

УДК 624.011/.014

А. А. Васильев, канд. техн. наук**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ВОЗДУШНЫХ СРЕДАХ**

Приведены результаты изучения методами рН- и карбометрии коррозионного поведения основных типов железобетонных конструкций (ЖБК) в контакте с атмосферой для различных сроков и условий эксплуатации. На их основе разработан комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Предлагаемый метод является новым дополнительным неразрушающим методом обследования длительно эксплуатируемых в различных воздушных средах железобетонных конструкций.

Введение

Основную долю конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых в настоящее время, составляют ЖБК различных типов. В процессе их эксплуатации возникают различного рода повреждения. Значительная часть повреждений обусловлена изменением во времени свойств материалов, снижающим их качественные и эксплуатационные характеристики и долговечность зданий и сооружений в целом. Поскольку большинство ЖБК эксплуатируются в различных атмосферных условиях, одной из основных причин появления и развития их коррозионных повреждений является карбонизация. Развиваясь во времени, она вызывает нейтрализацию бетона, т. е. потерю им защитных свойств по отношению к арматуре, что в соответствующих условиях способствует развитию процессов коррозии стальной арматуры различной интенсивности. Развитие коррозионных процессов в арматуре обусловлено, в первую очередь, пористой структурой бетона и, как следствие, его проницаемостью. И лишь значительная толщина защитного слоя и щелочная среда самого бетона обеспечивают ему наличие защитных свойств по отношению к арматуре. Однако эти два фактора имеют различную динамику во времени. Так, если толщина защитного слоя остается неизменной на протяжении всего срока

эксплуатации конструкций, то химические свойства цементного камня бетона постоянно изменяются, приводя к постепенному снижению щелочности от поверхности в глубь конструкции. Таким образом, процесс коррозионного разрушения бетона конструкции начинается с ее поверхности. В первую очередь, теряет свои эксплуатационные свойства бетон защитного слоя. Изменение его структуры происходит без видимых повреждений, вследствие чего коррозия арматуры начинается внутри бетона. Образующиеся продукты коррозии стали занимают в 2–2,5 раза больший объем, чем слой прородированного металла, и вызывают развитие растягивающих напряжений в бетоне, превышающих его прочность, в результате чего образуются трещины в защитном слое, ориентированные вдоль корродирующих стержней. Образование таких трещин облегчает доступ агрессивных агентов к арматуре и ускоряет ее коррозию. В дальнейшем развитие коррозии арматуры приводит к отслаиванию и разрушению защитного слоя, нарушению сцепления арматуры с бетоном и потере несущей способности конструкции (при практически сохранившемся бетоне в более глубоких слоях) и созданию аварийной ситуации [1, 2].

В настоящее время оценку и прогнозирование карбонизации осуществ-

ляют 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 [1, 2] карбонизация развивается линейно с поверхности в глубь конструкции, при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне. Процесс карбонизации рассматривается как конечный во времени и по глубине.

Многолетние авторские исследования ЖБК по глубине [3–6] полностью опровергают такие представления. Они показывают, что карбонизация бетона продолжается все время эксплуатации конструкций. Она развивается с поверхностных слоев в глубь 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 до нескольких 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 $pH \approx 10$ [7], а в соответствии с исследованиями [8] коррозия арматуры возможна при $pH \leq 11,8$.

Индикаторный метод не позволяет количественно оценивать показатель рН в зоне расположения арматуры, детально судить об его изменении в нейтрализованной зоне и за ее пределами и, как следствие, – о состоянии защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Таким образом, его применение в лабораторных и полевых условиях для оценки карбониза-

ции бетона не дает возможности объективно и достоверно оценивать и прогнозировать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре.

Приведенное выше свидетельство об актуальности изучения процессов карбонизации и создания на основе исследований изменений физико-химических характеристик бетона, происходящих при карбонизации бетона, способов и методов диагностики и прогнозирования технического состояния ЖБК.

Основная часть

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 универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре, а показатель КС (карбонатная составляющая) характеризует процентное содержание карбонатов в бетоне и позволяет оценить их влияние на изменение показателя рН.

Целью исследований явилось изучение распределения показателей рН и КС по сечению конструкций в зависимости от сроков и условий эксплуатации; разработка критериев оценки технического состояния ЖБК, 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; разработка методик оценки и прогнозирования технического состояния ЖБК, эксплуатируемых в различных воздушных средах.

Объектами исследования служили железобетонные конструкции различных типов (колонны, балки (прогоны, фермы), плиты типа ПР), эксплуатиру-

вавшиеся длительные сроки в различных воздушных средах. Исследования проводились как в лабораторных условиях (на 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 [9]. Показатель КС – объемно-газовым методом [10]. Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного про-

цессора Excel и пакета статистического анализа данных Statgraphics [11].

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 физико-химическими параметрами защитного слоя бетона. Для оценки состояния арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, предложена соответствующая балльная система, приведенная в табл. 1.

Табл. 1. Оценка состояния стальной арматуры ЖБК

Степень коррозии арматуры (балл)	Внешний признак 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 каждой степени коррозии) получены области распределения показателей рН и КС с достоверной вероятностью 0,95 для различных степеней коррозии арматуры (рис. 1).

Результаты исследований показывают, что стальная арматура железобетонных конструкций не корродирует при показателе щелочности поровой жидкости $\text{pH} \geq 11,8$. Снижение же показателя рН менее граничного значения ($\text{pH} = 11,8$) вызывает корро-

зию арматуры различной степени интенсивности. Также степень коррозии стали возрастает с увеличением карбонатной составляющей.

Из ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, наибольший интерес представляют конструкции, эксплуатируемые в условиях открытого воздуха и условиях помещений сельскохозяйственного назначения, поскольку их условия эксплуатации значительно отличаются от условий эксплуатации жилых и общественных зданий и сооружений.

Результаты обследования различных типов конструкций с использованием методов рН- и карбометрии и оценкой состояния арматуры позволили на-

значить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБК для условий эксплуатации класса ХС3 [12] (в соответствии с [13]) по физико-химическим показателям цементно-песчаной фракции бетона защитного слоя и степени коррозии арматуры.

Обследование большого числа зданий сельскохозяйственных комплексов показало, что условия эксплуатации в них значительно отличаются от классов, предлагаемых в [13]. Поэтому для оценки тех-

нического состояния конструкций, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений, для [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 табл. 2.

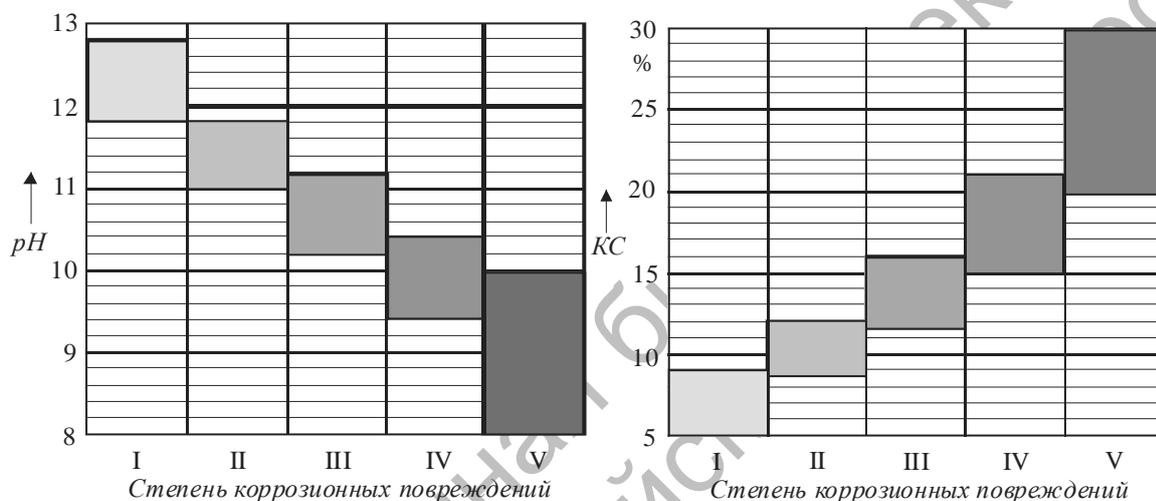


Рис. 1. Взаимосвязь степени коррозии арматуры с показателями рН и КС

Табл. 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
12,5–11,8	6–9	Происходит плавное изменение показателя рН. Его значения приближаются к границе, после которой бетон полностью нейтрализуется и теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре, что вызывает	

Окончание табл. 2

1	2	3	4
		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 рН. 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. Степень II 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. Степень II коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 10 лет. Состояние бетона, арматуры удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК удовлетворительное	II
		Степень III 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. Степень III 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
		Степень IV 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. Степень IV 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. Степень IV коррозии арматуры при сроке эксплуатации конструкции до 10 лет. Состояние бетона, арматуры неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК неудовлетворительное. Степень V 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. Степень V 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 ЖБК.

В зависимости от выявленных дефектов и повреждений в ЖБК необходимо проведение комплекса работ по восстановлению их целостности и несущей способности. Разработанные критерии

оценки технического состояния ЖБК позволяют в зависимости от определенного технического состояния конструкций назначить категории по их восстановлению, которые приведены в табл. 2.

Ориентировочный состав работ по восстановлению ЖБК в соответствии с категорией восстановления в зависимости технического состояния обследованной конструкции приведен в табл. 3.

Табл. 3. Мероприятия по восстановлению конструкций

Категория восстановления	Мероприятие 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)

В каждом конкретном случае состав работ может изменяться (дополняться) в зависимости от результатов детального обследования железобетонных элементов (конструкций).

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.

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 CO_2 воздуха с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, сразу после изготовления, не оказывает заметного влияния на показатель рН, т. к. 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 существенного влияния 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 быстрого изменения показателя рН. Его можно назвать периодом неопределенности, но в то же время зоной устойчивого состояния бетона [4, 5]. В условиях эксплуатации ЖБК, вследствие малой концентрации CO_2 в воздухе, процесс накопления карбонатов идет медленно. Проследить это можно, если оценивать зависимость $pH-KC$ с учетом фактора времени.

Исследовали конструкции со сроками эксплуатации до семидесяти лет. По резуль-

татам обследования ЖБК различных зданий и сооружений построены регрессионные модели зависимостей $\sqrt{t} - pH (KC)$ в защитном слое бетона для основных типов ЖБК, эксплуатирующихся в различных условиях. В качестве примера на рис. 2 и 3 приведены зависимости $\sqrt{t} - pH$ и $\sqrt{t} - KC$ для колонн, эксплуатирующихся в условиях открытого воздуха. 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 во времени карбонизационных процессов в поверхностных слоях бетона.

Для оценки изменения показателей рН и КС построены суммарные зависимости $\sqrt{t} - pH$ и $\sqrt{t} - KC$ основных типов ЖБК для различных условий эксплуатации. В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости $\sqrt{t} - pH$ и $\sqrt{t} - KC$ для исследованных типов ЖБК, эксплуатирующихся в атмосферных условиях.

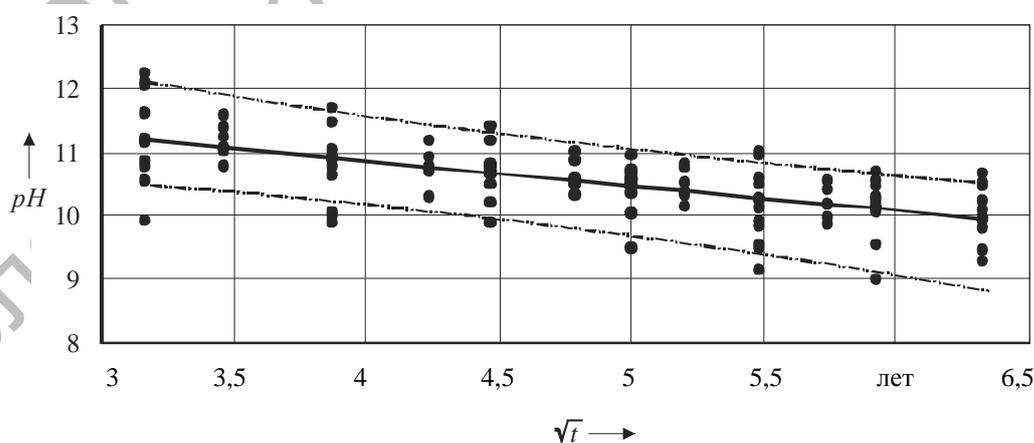


Рис. 2. Зависимость $\sqrt{t} - pH$ для колонн (атмосферные условия)

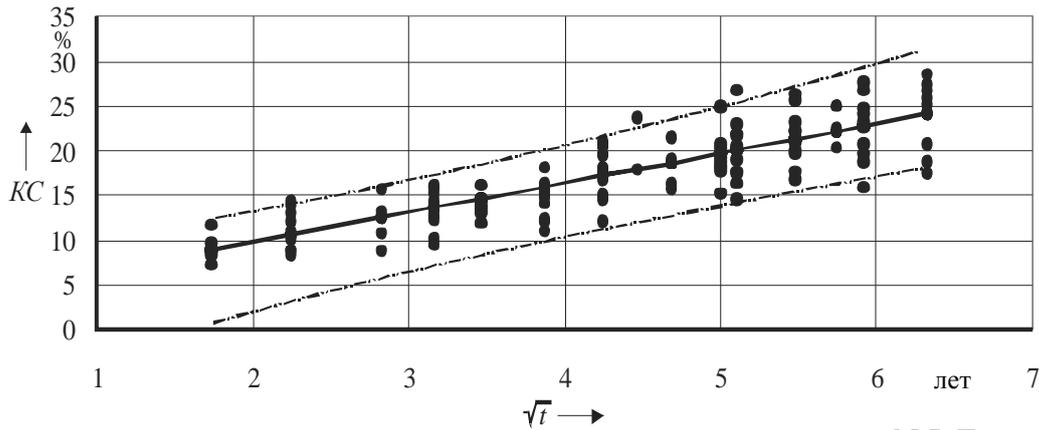


Рис. 3. Зависимость \sqrt{t} – КС для колонн (атмосферные условия)

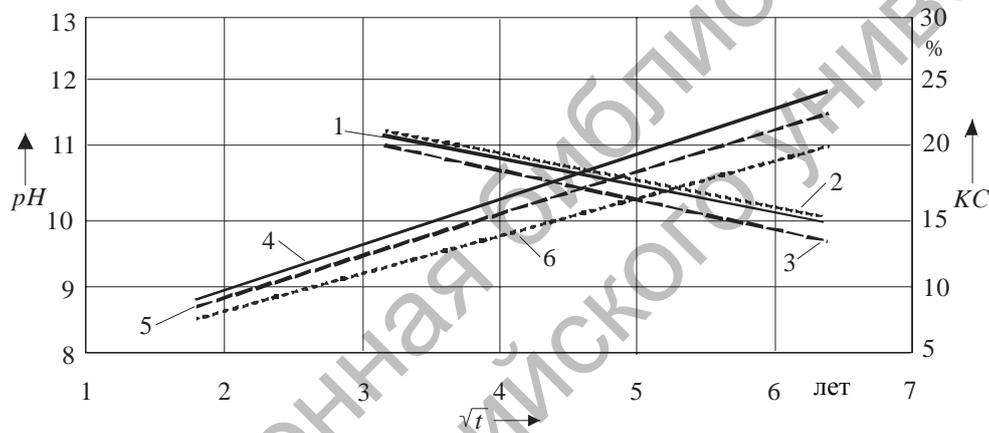


Рис. 4. Зависимости \sqrt{t} – pH и \sqrt{t} – КС для атмосферных условий: \sqrt{t} – pH: 1 – колонны; 2 – ригели (прогоны); 3 – плиты ребристые; \sqrt{t} – КС: 4 – колонны; 5 – ригели (прогоны); 6 – плиты ребристые

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 pH и КС для различных атмосферных сред.

При обработке полученных зависимостей \sqrt{t} – pH и \sqrt{t} – КС для реальных железобетонных конструкций (эксплуатируемых длительные промежутки времени (до 40 лет)) методами регрессионного и корреляционного анализов

выведены аналитические выражения, позволяющие прогнозировать изменение карбонатной составляющей и щелочности поровой жидкости во времени свежизготовленных конструкций для различных условий эксплуатации [14]:

– для атмосферных условий

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

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

– для условий общественных зданий

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

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

– для условий помещений сельскохозяйственных комплексов

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

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

где t – величина прогнозного периода, лет.

На основании зависимостей (1)–(6) получены выражения для прогнозирования изменения показателей рН 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

$$pH_{\text{прог}} = pH_0 - 0,39(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}); \quad (7)$$

$$КС_{\text{прог}} = КС_0 + 3,13(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}); \quad (8)$$

– общественных зданий

$$pH_{\text{прог}} = pH_0 - 0,28(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}); \quad (9)$$

$$КС_{\text{прог}} = КС_0 + 2,77(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}); \quad (10)$$

– помещений сельскохозяйственных комплексов

$$pH_{\text{прог}} = pH_0 - 0,55(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}); \quad (11)$$

$$КС_{\text{прог}} = КС_0 + 3,52(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_3}), \quad (12)$$

где $pH_{\text{прог}}$ – прогнозируемое значение щелочности поровой жидкости; $КС_{\text{прог}}$ – прогнозируемое 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 с учетом возраста конструкции на момент обследования, лет; t_3 – 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.

Параллельно выполнялись исследования изменения физико-химических характеристик бетона по сечению ЖБК. Примеры распределения показателей рН и КС по сечению колонн, эксплуатируемых в различных атмосферных условиях, приведены на рис. 5 и 6.

Данные 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. По результатам исследований предложены:

– понятие предельной величины карбонизации (ПВК), показывающей предельное содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах при условии, что весь СаО цемента полностью перейдет в СаСО₃, определяемой как по кривой изменения карбонатной составляющей, так и по известному составу компонентов бетона;

– понятие степени карбонизации (СК) – процента гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона;

– методика определения начального содержания цемента в бетоне [15].

Параллельно выполнялось сравнение определения толщин карбонизированного бетона индикаторным методом и рН-метрией. Оно показало, что результаты, полученные индикаторным методом, отличаются от результатов рН-метрии до 5 раз (в сторону уменьшения).

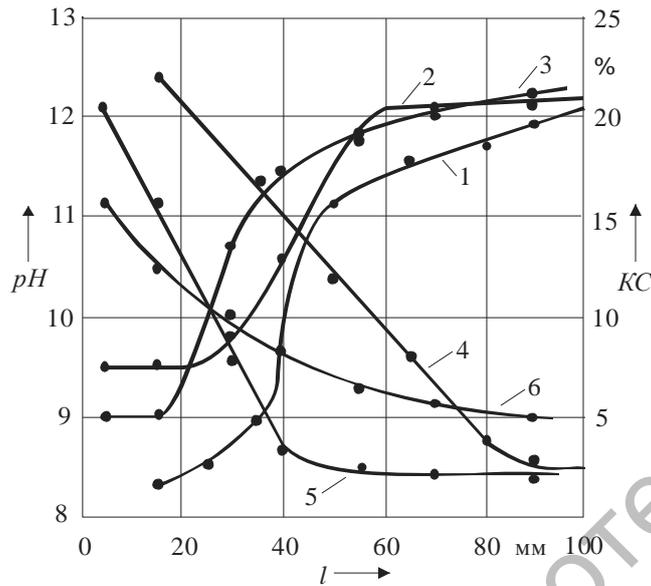


Рис. 5. Экспериментальные зависимости l -рН и l -КС для колонн, эксплуатируемых одинаковое время в различных условиях: 1 - l -рН; 4 - l -КС - для колонны после 40 лет эксплуатации в условиях общественного здания; 2 - l -рН; 5 - l -КС - для колонны после 40 лет эксплуатации в атмосферных условиях; 3 - l -рН; 6 - l -КС - для колонн после 40 лет эксплуатации в помещении коровника

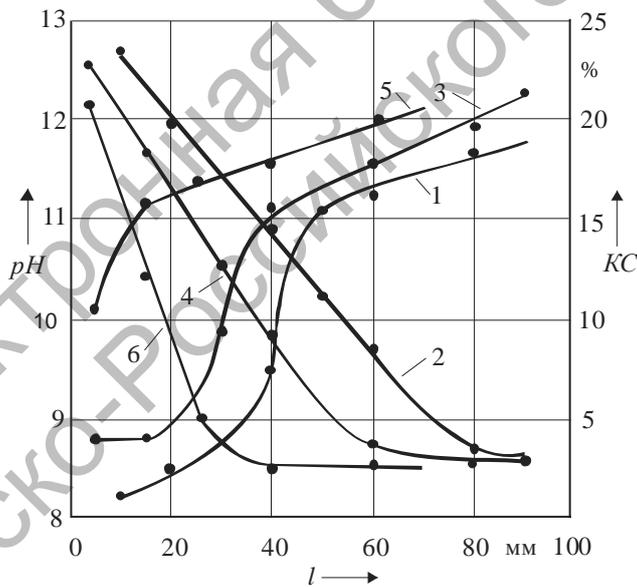


Рис. 6. Экспериментальные зависимости l -рН и l -КС для колонн, эксплуатируемых различные промежутки времени в условиях открытого воздуха: 1 - l -рН; 2 - l -КС - после 40 лет; 3 - l -рН; 4 - l -КС - после 30 лет; 5 - l -рН; 6 - l -КС - после 20 лет

Исследования железобетонных конструкций по глубине показали, что для атмосферных условий степень карбонизации на границе с $pH = 10$ изменяется в преде-

лах 45-55 %, на границе с $pH = 11,8$ - в пределах 12-28 %. Для условий общественных помещений - в пределах 25-40 и 10-20 % соответственно. Для условий

сельскохозяйственных помещений – в пределах 45–85 и 20–50 % соответственно.

На основании вышеприведенного (приняв средние значения полученных пределов степени карбонизации), получены зависимости, увязывающие толщину слоя бетона с $pH = 10$ (определенную фенолфталеиновой пробой) с толщиной слоя с $pH = 11,8$ (граничное значение зоны, в которой может развиваться коррозия по термодинамическим расчетам):

– 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 $pH = 11,8$; x_ϕ – толщина карбонизированного слоя, определенная индикаторным методом с граничным значением $pH = 10$.

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, 16], включающий в себя 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.

Он позволяет:

– в лабораторных условиях:

а) оценивать состояние защитного слоя по сечению конструкций и стальной арматуры;

б) прогнозировать состояние защитных свойств по отношению к арматуре бетона защитного слоя;

в) на основании полученных результатов по «Критериям оценки технического состояния железобетонных конструкций» оценивать и прогнозировать техническое состояние ЖБК;

– в полевых условиях:

а) 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, позволяет не только оценивать и прогнозировать их техническое состояние, но и выбирать, в зависимости от результатов обследования, способы и методы восстановления конструкций. Он реализуется проектными, строительными и эксплуатационными организациями при разработке проектов и реконструкции зданий и сооружений для оценки и прогнозирования во времени технического состояния железобетонных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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).* – 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 // *Вестн. БелГУТа : Наука и транспорт.* – 2005. – № 1. – С. 37–41.
7. **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.
8. **Бабушкин, В. И.** Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В. И. Бабушкин. – М. : Стройиздат, 1968. – 187 с.
9. **Пятницкий, А. К.** Количественный анализ / А. К. Пятницкий, А. К. Бабко. – М. : Высш. шк., 1968. – 438 с.
10. **Курбатова, И. И.** Современные методы химического анализа строительных материалов / И. И. Курбатова. – М. : Стройиздат, 1972. – 161 с.
11. **Герасимович, А. И.** Математическая статистика : учеб. пособие / А. И. Герасимович. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Выш. шк., 1983. – 279 с.
12. **Васильев, А. А.** Критерии оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах / А. А. Васильев // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2007. – Т. 12, № 1. – С. 33–39.
13. **СНБ 5.03.01–02.** Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск : 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 прогнозирования 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.
16. **Васильев, А. А.** Дополнительный способ оценки технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушной среде / А. А. Васильев // *Проблемы современного бетона и железобетона : материалы междунар. симп.* – Минск, 2007. – С. 113–129.

Белорусский государственный университет транспорта
Материал поступил 22.05.2008

A. A. Vasilyev
Complex method of evaluation and forecasting
of technical state of ferroconcrete constructions
exploited in different air environments

In the article we offer the results of investigation by the methods of pH- and carbometry of corrosion behavior of ferroconcrete constructions (FCC) of main types in the contact with atmosphere for different exploitation terms and conditions. On their basis a complex method of evaluation and forecasting of technical state of FCC exploited in different air environment has been developed. The offered method is a new nondestructive method of examination of ferroconcrete constructions exploited for a long term in different air environments.