

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ
СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ПРОМЫШЛЕННОЕ
И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»**

(г. Минск, БНТУ — 24.05.2011)

УДК 624.01/. 04

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БЕТОНА**

ВАСИЛЬЕВ А.А.

Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Современные методы технической диагностики позволяют с достаточной степенью точности оценивать основные параметры, определяющие несущую способность конструкций: прочность бетона на сжатие и степень коррозионных повреждений арматуры. И прочностные характеристики бетона, и состояние арматуры определяются внутренними процессами, происходящими как в бетоне, так и в арматуре, которые в процессе эксплуатации не остаются постоянными и в зависимости от условий эксплуатации и степени агрессивности среды изменяются в различной степени.

Основным видом коррозии бетона железобетонных конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в воздушной среде, является карбонизация. При карбонизации изменяется содержание карбонатной составляющей (КС) в бетоне, по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня, приводящие к деградации бетона и снижению его защитных свойств по отношению к ар-

матуре, способствуя развитию коррозии арматуры с последующим разрушением защитного слоя бетона.

Основным способом оценки состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре во всем мире является индикаторный тест (фенолфталеиновый тест – ФФТ, либо тимолфталеиновый - ТФТ). В РБ в соответствии с п.8.3.17 ТКП 45-1.04-37-2008 (02250) «Обследование строительных конструкций зданий и сооружений. Порядок проведения» состояние бетона по степени карбонизации также определяется фенолфталеиновой пробой.

При использовании ФФТ на скол бетона с помощью капельницы или пипетки наносят 0,1%-ый раствор фенолфталеина в этиловом спирте. При изменении pH от 8,3 до 14 окраска индикатора изменяется от бесцветной до ярко-малиновой. Свежий излом образца бетона в карбонизированной зоне после нанесения на него раствора фенолфталеина имеет серый цвет, а в некарбонизированной зоне приобретает ярко-малиновую окраску. Считается, что бетон в неокрашенной зоне нейтрализован и потерял свои защитные свойства по отношению к арматуре, а в окрашенной – находится в удовлетворительном состоянии. Примерно через минуту после нанесения индикатора измеряют линейкой с точностью до 0,5 мм расстояние от поверхности образца до границы ярко окрашенной зоны в направлении, нормальном к поверхности. Измеренная величина есть глубина карбонизации бетона. Необходимо отметить, что при использовании ФФТ линия, ограничивающая фронт карбонизации получается извилистой, поэтому значения средней глубины карбонизации отличаются от максимальной на двести и более процентов.

На основе определения толщины нейтрализованного слоя бетона фенолфталеиновым тестом выведено основное уравнение карбонизации бетона и построена модель карбонизации. В ее основе лежат представления о том, что карбонизация развивается линейно с поверхности вглубь конструкции, ее скорость определяется эффективным коэффициентом диффузии CO₂, при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне. А процесс карбонизации конечен во времени и в пространстве [1, 2].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние авторские исследования ЖБК как в реальных условиях эксплуатации, так и в лабораторных условиях [3-7] позволили сделать следующие выводы:

– карбонизация не развивается широким фронтом с жесткой границей, делящей бетон на карбонизированный и «здоровый», а продолжается все время эксплуатации конструкций и развивается с поверхностных слоев вглубь бетона конструкций по сложной экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях и достигает 90 %);

– изменение показателя рН по сечению бетона также происходит по сложной зависимости: медленное снижение из глубины в сторону поверхности бетона и затем резкое падение. Показатель щелочности значительный промежуток времени остается постоянным, либо снижается очень незначительно. Этот период длится в течение 2–10 лет, а иногда достигает нескольких десятилетий (при незначительном изменении показателя рН), и его можно отнести к инкубационному периоду. Он зависит от концентрации CO_2 в атмосфере, пористости бетона, его структуры (т. е. В/Ц, характера заполнителей и добавок, вида и расхода вяжущих), условий твердения и, главное, – от условий эксплуатации.

Лабораторные исследования авторами [8] образцов бетона (порошков, полученных из различных длительно эксплуатируемых конструкциях) показывают, что значение границы перехода окраски карбонизированного слоя соответствует показателю рН $\approx 10,3$. Таким образом, по ФФТ бетон нейтрализуется при рН ≈ 10 . Многочисленные исследователи считают, что бетон нейтрализуется и теряет свои защитные свойства при рН = 9. По исследованиям В. И. Бабушкина бетон теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре при рН < 11,8 [9]. Приведенное выше показывает, что значение рН=10 по ФФТ не является граничной величиной и очень условно определяет границу карбонизации и состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре, что подтверждают авторские исследования бетона защитного слоя конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных атмосферных средах, в результате которых достаточно часто в слое бетона, в котором по ФФТ он находится в удовлетворительном состоянии наблюдается коррозия стальной арматуры различной степени интенсивности.

СРАВНЕНИЕ ОЦЕНОК ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА ФФТ И рН-МЕТРИЕЙ

Приведенное выше указывает на необходимость исследования возможности использования ФФТ для оценки защитных свойств бетона по отношению к арматуре и корректности его применения.

В качестве примера оценки защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре ФФТ и рН-метрией на рис. 1 приведены результаты исследования изменения во времени по сечению бетона показателей рН и КС однотипных конструкций – крайних и средних колонн одного ряда коровника, эксплуатировавшегося в течение 35 лет.

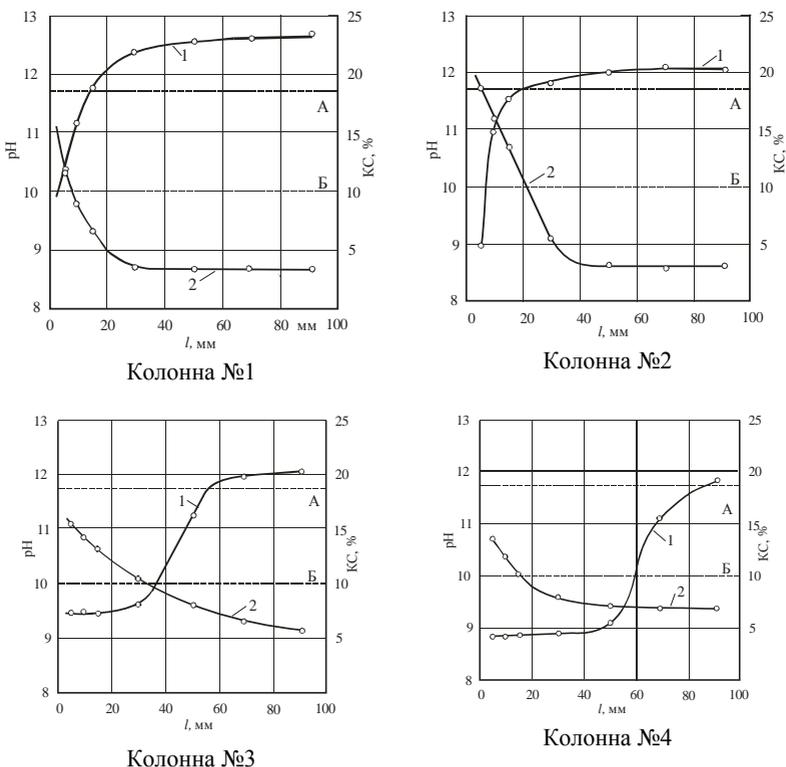


Рис. 1 Экспериментальные зависимости l – рН и l – КС для колонн крайних рядов (колонны № 1 и 2) и колонн средних рядов (колонны № 3 и 4): 1 – l – рН; 2 – l – КС

При анализе полученных графиков по рН-метрии (см. рис. 1, линию «А») видно, что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 1 – ≈ 15, № 2 – ≈ 20, № 3 – ≈ 85, № 4 – ≈ 90 мм. Анализируя графики по ФФТ (см. рис. 1, линию «Б»), получаем, что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 1 – ≈ 3, № 2 – ≈ 8, № 3 – ≈ 40, колонны № 4 – ≈ 60 мм. Приведенные кривые показывают, что разница в определении толщины нейтрализованного бетона составляет от 150 % (колонна №4) до 500 % (колонна №1). Аналогичные результаты наблюдаются при исследовании бетона любых типов ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных атмосферных условиях. Они показывают, что любые индикаторные методы (не только ФФТ) не позволяют объективно оценивать степень карбонизации бетона, 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 стальной арматуре. Индикаторные методы являются искусственными, их нельзя использовать для оценки и прогнозирования карбонизации бетона и необходимо исключить из нормативных документов. Для оценки степени карбонизации бетона и состояния его защитных свойств по отношению к стальной арматуре, требуется разработать методики, основанные на результатах исследования изменения физико-химических свойств бетона во времени и по сечению реальных ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы явилась разработка метода оценки технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в воздушных средах с учетом изменения защитных свойств бетона по отношению к арматуре в процессе карбонизации бетона. В основу исследований положено использование методов рН- и карбометрии, поскольку показатель рН 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 по-

казатель КС характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах и его влияние на изменение показателя рН.

Объектами исследования служили ЖБК различных типов, эксплуатировавшиеся длительные сроки в различных воздушных средах. Исследования проводились в лабораторных условиях на образцах, отобранных из эксплуатируемых конструкций. Для анализа отбирались образцы бетона в зоне расположения арматуры, а также выбуриванием до глубины 100 мм. Показатели рН и КС определялись по методике [10]. Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

При обследовании ЖБК определяли физико-химические характеристики бетона защитного слоя (показатели рН и КС) в зоне расположения арматуры, а также визуально, с помощью измерительных инструментов – состояние арматуры.

Для оценки состояния арматуры использовалась предложенная автором балльная система оценки состояния стальной арматуры в зависимости от степени коррозионных повреждений (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 %)

На основе результатов обследования ЖБК, эксплуатировавшихся длительные сроки в различных атмосферных условиях выявлена зависимость коррозионного состояния арматуры от состояния защитного слоя бетона (показателей рН и КС). Результаты анализов выборок для каждой степени коррозии арматуры представлены в таблице 2.

Оценка технического состояния конструкций производилась в зависимости от условий эксплуатации, которые были разделены на следующие категории: атмосферные условия, условия общественных зданий (в том числе цеха с неагрессивной средой), условия помещений сельскохозяйственного назначения.

Таблица 2 – Взаимосвязь степени коррозии арматуры с показателями рН и КС

Степень коррозии арматуры	рН		КС, %	
	Верхняя доверительная граница с вероятностью 0,95	Нижняя доверительная граница с вероятностью 0,95	Верхняя доверительная граница с вероятностью 0,95	Нижняя доверительная граница с вероятностью 0,95
I	12,62	11,77	11,12	5,88
II	11,82	10,97	17,07	8,94
III	11,22	10,22	19,94	11,04
IV	10,44	9,39	24,11	14,08
V	9,59	8,07	28,36	17,90

Результаты обследования различных типов ЖБК с использованием методов рН- и карбометрии и оценкой состояния арматуры позволили назначить количественные критерии качественной оценки технического состояния ЖБК по физико-химическим показателям цементно-песчаной фракции бетона рН и КС и степени коррозии арматуры (таблица 3).

Предлагаемые критерии оценки технического состояния ЖБК разработаны только для конструкций из тяжелого бетона, обеспечивающего пассивное состояние стальной арматуры, начиная с момента изготовления конструкций. Они позволяют оценивать техническое состояние ЖБК с учетом коррозионных процессов в бетоне и арматуре на момент обследования.

В зависимости от выявленного технического состояния ЖБК необходимо принятие комплекса работ по их восстановлению. Разработанные критерии оценки технического состояния ЖБК позволяют назначить категории по их восстановлению (таблица 3) и в соответствии с ними разработать мероприятия по восстановлению целостности и несущей способности ЖБК. Ориентировочный состав работ по восстановлению конструкций в соответствии с кате-

горией восстановления, в зависимости от технического состояния обследованной конструкции, приведен в таблице 4. В каждом конкретном случае состав работ может изменяться в зависимости от результатов детального обследования железобетонных элементов (конструкций).

Таблица 3 – Критерии оценки технического состояния ЖБК по физико-химическим показателям бетона в зоне расположения арматуры

рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры. Техническое состояние железобетонной конструкции (в соответствии с ТКП 45-1.04-208-2010)	Категория восстановления
12,7 – 11,8	5–9	Происходит плавное снижение показателя рН, свидетельствующее о нейтрализации бетона. Показатель рН приближается к границе, после которой бетон полностью нейтрализуется и теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре, что вызывает возможность развития ее коррозии в условиях переменной влажности. Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное	I
11,8 – 11,3	9–16	Происходит резкое снижение показателя рН, свидетельствующее о потере бетоном защитных свойств по отношению к арматуре. I-я степень коррозии арматуры. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное	II
11,3 – 10,8	12–18	Развитие деградационных процессов в бетоне. II-я степень коррозии арматуры при рН=11,0÷11,3. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное	II
		III-я степень коррозии арматуры при рН=10,8÷11,0. Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное	III

Продолжение табл. 3

рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры. Техническое состояние железобетонной конструкции (в соответствии с ТКП 45-1.04-208-2010)	Категория вос- станов- ления
10,8 – 10,3	14– 22	Образование волосяных трещин в местах расположе- ния рабочей и конструктивной арматуры. III-я степень коррозии арматуры при рН=10,5÷10,8. Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетвори- тельное. Техническое состояние ЖБК – не вполне удовлетво- рительное	III
		Образование трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. Раскрытие трещин и отслаивание защитного слоя бетона в местах его не- достаточной толщины. IV-я степень коррозии арматуры при рН=10,3÷10,5. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворитель- ное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное	IV
10,3 – 9,5	17– 28	Деградация бетона повышенной интенсивности. Рас- крытие трещин в местах расположения рабочей и кон- структивной арматуры. Отслаивание и разрушение за- щитного слоя бетона. IV-я степень коррозии арматуры при рН=10,3÷9,8. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное	V
		V-я степень коррозии арматуры при рН=9,8÷9,5. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное	V
<9,5	20– 30	Полная деградация бетона. Потеря сцепления цемент- ного камня с заполнителем. Разрушение защитного слоя бетона по всей площади. V-я степень коррозии арматуры. Состояние бетона и арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – предаварийное	VI
<10	2–9	Нарушен рецептурный состав (недостаток вяжущего и избыток заполнителей). Техническое состояние ЖБК оценивается по резуль- татам детального обследования	–

Таблица 4 – Мероприятия по восстановлению конструкций

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

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 конструк-

ций. Их использование при оценке защитных свойств бетона по отношению к арматуре является дополнительным методом оценки технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах.

Многолетние исследования бетона методами рН- и карбометрии реально эксплуатирующихся конструкций показывают, что развитие карбонизации, вызывающей изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, в первую очередь зависит от условий эксплуатации. Чем они жестче, тем быстрее карбонизируется бетон, создавая возможность развития коррозии арматуры, либо повышая интенсивность уже имеющейся. Так сравнивая состояние конструкций, эксплуатирующихся в условиях жилых зданий и сельскохозяйственных (с.-х.) помещений получаем, что в условиях жилых зданий карбонизация развивается значительно медленнее, бетон теряет свои защитные свойства через десятилетия. И даже при их полной потере коррозия арматуры в жилых помещениях практически не развивается, поскольку в сухих условиях она тормозится высоким омическим сопротивлением бетона. В с.-х. помещениях, наоборот, уже через несколько лет бетон полностью теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре, не только создавая условия для коррозии арматуры, но и вызывая ее различные степени интенсивности. Так, например, авторские исследования плит покрытия в с.-х. помещениях показывают, что их средний срок службы до возникновения интенсивной пластинчатой коррозии рабочих стержней, и, как следствие, значительной потери несущей способности плит, составляет в среднем 8 лет. С другой стороны, при эксплуатации конструкций, в общем, в одних и тех же условиях, состояние бетона и его защитных свойств разительно отличаются. Так, в соответствии с данными рис. 1, в средней части коровника, характеризующейся повышенными влажностью и содержанием углекислого газа, за длительный период эксплуатации карбонизация колонн выше, что значительно снизило их долговечность. В жилых зданиях за десятки лет эксплуатации бетон плит перекрытий в помещениях ванных полностью теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре, создавая возможность развития коррозионных процессов в арматуре различной степени интенсивности, в помещениях кухонь – значительно снижает их, а в спальнях помещений сохраняет защитные свойства по отношению

к арматуре и, соответственно, она находится в пассивном состоянии.

При выполнении реконструкций зданий и сооружений часто конструкции оголяются (например, плиты покрытия) и за этот непродолжительный период развиваются интенсивные коррозионные процессы в арматуре, значительно снижая долговечность плит, хотя по результатам обследования они находились в удовлетворительном состоянии. К этому приводит неучет состояния защитных свойств бетона и лавинообразный характер развития коррозионных процессов в арматуре. Добавляется значительное количество работ, которые не были учтены при разработке ПСД, что ведет к увеличению сроков восстановления конструкций и значительному удорожанию работ.

Особое внимание требует к себе возобновление строительства после длительных сроков нахождения объектов под открытым небом. В таких условиях помимо карбонизации ЖБК подвергаются интенсивному увлажнению и морозной деструкции, что приводит к ускоренному снижению защитных свойств бетона по отношению к арматуре.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕТОНА

На сегодняшний день, несмотря на значительное количество существующих в мире методов технической диагностики только физико-химический анализ бетона позволяет оценивать защитные свойства бетона по отношению к арматуре, как в зоне расположения арматуры, так и в любой точке сечения бетона и по ним – техническое состояние ЖБК либо их участков.

Выполнение физико-химического анализа бетона в период обследования конструкций позволило бы значительно более объективно оценить техническое состояние ЖБК и сразу выбирать рациональный и оптимальный комплекс работ по их восстановлению с учетом их необходимого срока службы.

Физико-химический анализ бетона должен выполняться при: возобновлении строительства объектов после длительных сроков отсутствия работ; детальном обследовании ЖБК, эксплуатирующихся в атмосферных условиях; любом виде обследования при

наличии сомнений в состоянии конструкций; анализе причин коррозии арматуры при отсутствии явных признаков агрессивной среды; расследовании причин обрушений ЖБК. Однако, с учетом его значительной стоимости, необходимости использования специализированного оборудования, при выполнении физико-химического анализа необходимо тщательно подходить к выбору участков отбора образцов и обоснованно принимать их количество. А с учетом необходимости наличия специалистов для грамотной трактовки полученных результатов, на сегодняшний день физико-химический анализ бетона необходимо выполнять в специализированных лабораториях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие методы оценки карбонизации бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре, основанные на индикаторных тестах, несмотря на их постоянное усовершенствование, не позволяют объективно оценивать и прогнозировать процессы карбонизации, и, как следствие, техническое состояние ЖБК и их долговечность.

Предлагаемый метод, заключающийся в отборе образцов бетона в зоне расположения арматуры, определении показателей рН и КС и сравнении их с граничными показателями по назначенным «Критериям оценки технического состояния ЖБК», позволяет оценивать техническое состояние ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом происходящих в защитном слое бетона физико-химических процессов. Он является дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБК. Его применение даст возможность значительно повысить объективность оценки технического состояния ЖБК и эффективность выбора мероприятий по восстановлению 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, Ф.М. Иванов, С.Модры, П.Шисль // Совм. Изд. СССР – ЧССР – ФРГ. – 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. Исследование механизма и кинетики карбонизации железобетонных конструкций / А.А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2006. – № 1 (4). – С. 52–57.
5. 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.
6. Васильев, А.А. Оценка существующей модели карбонизации / А.А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.
7. Васильев, А.А. Совершенствование методов оценки коррозионного износа железобетонных конструкций / А.А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сборник научных статей. – Гродно, 2010. – С. 300-305.
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. 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; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 146 с.