

УДК 624.01/04

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА

Произведена оценка определения толщины карбонизированного бетона фенолфталеиновым тестом (ФФТ) и методом рН-метрии. Показано, что использование ФФТ не позволяет оценивать толщину нейтрализованного бетона и защитные свойства бетона по отношению к арматуре. На основе исследования изменения физико-химических характеристик бетона защитного слоя при карбонизации железобетонных конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах, назначены критерии оценки технического состояния ЖБК. Показана необходимость использования физико-химического анализа бетона для оценки технического состояния ЖБК при обследовании зданий и сооружений.

Введение. В настоящее время ЖБК являются основным видом несущих конструкций. Поэтому их техническое состояние и определяет в первую очередь долговечность зданий и сооружений.

При обследовании ЖБК их техническое состояние оценивается на основе выявленных дефектов и повреждений, а также расчета фактической несущей способности. Современные методы технической диагностики позволяют с достаточной степенью точности оценивать основные параметры, характеризующие 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 зависимости от условий эксплуатации и степени агрессивности среды постоянно изменяются.

Основным видом коррозии бетона ЖБК, эксплуатирующихся в воздушной среде, является карбонизация. При карбонизации изменяется содержание карбонатной составляющей (КС), по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня, приводящие к деградации бетона и снижению его защитных свойств по отношению к арматуре, способствуя развитию коррозии арматуры с последующим разрушением защитного слоя бетона. Дальнейшее развитие этих процессов приводит к потере конструкцией несущей способности и возникновению аварийной ситуации.

Оценка состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре во всем мире основана на выполнении индикаторного теста (фенолфталеинового либо тимолфталеинового – ТФТ).

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 определяется фенолфталеиновой пробой либо другими

методами. Поскольку о других методах ничего не сказано, основным способом оценки и прогнозирования состояния бетона и его влияния на стальную арматуру остается ФФТ. При его использовании на скол бетона наносится 0,1 %-ный спиртовой раствор фенолфталеина. Считается, что бетон в неокрашенной зоне нейтрализован и потерял свои защитные свойства по отношению к арматуре, а в окрашенной – находится в удовлетворительном состоянии. В бетонах с равномерной структурой пор граница яркоокрашенной зоны расположена обычно параллельно наружной поверхности. В бетонах с неравномерной структурой пор граница карбонизации извилистая. В этом случае измеряется максимальная и средняя глубины карбонизации бетона.

Сама по себе карбонизация не вызывает коррозии стальной арматуры, однако, развиваясь во времени, она изменяет щелочность бетона, измеряемую показателем рН – водородным показателем водной вытяжки цементного камня. Лабораторные исследования авторами [1] образцов бетона (порошков, полученных из различных длительно эксплуатируемых конструкций) 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 [2]. Таким образом, значение рН ≈ 10 по ФФТ не является граничной величиной и очень условно определяет границу карбонизации и состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре.

Экспериментальные результаты. Многолетние авторские исследования бетона защитного слоя конструкций, эксплуатирующихся длительные сроки в различных атмосферных средах, показывают, что достаточно часто в слое бетона, в ко-

тором по ФФТ он находится в удовлетворительном состоянии, наблюдается коррозия стальной арматуры различной степени интенсивности.

Также необходимо отметить, что при оценке толщины карбонизированного слоя в полевых условиях с учетом извилистости линии, определяющей границу карбонизации, погрешность оценки достигает двухсот и более процентов.

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

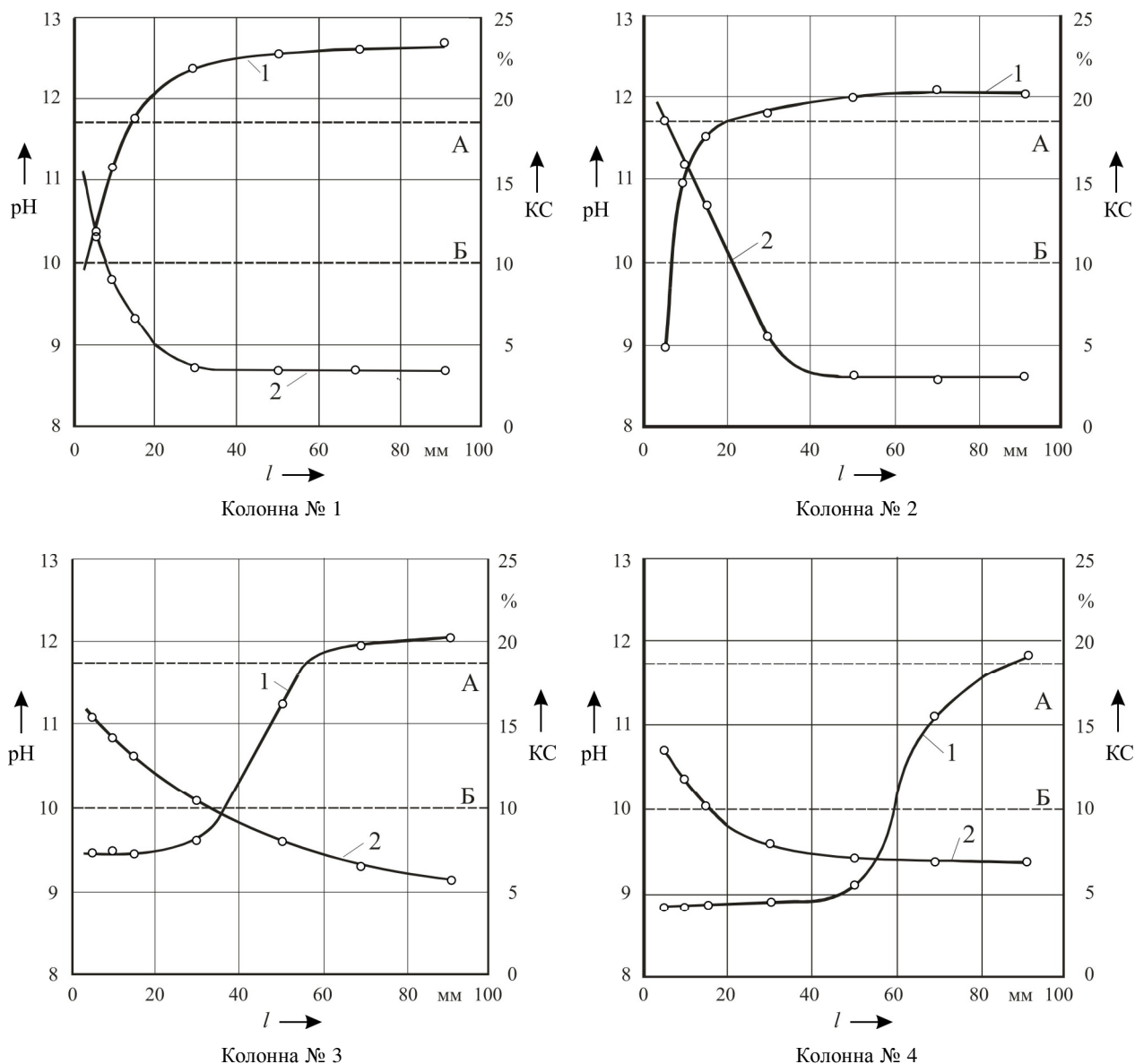


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости l – рН и l – КС для колонн крайних (колонны № 1 и 2) и средних (колонны № 3 и 4) рядов, где А – граничное значение рН = 11,8; Б – граничное значение рН = 10,0; 1 – l – рН; 2 – l – КС

При анализе полученных графиков по рН-метрии (см. рисунок 1, линия А) видно, что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 1 – ≈ 15 , № 2 – ≈ 20 , № 3 – ≈ 85 , № 4 – ≈ 90 мм. Анализируя графики по ФФТ (см. рисунок 1, линия Б), получаем, что бетон колонн потерял защитные свойства на глубину: № 1 – ≈ 3 , № 2 – ≈ 8 , № 3 –

≈ 40 , № 4 – ≈ 60 мм. Приведенные кривые показывают, что разница в определении толщины нейтрализованного бетона составляет от 150 % (колонна № 4) до 500 % (колонна № 1).

На основе определения толщины нейтрализованного слоя бетона фенолфталеиновым тестом выведено основное уравнение карбонизации бето-

на и построена модель карбонизации. В ее основе лежат представления о том, что карбонизация развивается линейно с поверхности в глубь конструкции, ее скорость определяется эффективным коэффициентом диффузии CO_2 , при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне. А процесс карбонизации конечен во времени и в пространстве [3, 4].

Многолетние авторские исследования ЖБК как в реальных условиях эксплуатации, так и в лабораторных условиях [5–9] 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 в глубь 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.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что общепринятая модель карбонизации, основанная на использовании ФФТ, не подтверждается изучением развития карбонизации по сечению реальных конструкций с различными сроками эксплуатации.

Индикаторные методы не позволяют количественно оценивать показатель рН в зоне расположения арматуры, детально судить о его изменении в нейтрализованной зоне и за ее пределами и, как следствие, – о состоянии защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Таким образом, их применение для оценки карбонизации бетона не дает возможности достоверно оценивать состояние защитных свойств бетона по отношению к арматуре, а поскольку существующие методики оценки и прогнозирования карбонизации бетона основаны

на них, то, несмотря на их постоянное совершенствование, применение индикаторных методов не позволяет объективно оценивать и прогнозировать процессы карбонизации и, как следствие, техническое состояние ЖБК и их долговечность.

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 необходимо разработать методики, основанные на результатах исследования изменения физико-химических свойств бетона во времени по сечению реальных ЖБК, эксплуатирующихся длительные сроки в различных воздушных средах.

Цель работы. Целью данной работы явилась разработка критериев оценки технического состояния ЖБК, эксплуатируемых в различных воздушных средах, с учетом процессов 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 универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре, а показатель 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. Показатели рН и КС определялись по методике [8]. 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) (таблица 2). В соответствии с полученными данными, стальная арматура ЖБК не корродирует при щелочности поровой жидкости рН выше 11,8. Сни-

жение же рН менее граничного значения вызывает коррозию арматуры различной степени интенсивности. Если сопоставить величину карбонатной составляющей с состоянием стальной арматуры, то здесь также можно отметить явно выраженную закономерность: с ростом количества связанного углекислого газа степень коррозии стальной арматуры возрастает.

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

Техническое состояние конструкций оценивалось 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. 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).

Таблица 3 – Критерии оценки технического состояния ЖБК

рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры. Техническое состояние железобетонной конструкции (в соответствии с СНБ 1.04.01-04)
12,7–11,8	5–9	Происходит плавное снижение показателя рН, свидетельствующее о нейтрализации бетона и падении его защитных свойств по отношению к арматуре. Показатель рН приближается к границе, после которой бетон полностью нейтрализуется и теряет свои защитные свойства по отношению к арматуре, что вызывает возможность развития коррозии в условиях переменной влажности. Бетон сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура находится в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное
11,8–11,3	9–16	Происходит резкое снижение показателя рН, свидетельствующее о потере бетоном защитных свойств по отношению к арматуре. 2-я степень коррозии арматуры. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное
11,3–10,8	12–18	Развитие деградационных процессов в бетоне. 2-я степень коррозии арматуры при рН = 11,0 ... 11,3. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – удовлетворительное
		3-я степень коррозии арматуры при рН = 10,8 ... 11,0. Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное
10,8–10,3	14–22	Образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. 3-я степень коррозии арматуры при рН = 10,5 ... 10,8. Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное
		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. 4-я степень коррозии арматуры при рН = 10,3 ... 10,5. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное

рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры.
		Техническое состояние железобетонной конструкции (в соответствии с СНБ 1.04.01-04)
10,3–9,5	17–28	Деградация бетона повышенной интенсивности. Раскрытие трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона. 4-я степень коррозии арматуры при рН = 10,3 ... 9,8. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное
		5-я степень коррозии арматуры при рН = 9,8 ... 9,5. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – неудовлетворительное
<9,5	20–30	Полная деградация бетона. Потеря сцепления цементного камня с заполнителем. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона. 5-я степень коррозии арматуры. Состояние бетона и арматуры – неудовлетворительное. Техническое состояние ЖБК – предаварийное
<10	2–9	Нарушен рецептурный состав (недостаток вяжущего и избыток заполнителей). Техническое состояние конструкций оценивается по результатам детального обследования

Предлагаемые критерии оценки технического состояния ЖБК разработаны только для конструкций из тяжелого бетона, обеспечивающего пассивное состояние стальной арматуры, начиная с момента изготовления конструкций, в которых применена ненапрягаемая арматура. При применении в конструкции напрягаемой арматуры необходимо при оценке технического состояния конструкции принимать их на одну позицию в сторону увеличения (ухудшения) технического состояния.

Приведенные критерии позволяют оценивать техническое состояние ЖБК с учетом карбонизационных процессов в бетоне на момент обследования. Их использование является дополнительным методом оценки технического состояния ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных средах.

Многолетние исследования бетона методами рН- и карбометрии реально эксплуатирующихся конструкций [7] 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 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 сельскохозяйственных 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. Автор-

ские исследования плит покрытия в сельскохозяйственных 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 рисунка 1, в средней части коровника, характеризующейся повышенными влажностью и содержанием углекислого газа, за длительный период эксплуатации карбонизация колонн выше, что значительно снизило их долговечность. Сравнение развития карбонизации по высоте конструкций показывает, что в уровне пола, в зоне повышенной влажности и значительно более высокого содержания углекислого газа, она существенно выше и развивается более интенсивно, чем в уровне человеческого роста. 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 помещениях – сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре и, соответственно, она находится в пассивном состоянии.

Подавляющее большинство обследующих организаций оценивают техническое состояние ЖБК по состоянию арматуры, т. е. состояние бетона и его защитных свойств оценивается только при явном развитии коррозии арматуры. Если бетон сохраняет свои защитные свойства по отношению к арматуре или уже потерял их, но коррозия арматуры еще не наступила, визуально оценить состояние бетона невозможно.

Таким образом, только физико-химический анализ бетона позволяет оценивать состояние от-

дельных ЖБК и даже их участков на основе оценки защитных свойств бетона по отношению к арматуре.

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.

Физико-химический анализ бетона в период обследования конструкций позволил 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 консервации; 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 следует тщательно подходить к выбору участков отбора образцов и обоснованно принимать их количество. В связи с отсутствием во многих случаях квалифицированных специалистов для грамотной трактовки полученных результатов в настоящее время физико-химический анализ необходимо выполнять в специализированных лабораториях.

Выводы. Существующий метод оценки карбонизации бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре, основанный на индикаторном тесте, не подтверждается лабораторными исследо-

ваниями реально эксплуатируемых ЖБК. Предлагаемый метод, заключающийся в отборе образцов бетона в зоне расположения арматуры, определении показателей pH и КС и сравнении их с граничными показателями по назначенным «Критериям оценки технического состояния ЖБК», позволяющий оценивать техническое состояние ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, с учетом происходящих в защитном слое бетона физико-химических процессов, является дополнительным неразрушающим методом обследования ЖБК. Его применение даст возможность значительно повысить объективность оценки технического состояния ЖБК и эффективность выбора мероприятий по восстановлению конструкций.

Список литературы

- 1 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.
- 2 Бабушкин, В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В. И. Бабушкин. – М. : Стройиздат, 1968. – 187 с.
- 3 Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.
- 4 Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. – М. : Стройиздат, 1990 – 320 с. (совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ).
- 5 Васильев, А. А. Опыт использования pH- и карбометрии для оценки состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // *Научно-технические проблемы современного железобетона : материалы Всеукраинской науч.-техн. конф. / редкол.: П. И. Кривошеев [и др.]*. – Сумы, 2005. – Т. 2. – С. 110–117.
- 6 Васильев, А. А. Исследование механизма и кинетики карбонизации железобетонных конструкций / А. А. Васильев // *Строительная наука и техника*. – 2006. – № 1 (4). – С. 52–57.
- 7 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в различных воздушных средах, на основе методов pH- и карбометрии / А. А. Васильев // *Строительная наука и техника*. – 2006. – № 4 (7). – С. 81–88.
- 8 **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. у-нт трансп. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 146 с.
- 9 Васильев, А. А. Оценка существующей модели карбонизации / А. А. Васильев // *Строительная наука и техника*. – 2009. – № 1(22). – С. 54–58.

Получено 10.04.2010

A. A. Vasilyev. Estimation of reinforced concrete construction technical state on the basis of physical chemical analysis of the protective cover concrete.

It was made the evaluation of the carbonated layer thickness by phenolphthalein test (FFT) and by pH-metry method. It is shown that the use of FFT doesn't allow to estimate the neutralized concrete thickness and concrete protective properties in relation to reinforcement. On the basis of investigation of physical chemical characteristics change of protective cover concrete under carbonation of reinforced concrete constructions exploited for a long time in different air environments, there were fixed the criteria of reinforced concrete technical state evaluation. It is shown the necessity of usage of concrete physical chemical analysis for reinforced concrete constructions technical state evaluation at buildings and constructions examination.