

## Список литературы

- 1 Мелер, А. Постройки и оборудование для содержания крупного рогатого скота / А. Мелер, С. Хейниг; пер. с нем. Е.А. Девша, В.В. Афанасьева. – М.: Колос, 1974. – 560 с.
- 2 Долговечность железобетона в агрессивных средах // Совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ / С. Н. Алексеев [и др.] – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
- 3 Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1978. – 205 с.
- 4 Кудрявцев, И.А. Исследование карбонизации железобетонной конструкции с длительным сроком эксплуатации / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – Т. 5. № 3. – С. 97–100.
- 5 Бабушкин, В.И. Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – 4-е изд. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
- 6 Кудрявцев, И.А. Исследование равномерности глубины залегания карбонизированного слоя по глубине в балке пролетного строения / И.А.Кудрявцев, В.П. Богданов // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли: материалы VII междунар. науч.-практ. семинара. – Минск:Стринко, 2001. – С. 227–229.
- 7 Васильев, А.А. Опыт использования рН- и карбометрии при определении состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XI междунар. науч.-метод. межвуз. семинара – Брест, 2004. – Ч. I. – С. 228–232

- 8 Васильев, А.А. Об оценке карбонизации железобетонных конструкций по зависимости распределения карбонатной составляющей от глубины бетона / А.А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2005. – № 1. – С. 37–41.
- 9 Васильев, А.А. Опыт использования рН- и карбометрии для оценки состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А.А. Васильев // Научно-технические проблемы современного железобетона: материалы Всеукраинской науч.-техн. конф. – Сумы, 2005. – Т. 2. – С. 110–117.
- 10 Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций на основе методов рН- и карбометрии / А.А. Васильев, В.П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т.11, №1. – С. 110–116.
- 11 Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: автореф. дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук: 05.23.05. / В.В. Бабицкий. – Минск, 2005. – 48 с.
- 12 Бабицкий, В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / В.В. Бабицкий // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – №1. – С.76–79.
- 13 Хованский, Г.С. Основы номографии / Г.С. Хованский. – М.: Наука, 1976. – 352 с.

Получено 11.01.2006

V.V. Babitsky, A.A. Vasilyev. Grapho-analytical method of concrete carbonization forecasting.

The existing model of concrete carbonization was considered and evaluated. On the basis of examination of numerous ferro-concrete constructions along the depth we offer a different carbonization model according to which concrete neutralization reaction takes place in a wide layer, carbonization degree changes linearly from limited in the surface layer to minimal in the construction depth, and reinforcement corrosion begins much earlier. On the basis of analytical calculations and experimental investigations we offer the scheme of concrete carbonization depth forecasting. For practical realization of offered complicated model we developed computing graphic method based on obtained nomogram system (connecting concrete class according to its strength and its structural peculiarities and its protecting properties relatively to steel reinforcement) which allows to forecast concrete carbonization and steel reinforcement condition both on the construction design stage and in really exploited ferro-concrete constructions.

We also compared calculated value with experimental results of construction examinations.

---

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2006. № 1-2(12-13)

---

УДК 624.012.35

А. А. ВАСИЛЬЕВ, научный сотрудник; С. В. ДЗИРКО, младший научный сотрудник; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ рН- И КАРБОМЕТРИИ

Приведены результаты изучения коррозионного поведения основных типов железобетонных конструкций (ЖБК) в контакте с атмосферой для различных сроков и условий эксплуатации методами рН- и карбометрии. Определена степень коррозионного состояния арматуры в зависимости от физико-химических показателей бетона конструкций. Разработаны критерии оценки состояния ЖБК для различных атмосферных условий эксплуатации. Установлены зависимости между физико-химическими показателями бетона и параметром времени эксплуатации железобетонных конструкций. На основании установленных зависимостей получены аналитические выражения для прогнозирования изменения показателей рН (водородного показателя водной вытяжки цементного камня) и КС (карбонатной составляющей) во времени для различных условий эксплуатации. Разработана методика оценки и прогнозирования состояния бетонных и железобетонных конструкций на основе использования методов рН- и карбометрии, что является новым направлением в области неразрушающего контроля конструкций, выполненных из тяжелого бетона.

**Ж**елезобетонные конструкции составляют основную долю конструкций капитальных зданий и сооружений, поэтому от их состояния зависят эксплуатационная надежность и дол-

говечность большинства объектов народного хозяйства.

Все ЖБК, эксплуатирующиеся в воздушной среде, подвержены влиянию находящихся в ней кислых газов. Поскольку концентрация углекислого газа в воздухе в  $10-10^4$  раз выше концентрации других кислых газов, основным процессом нейтрализации бетона является карбонизация. При карбонизации бетона 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. Дальнейшее развитие этих процессов приводит к потере конструкцией несущей способности и возникновению аварийной ситуации.

До настоящего времени кинетику карбонизации бетонов изучали по изменению толщины нейтрализованного слоя от времени контакта образца с углекислым газом воздуха, которую определяли с помощью 0,1 % спиртового раствора фенолфталеина (индикаторным методом).

Сочетанием индикаторного метода с теорией диффузионного переноса газов в твердом пористом теле было выведено основное уравнение карбонизации бетонов [1]

$$\chi = A\sqrt{t},$$

где  $\chi$  – толщина нейтрализованного слоя по фенолфталеиновой пробе, см;  $A$  – коэффициент;  $t$  – срок службы конструкции, лет.

Авторами [1] показано, что толщина нейтрализованного слоя бетона пропорциональна корню квадратному из концентрации  $\text{CO}_2$ :

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{\sqrt{c_1}}{\sqrt{c_2}}.$$

Приведенное выражение позволяет прогнозировать глубину карбонизации по результатам ее определений в первые годы эксплуатации или ускоренных испытаний при высоких концентрациях  $\text{CO}_2$ . Для отдельно взятого значения глубина карбонизации  $x_2$  через  $t_2$  лет определяется по формуле

$$x_2 = x_1 \sqrt{\frac{t_2}{t_1}},$$

где  $x_1$  – глубина карбонизации, выявленная в бетоне после  $t_1$  лет эксплуатации.

При выводе основного уравнения сделано допущение, что химическое взаимодействие происходит в узкой (около 1 мм) зоне. Резкий переход окраски индикатора, характерный для пористой

структуры бетона, также способствовал формированию мнения, что процесс карбонизации протекает только в узкой зоне на границе изменения окраски индикатора. При этом карбонизация рассматривается как конечный процесс по времени и глубине конструкции [2].

Для ускорения испытаний исследования на образцах из цементно-песчаного раствора и бетона выполняли при очень высоких концентрациях  $\text{CO}_2$  – 10 и 20 % по объему и относительной влажности – 75 %. Время испытаний составляло 54 – 219 часов. Такой метод исключал возможность изучения непосредственного взаимодействия поровой жидкости с  $\text{CO}_2$  воздуха в реальных условиях эксплуатации [1].

Большой разброс данных при определении толщины нейтрализованного слоя, связанный с неоднородным строением, различными пористостью и плотностью бетона, не позволяет выполнять с достаточной точностью оценку глубины карбонизации бетона. Кроме того, по результатам [3] выяснено, что окрашивание бетона фенолфталеиновой пробой в малиновый цвет происходит при рН около 10,0. 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 исследованиями [4] коррозия арматуры возможна при  $\text{pH} \leq 11,8$ . Таким образом, индикаторный метод не позволяет оценивать на момент обследования и прогнозировать состояние железобетонных конструкций с достаточной точностью.

Многолетние авторские исследования ЖБК по глубине бетона [5–9] показывают, что карбонизация бетона не заканчивается на определенном этапе и продолжается все время эксплуатации конструкций. При этом значения толщины слоя бетона, в которой он потерял защитные свойства по отношению к арматуре, определенные фенолфталеиновым тестом и рН-метрией, отличаются до нескольких раз, а коррозионные процессы различной интенсивности в арматуре присутствуют в зоне, в которой по индикаторному методу бетон сохраняет свои защитные свойства по отношению к арматуре. Кроме того, несмотря на то, что индикаторный метод прост в исполнении, он не позволяет детально судить об изменении показателя рН поровой влаги цементного камня в нейтрализованной зоне и за ее пределами, о влиянии распределения концентрации карбонатов по глубине бетона на величину рН.

Целью данной работы явилось:

- изучение контакта ЖБК из тяжелых бетонов с атмосферой при различных сроках и условиях их эксплуатации;
- разработка критериев оценки состояния железобетонных конструкций, эксплуатируемых в раз-

личных воздушных средах, методами рН- и карбометрии;

– прогнозирование изменения показателей рН и КС во времени в зависимости от условий эксплуатации;

– прогнозирование изменения состояния ЖБК для различных условий эксплуатации.

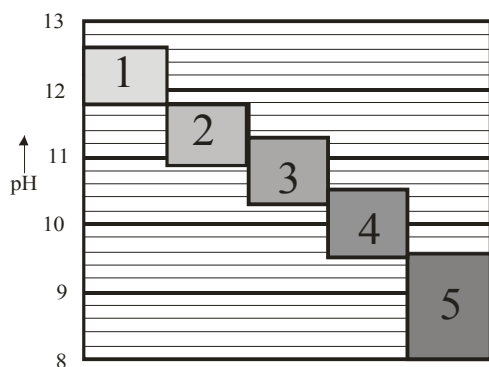
В основу исследований положено использование методов рН- и карбометрии, поскольку показатель рН является основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты или другие продукты химического взаимодействия под воздействием внешней среды, а также универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре. Карбонатная составляющая характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах.

Объектами исследования служили железобетонные конструкции различных типов (колонны, балки (прогоны), плиты типа ПК и ПР) с длительными сроками и различными условиями эксплуатации. Для анализа отбирались образцы бетона на глубине 10–20 мм, что соответствует зоне расположения арматуры.

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].

**Разработка критериев оценки состояния ЖБК.** В результате обследования многочисленных



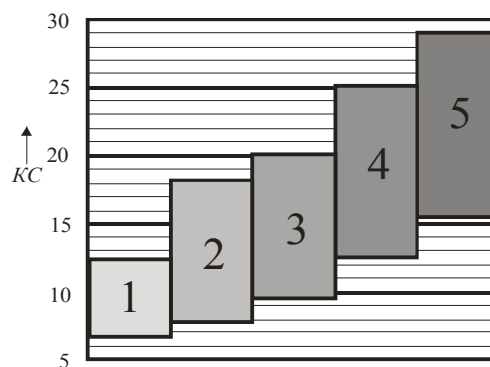
железобетонных конструкций, эксплуатировавшихся в различных атмосферных условиях, при оценке состояния арматуры были выявлены разные степени ее коррозионных повреждений. Полученные результаты систематизированы с целью сопоставления коррозионного состояния стальной арматуры с параметрами защитного слоя бетона. Для оценки состояния поверхности арматуры, выявляемой после вскрытия защитного слоя бетона, разработана соответствующая балльная система, приведенная в таблице 1.

Таблица 1 – Визуальная 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
V	Пластинчатая коррозия высокой интенсивности

Для оценки зависимости коррозионного состояния арматуры от физико-химических показателей бетона определяли показатели рН и КС бетона, находящегося в зоне расположения арматуры.

Путем статистической обработки полученных данных (исследовались по 40 проб бетона для каждой степени коррозии) получены области распределения показателей рН и КС с доверительной вероятностью 0,95 для различных степеней коррозии арматуры (рисунок 1).



Степень коррозионных повреждений

Рисунок 1 – Взаимосвязь степени коррозии арматуры с показателями рН и КС

В соответствии с полученными данными стальная арматура железобетонных конструкций не корродирует при щелочности поровой жидкости рН в пределах от 11,8 до 12,7, что полностью соответствует общепринятым представлениям [1, 2]. Снижение же рН менее граничного значения (11,8) вызывает коррозию арматуры разной степени интенсивности.

Если сопоставить величину карбонатной составляющей с состоянием стальной арматуры, то

здесь также можно отметить явно выраженную закономерность – с карбонатной составляющей степень коррозии стали возрастает. Как и для щелочности поровой жидкости, отсутствует четкая граница, характеризующая момент перехода стали из пассивного состояния в активное с последующим началом коррозионного процесса. Так, стальная арматура не корродирует при содержании карбонатной составляющей от 6,8 до 12,5 % (в среднем 9,6 %). С другой стороны, максимальное кор-

розионное поражение арматуры характерно для карбонатной составляющей от 15,5 до 29,0 % (в среднем 22,2 %) и проявляется через десятки лет эксплуатации.

Результаты обследования различных типов конструкций с использованием методов pH- и карбометрии и оценкой состояния арматуры позволили определить количественные критерии оценки состояния ЖБК для условий эксплуатации классов ХС3, ХС4 (в соответствии с СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции») по физико-химическим показателям цементно-песчаной фракции бетона pH и КС.

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

Критерии оценки состояния ЖБК для условий эксплуатации классов ХС3–ХС5 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии оценки состояния ЖБК

pH	КС, %	Состояние бетона и арматуры Состояние железобетонной конструкции
12,5–1,8	<5	Бетон находится в хорошем состоянии и сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Состояние бетона, арматуры – хорошее. Состояние ЖБК – хорошее
12,5–11,8	5–7	Бетон находится в удовлетворительном состоянии и сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Происходит плавное снижение показателя pH. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное
12,5–11,8	6–9	Бетон находится в удовлетворительном состоянии и сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии. Происходит плавное изменение показателя pH. Показатель pH приближается к границе, после которой возможно развитие коррозии во влажной среде. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное
11,8–11,3	8–18	Наблюдается начало деградационных процессов в бетоне. Происходит плавное изменение показателя pH. Показатель pH приближается к границе, после которой начинается его резкое снижение, свидетельствующее о потере защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Коррозия арматуры 1-й степени для классов условий ХС3, ХС4. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное. Коррозия арматуры до 50 % поверхности стержня (2-я степень коррозии арматуры) для класса ХС5. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное

Продолжение таблицы 2

pH	КС, %	Состояние бетона и арматуры Состояние железобетонной конструкции
11,3–10,9	9–18	Развитие деградационных процессов в бетоне. 2-я степень коррозии арматуры при классе условий по эксплуатации ХС3, ХС4 и сроке эксплуатации конструкции до 15 лет. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное. Коррозия арматуры более 50 % поверхности стержня (3-я степень коррозии арматуры) при классе условий по эксплуатации ХС3, ХС4 и сроке эксплуатации конструкции более 15 лет. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное. 3-я степень коррозии арматуры при классе условий эксплуатации ХС5 и сроке эксплуатации до 10 лет. Состояние бетона, арматуры – удовлетворительное. Состояние ЖБК – удовлетворительное
10,9–10,5	9–20	Ускорение деградационных процессов в бетоне. 3-я степень коррозии арматуры при классе условий по эксплуатации ХС3, ХС4 и сроке эксплуатации конструкции более 20 лет. Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное. 3-я степень коррозионных повреждений арматуры при классе условий эксплуатации ХС5 и сроке эксплуатации 10–20 лет. Образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры (при незначительной толщине защитного слоя). Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное
10,5–10,3	13–20	Интенсивная деградация бетона. Образование волосяных трещин в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. 3-я степень коррозии арматуры при классе условий по эксплуатации ХС3, ХС4 и сроке эксплуатации конструкции 20–40 лет. Состояние бетона, арматуры – не вполне удовлетворительное. Состояние ЖБК – не вполне удовлетворительное. Начало пластинчатой коррозии (4-я степень коррозии арматуры) при классе условий по эксплуатации ХС5 и сроке эксплуатации конструкции более 20 лет. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Состояние ЖБК – неудовлетворительное
10,3–9,5	13–25	Деградация бетона повышенной интенсивности. Образование трещин различной ширины раскрытия в местах расположения рабочей и конструктивной арматуры. 4-я степень коррозии арматуры при классе условий по эксплуатации ХС3, ХС4 и сроке эксплуатации конструкции более 30 лет. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Состояние ЖБК – неудовлетворительное. 5-я степень коррозии арматуры при классе условий по эксплуатации ХС5. Раскрытие трещин по рабочей и конструктивной арматуре. Состояние бетона, арматуры – неудовлетворительное. Состояние ЖБК – неудовлетворительное

pH	КС, %	Состояние бетона и арматуры Состояние железобетонной конструкции
<9,5	16–29	Полная деградация бетона. Отслаивание и разрушение защитного слоя бетона, потеря сцепления цементного камня с заполнителем. Пластинчатая коррозия высокой интенсивности (5-я степень коррозии арматуры) при классе условий по эксплуатации ХС5. Состояние бетона и арматуры – неудовлетворительное. Состояние ЖБК – неудовлетворительное (предварийное)
<10	2–9	Нарушен рецептурный состав (недостаток вяжущего и избыток заполнителей)

Показатели pH и КС получены при анализах цементно-песчаной фракции проб бетона и приведены для бетонов, в составе которых отсутствуют добавки, повышающие содержание карбонатов. Разработанные критерии соответствуют только тяжелым бетонам, обеспечивающим пассивное состояние стальной арматуры, начиная с момента изготовления конструкции. В свою очередь, защитные свойства бетона и его коррозионное поведение будут зависеть от концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе, проницаемости структуры бетона (В/Ц), вида заполнителей и добавок, условий твердения, а также от вида и расхода вяжущего, определяющих буферную емкость бетона. Помимо перечисленного, пассивное состояние арматуры будет зависеть от толщины защитного слоя бетона и условий эксплуатации (увлажнения, перепада температур, расположения конструкций по сторонам света и др.).

Разработанные критерии позволяют объективно оценить состояние ЖБК на момент обследования, но не позволяют прогнозировать изменение их состояния во времени.

**Исследование показателей pH и КС во времени.** Полученные ранее экспериментальные результаты показывают, что pH поровой влаги цементного камня довольно точно отражает физико-химические процессы, происходящие в бетоне, начиная уже с момента его изготовления [13]. Для бетонов воздушного твердения взаимодействие  $\text{CO}_2$  воздуха с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , сразу после изготовления, не оказывает заметного влияния на водородный показатель поровой влаги, так как в них  $\text{pH} \geq 12,5$ . При термической обработке изделий из бетона величина pH 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 pH поровой влаги бетонов, изготовленных на портландцементях. К тому же, в свежизготовленных изделиях значительный промежуток времени показатель pH либо не меняет своего значения, либо изменяется очень незначительно. Это обусловлено достаточно высокой буферной емкостью бетона, под которой понимается

содержание  $\text{CaO}$  в единице всего объема. На всех типах конструкций наблюдается временный период, когда увеличение концентрации карбонатов не вызывает быстрого изменения показателя pH. Этот период для разных видов конструкций составляет от 2 до 10 лет, который можно назвать периодом неопределенности, но в тоже время зоной устойчивого состояния бетона [7]. В атмосферных условиях эксплуатации ЖБК, вследствие малой концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе, процесс накопления карбонатов должен идти медленно, как и его влияние на pH поровой влаги. Проследить это можно, если оценивать зависимость pH-КС с учетом фактора времени.

Для проверки подчинения распределения показателей pH и КС в поверхностных слоях бетона параболическому закону распределения построены регрессионные модели зависимостей  $\sqrt{t}$ -pH и  $\sqrt{t}$ -КС для основных типов ЖБК, эксплуатирующихся в различных условиях с нанесенными линиями регрессии. При обработке результатов получено большое количество графиков, поэтому в качестве примера на рисунках 2, 3 приведены зависимости  $\sqrt{t}$ -pH и  $\sqrt{t}$ -КС для колонн, эксплуатирующихся в атмосферных условиях. Пунктирной линией показан 95%-ный доверительный интервал для средних значений зависимых величин pH (КС).

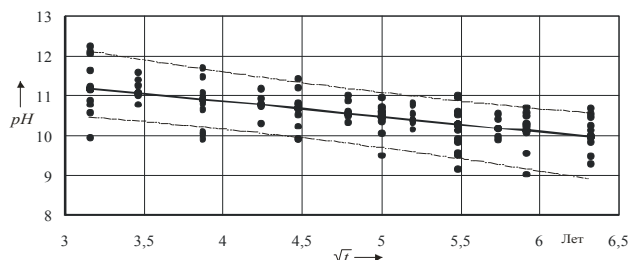


Рисунок 2 – Зависимость  $\sqrt{t}$ -pH для колонн (атмосферные условия)

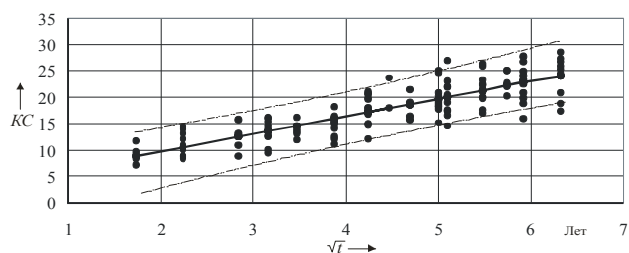


Рисунок 3 – Зависимость  $\sqrt{t}$ -КС для колонн (атмосферные условия)

Полученные регрессионные зависимости показывают, что с увеличением возраста эксплуатации конструкций pH поровой влаги цементного камня линейно снижается, а содержание карбонатов растет, что дает основание говорить о существовании параболической зависимости распределения показателей pH и КС в поверхностных слоях бетона во времени.

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.

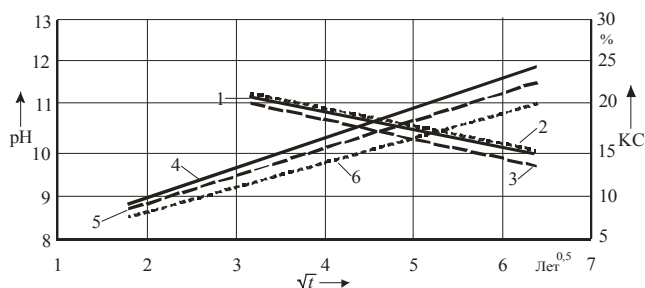


Рисунок 4 – Зависимости  $\sqrt{t}$ -рН и  $\sqrt{t}$ -КС для атмосферных условий:

$\sqrt{t}$ -рН: 1 – колонны; 2 – ригели (прогоны); 3 – плиты ребристые;  
 $\sqrt{t}$ -КС: 4 – колонны; 5 – ригели (прогоны); 6 – плиты ребристые

Приведенные зависимости для различных условий эксплуатации незначительно отличаются углами наклона.

**Прогнозирование изменения показателей рН и КС во времени.** Проанализировав результаты полученных зависимостей  $\sqrt{t}$ -рН и  $\sqrt{t}$ -КС, можно отметить, что в общем виде кинетика изменения щелочности поровой жидкости (рН) может быть записана как функция времени эксплуатации железобетонных конструкций ( $t$ , лет) и эмпирических коэффициентов ( $a_0^{\text{рН}}$  и  $a_1^{\text{рН}}$ ):

$$\text{рН} = a_0^{\text{рН}} - a_1^{\text{рН}} \sqrt{t}, \quad (1)$$

а кинетика роста карбонатной составляющей (КС, %) с учетом коэффициентов ( $a_0^{\text{рН}}$  и  $a_1^{\text{рН}}$ )

$$\text{КС} = a_0^{\text{КС}} + a_1^{\text{КС}} \sqrt{t}. \quad (2)$$

При обработке полученных зависимостей  $\sqrt{t}$ -рН и  $\sqrt{t}$ -КС для реальных железобетонных конструкций (эксплуатируемых длительные промежутки времени (до 40 лет)) методами регрессионного и корреляционного анализа выражения (1) и (2) в зависимости от условий эксплуатации могут быть записаны следующим образом:

для атмосферных условий

$$\text{рН} = 12,33 - 0,39\sqrt{t}, \quad (3)$$

$$\text{КС} = 2,66 + 3,13\sqrt{t}, \quad (4)$$

для условий общественных зданий

$$\text{рН} = 12,10 - 0,28\sqrt{t}, \quad (5)$$

$$\text{КС} = 2,04 + 2,77\sqrt{t}, \quad (6)$$

для условий помещений сельскохозяйственных комплексов

$$\text{рН} = 12,33 - 0,55\sqrt{t}, \quad (7)$$

$$\text{КС} = 2,18 + 3,52\sqrt{t}, \quad (8)$$

Полученные выражения позволяют прогнозировать изменение показателей рН и КС во времени в зависимости от условий эксплуатации.

**Заключение.** По результатам обследования железобетонных конструкций различных типов определены степени коррозии арматуры в зависимости от физико-химических показателей бетона.

Для оценки состояния конструкций, эксплуатируемых в условиях сельскохозяйственных помещений, предложен класс по условиям эксплуатации ХС5 (70 % < RH ≤ 90 %, концентрация CO<sub>2</sub> 0,2–0,3 %) для СНБ 5.03.01-02.

Результаты обследования различных типов ЖБК с использованием методов рН- и карбометрии и оценкой состояния арматуры позволили определить количественные критерии оценки состояния конструкций для условий эксплуатации классов ХС3–ХС5.

Установлено, что между временем эксплуатации  $t$ , показателями рН и КС существует устойчивая связь. С увеличением возраста эксплуатации конструкций в поверхностных слоях показатели рН и КС изменяются по квадратичной параболической зависимости.

Для различных условий эксплуатации зависимостей  $\sqrt{t}$ -рН и  $\sqrt{t}$ -КС отличаются незначительными углами наклона.

Исследование полученных зависимостей  $\sqrt{t}$ -рН и  $\sqrt{t}$ -КС методами регрессионного и корреляционного анализа позволяет выполнить прогнозирование изменения показателей рН и КС во времени.

Выполненные исследования позволяют прогнозировать изменение физико-химических показателей бетона в зависимости от условий эксплуатации.

Разработанные критерии оценки состояния ЖБК по показателям рН и КС в совокупности с полученными прогнозными аналитическими выражениями позволяют оценивать и прогнозировать состояние конструкций в любой промежуток времени в зависимости от условий эксплуатации.

Изучение карбонизации ЖБК методами рН- и карбометрии является новым направлением в области неразрушающего контроля железобетонных конструкций.

#### Список литературы

1 Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1978. – 205 с.



2 Долговечность железобетона в агрессивных средах // Совм. изд. СССР – ЧССР – ФРГ / С. Н. Алексеев [и др.] – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

3 **Кудрявцев, И.А.** Исследование карбонизации железобетонной конструкции с длительным сроком эксплуатации / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // *Материалы, технологии, инструменты.* – 2000. – Т. 5. № 3. – С. 97–100.

4 **Бабушкин, В.И.** Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян; под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. – 4-е изд. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.

5 **Васильев, А.А.** Опыт использования рН- и карбометрии при определении состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // *Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы XI междунар. науч.-метод. межвуз. семинара – Брест, 2004.* – Ч. I. – С. 228–232

6 **Васильев, А.А.** Об оценке карбонизации железобетонных конструкций по зависимости распределения карбонатной составляющей от глубины бетона / А.А. Васильев // *Вестник БелГУТа: Наука и транспорт.* – 2005. – № 1. – С. 37–41.

7 **Васильев, А.А.** Опыт использования рН- и карбометрии для оценки состояния длительно эксплуатируемых желе-

зобетонных конструкций / А.А. Васильев // *Научно-технические проблемы современного железобетона: материалы Всеукраинской науч.-техн. конф.* – Сумы, 2005. – Т.2. – С. 110–117.

8 **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.

9 Комплексная оценка состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций: практическое пособие / А.А. Васильев [и др.]; под ред. А.А. Васильева. – Гомель: УО «БелГУТ», 2005. – 31 с.

10 **Пятницкий, А.К.** Количественный анализ / А.К. Пятницкий, А.К. Бабко. – М.: Высшая школа, 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 экон. специал. вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Минск: Выш. школа, 1983. – 279 с.

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

Получено 11.01.2006

**A. A. Vasilyev, S. V. Dzirko.** Evaluation and forecasting of long-term maintained ferro-concrete construction conditions by the methods of pH- and carbometry.

We offer here the results of the study of corrosion behavior of main types of ferro-concrete constructions (FCC) in contact with atmosphere for different terms and exploitation conditions by the methods of pH- and carbometry. The degree of reinforcement corrosion conditions dependent on construction concrete physical chemical characteristics was determined. The criteria of ferro-concrete construction condition evaluation were developed for different atmospheric exploitation conditions. The dependence between concrete physical chemical characteristics and exploitation time parameter for ferro-concrete constructions was determined. On the basis of dependences stated there were obtained stated we obtained analytical expressions for forecasting of pH indicators change (hydrogen indicator of cement stone water extract) and CC (carbonate component) against time for different exploitations. Method of evaluation and forecasting of concrete and ferro-concrete constructions condition was developed on the basis of the pH- and carbometry methods which is a new approach in the sphere of undestructive control for heavy concrete constructions.