различных условий эксплуатации.

В качестве примера на рисунке 4 приведены зависимости  $\sqrt{t}$  – рН и  $\sqrt{t}$  – КС для исследованных типов ЖБК, эксплуатирующихся в атмосферных условиях.

Приведенные зависимости для различных конструкций при одних и тех же условиях эксплуатации незначительно отличаются углами наклона. Это позволило путем суммирования значений для отдельных конструкций получить средние значения изменения во времени показателей рН и КС для различных атмосферных сред.

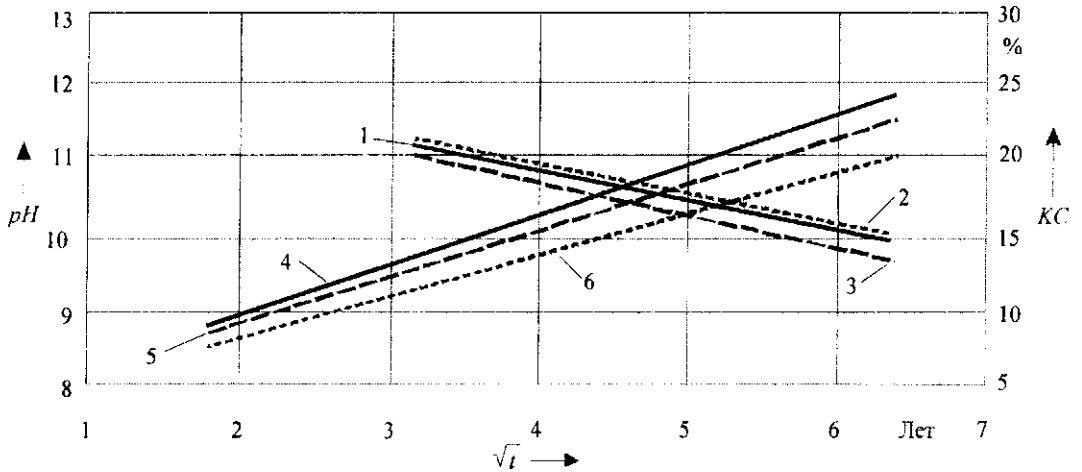


Рис. 4. Зависимости  $\sqrt{t}$  – pH и  $\sqrt{t}$  – КС для атмосферных условий:  
 $\sqrt{t}$  – pH: 1 – колонны; 2 – ригели (прогоны); 3 – плиты ребристые;  
 $\sqrt{t}$  – КС: 4 – колонны; 5 – ригели (прогоны); 6 – плиты ребристые

При обработке полученных зависимостей:  $\sqrt{t}$  – pH и  $\sqrt{t}$  – КС, для реальных железобетонных конструкций, эксплуатируемых длительное время (до 40 лет), методами регрессионного и корреляционного анализов выведены аналитические выражения, позволяющие прогнозировать изменение карбонатной составляющей и щелочности поровой жидкости во времени свеженеизготовленных конструкций для различных условий эксплуатации [14]:

- для атмосферных условий:

$$\text{pH} = 12,33 - 0,39\sqrt{t}, \quad (1)$$

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

- для условий общественных зданий:

$$\text{pH} = 12,10 - 0,28\sqrt{t}, \quad (3)$$

$$\text{КС} = 2,04 + 2,77\sqrt{t}, \% \quad (4)$$

- для условий помещений с/х комплексов:

$$\text{pH} = 12,33 - 0,55\sqrt{t}, \quad (5)$$

$$\text{КС} = 2,18 + 3,52\sqrt{t}, \% \quad (6)$$

Здесь  $t$  – величина прогнозного периода, лет.

На основании зависимостей (1) – (6) получены выражения для прогнозирования изменения показателей pH и КС защитного слоя бетона длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций по полученным на момент обследования значениям показателей щелочности поровой жидкости и карбонатной составляющей для различных условий эксплуатации:

- атмосферных:

$$\text{pH}_{\text{прог}} = \text{pH}_0 - 0,39 (\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_0}), \quad (7)$$

$$\text{КС}_{\text{прог}} = \text{КС}_0 + 3,13 (\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_0}); \quad (8)$$

- общественных зданий:

$$\text{pH}_{\text{прог}} = \text{pH}_0 - 0,28 (\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_0}), \quad (9)$$

$$\text{КС}_{\text{прог}} = \text{КС}_0 + 2,77 (\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_0}); \quad (10)$$

- помещений сельскохозяйственных комплексов:

$$pH_{прог} = pH_o - 0,55 (\sqrt{t_{прог}} - \sqrt{t_o}), \tag{11}$$

$$KC_{прог} = KC_o + 3,52 (\sqrt{t_{прог}} - \sqrt{t_o}). \tag{12}$$

Здесь  $pH_{прог}$  – прогнозируемое значение щелочности поровой жидкости;  $KC_{прог}$  – прогнозируемое значение карбонатной составляющей, %;  $pH_o$  – фактическое значение щелочности поровой жидкости, полученное при обследовании конструкции;  $KC_o$  – фактическое значение карбонатной составляющей, %, полученное при обследовании конструкции;  $t_{прог}$  – величина прогнозного периода с учетом возраста конструкции на момент обследования, лет;  $t_o$  – возраст конструкции на момент обследования, лет.

Применение зависимостей (1) – (12) в совокупности с разработанными «Критериями оценки технического состояния ЖБК» дает возможность прогнозировать изменение во времени технического состояния конструкций.

**Исследование изменения показателей pH и KC по сечению бетона.** Параллельно выполнялись исследования изменения физико-химических характеристик бетона по сечению ЖБК. Примеры распределения показателей pH и KC по сечению колонн, эксплуатируемых в различных атмосферных условиях, приведены на рисунках 5 и 6.

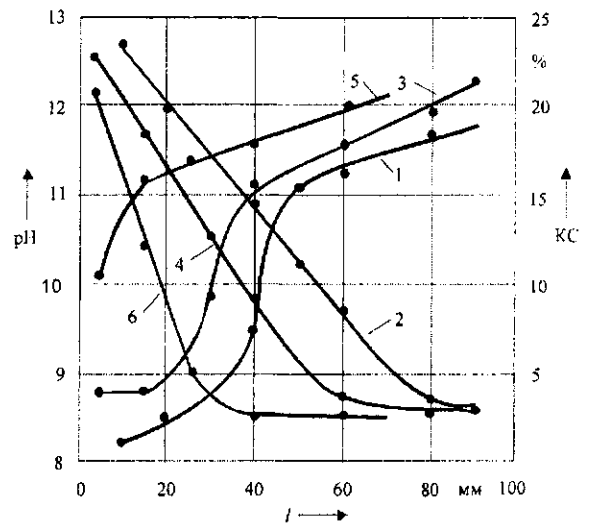
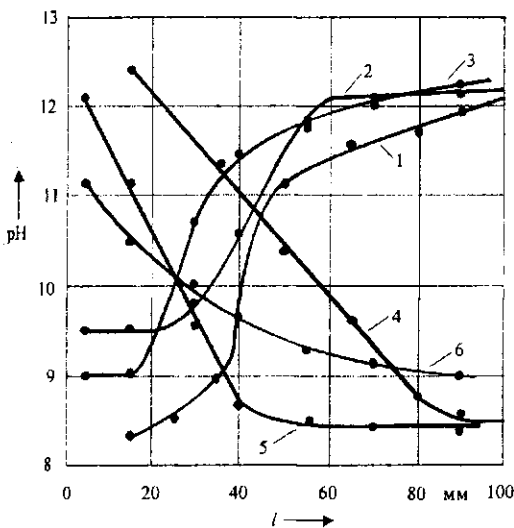


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $l$  – pH и  $l$  – KC для колонн, эксплуатировавшихся одинаковое время (после 40 лет) в различных условиях:  
 1 –  $l$  – pH; 4 –  $l$  – KC – для колонн общественного здания;  
 2 –  $l$  – pH; 5 –  $l$  – KC – для колонн в атмосферных условиях;  
 3 –  $l$  – pH; 6 –  $l$  – KC – для колонн в помещении коровника

Рис. 6. Экспериментальные зависимости  $l$  – pH и  $l$  – KC для колонн, эксплуатировавшихся различные промежутки времени в условиях открытого воздуха:  
 1 –  $l$  – pH; 2 –  $l$  – KC – после 40 лет;  
 3 –  $l$  – pH; 4 –  $l$  – KC – после 30 лет;  
 5 –  $l$  – pH; 6 –  $l$  – KC – после 20 лет

По результатам исследований предложены следующие положения:

- понятие предельной величины карбонизации (ПВК), показывающей предельное содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах при условии, что весь CaO цемента полностью перейдет в  $CaCO_3$ . Предложено определение ПВК как по кривой изменения карбонатной составляющей, так и по известному составу компонентов бетона;
- понятие степени карбонизации – процента гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона;
- методика определения начального содержания цемента в бетоне [15].

Проведенные исследования позволили более объективно оценить развитие карбонизационных процессов в реальных условиях эксплуатации. Их результаты показывают, что в реально эксплуатируемых конструкциях имеет место снижение по сечению конструкций (к поверхности) показателя pH с возрастанием концентрации карбонатов. Скорость процессов зависит от состава бетона, возраста конструкций и, прежде всего, от условий эксплуатации.

Параллельно осуществлялось сравнение толщин карбонизированного бетона, определенных индикаторным методом и pH-метрией, которое показало, что результаты, полученные индикаторным методом, отличаются от результатов pH-метрии до пяти раз (в сторону уменьшения).



Исследования железобетонных конструкций по глубине показали:

- 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 %.

На основании вышеприведенного получены зависимости, увязывающие толщину слоя бетона с рН = 10 (определенную фенолфталеиновой пробой) с толщиной слоя с рН = 11,8 (граничное значение зоны, в которой может развиваться коррозия по термодинамическим расчетам).

Приняв средние значения полученных пределов степени карбонизации, получили следующие зависимости для определения толщины нейтрализованного слоя бетона:

- для атмосферных условий:

$$x_k = 1,60x_{\phi}; \quad (13)$$

- для условий общественных помещений:

$$x_k = 1,25x_{\phi}; \quad (14)$$

- для условий сельскохозяйственных помещений:

$$x_k = 1,85x_{\phi}; \quad (15)$$

где  $x_k$  – толщина карбонизированного слоя с граничным значением рН = 11,8;  $x_{\phi}$  – толщина карбонизированного слоя, определенная индикаторным методом с граничным значением рН = 10.

**Выводы.** На основании результатов многолетних лабораторных и натурных исследований изменения физико-химических свойств бетона при карбонизации бетонных и железобетонных конструкций как в поверхностных слоях, так и по глубине разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах [15], включающий в себя следующие методики:

- оценки состояния защитных свойств по отношению к арматуре бетона защитного слоя, состояния стальной арматуры и технического состояния конструкции в целом;
- прогнозирования технического состояния как новых, так и длительно эксплуатируемых ЖБК;
- оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре по сечению ЖБК, стальной арматуры и технического состояния конструкций в целом;
- оценки состояния защитных свойств бетона по отношению к арматуре ЖБК в полевых условиях.

Предлагаемый комплексный метод является дополнительным неразрушающим методом обследования железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, и позволяет:

*в лабораторных условиях:*

- оценивать состояние защитного слоя по сечению конструкций и стальной арматуры;
- прогнозировать состояние защитных свойств по отношению к арматуре бетона защитного слоя;
- на основании полученных результатов по «Критериям оценки технического состояния железобетонных конструкций» оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБК;

*в полевых условиях:*

- оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре в зоне ее расположения и состояние стальной арматуры.

Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях, дает возможность не только оценивать и прогнозировать их техническое состояние, но и выбирать в зависимости от результатов обследования способы и методы восстановления конструкций. Данный метод реализуется проектными, строительными и эксплуатационными организациями при разработке проектов и реконструкции зданий и сооружений для оценки и прогнозирования во времени технического состояния железобетонных конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

3. Васильев, А.А. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с момента их изготовления / А.А. Васильев // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 30 – 33.
4. Васильев, А.А. Опыт использования рН- и карбометрии для оценки состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А.А. Васильев // *Межведомств. науч.-техн. сб. науч. работ (строительство)*; гл. ред. П.И. Кривошеев. – Киев, 2005. – Т. 2. – С. 110 – 117.
5. 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.
6. Васильев, А.А. Об оценке карбонизации железобетонных конструкций / А.А. Васильев // *Вестн. БелГУТа: Наука и транспорт*. – 2005. – № 1. – С. 37 – 41.
7. Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование основных физико-химических характеристик бетона длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А.А. Васильев // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XII науч.-метод. межвуз. семинара*. – Могилев, 2005. – С. 113 – 119.
8. Кудрявцев, И.А. Исследование карбонизации железобетонных конструкций с длительным сроком эксплуатации / И.А. Кудрявцев, В.П. Богданов // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 97 – 100.
9. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В.И. Бабушкин. – М.: Стройиздат, 1968. – 187 с.
10. Пятницкий, А.К. Количественный анализ / А.К. Пятницкий, А.К. Бабко. – М.: Высш. шк., 1968. – 438 с.
11. Курбатова, И.И. Современные методы химического анализа строительных материалов / И.И. Курбатова. – М.: Стройиздат, 1972. – 161 с.
12. Герасимович, А.И. Математическая статистика: учеб. пособие для инженеров техн. и эконом. специальностей вузов / А.И. Герасимович. – 2-е изд. перераб. и доп. – Минск: Выш. шк., 1983. – 279 с.
13. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2003. – 139 с.
14. 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.
15. Неразрушающие методы оценки и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах: практ. пособие / Т.М. Пецольд [и др.]; под ред. А.А. Васильева. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 146 с.

Поступила 12.05.2008