

УДК 624.012.45/46

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. А. ВАСИЛЬЕВ*Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель*

Введение

Железобетонные конструкции (ЖБК) составляют основную долю конструкций капитальных зданий и сооружений, поэтому от их состояния зависят эксплуатационная надежность и долговечность большинства объектов народного хозяйства.

Все ЖБК, эксплуатирующиеся в воздушной среде, подвержены влиянию находящихся в ней кислотных газов. Поскольку концентрация углекислого газа в воздухе в $10-10^4$ раз выше концентрации других кислотных газов, основным процессом нейтрализации бетона является карбонизация. При карбонизации бетона изменяется содержание карбонатной составляющей, 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 (x) от времени контакта образца или конструкции с углекислым газом воздуха, которую определяли с помощью 0,1 % спиртового раствора фенолфталеина.

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

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

где χ – толщина нейтрализованного слоя по фенолфталеиновой пробе, см; A – коэффициент; τ – время службы конструкции, с;

$$A = \sqrt{\frac{2D'C_0}{m_0}},$$

D' – эффективный коэффициент диффузии CO_2 , $\text{см}^2/\text{с}$; C_0 – концентрация CO_2 в атмосфере в относительных единицах по объему; m_0 – реакционная способность бетона;

$$m_0 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{карб.бетон}}},$$

V_{CO_2} – объем CO_2 при нормальной температуре и давлении, см^3 ; $V_{\text{карб.бетона}}$ – объем единицы бетона, поглотившей V_{CO_2} , см^3 .

Эффективный коэффициент диффузии:

$$D' = \frac{m_0 x^2}{2C_0 \tau}.$$

Авторами [1] показано, что толщина нейтрализованного слоя бетонов пропорциональна корню квадратному из концентрации CO_2 :

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

Приведенное выражение позволяет делать прогноз глубины карбонизации по результатам определений в первые годы эксплуатации или ускоренных испытаний при высоких концентрациях CO_2 . Для отдельно взятого значения глубина карбонизации x_2 через τ_2 лет определяется по формуле:

$$x_2 = x_1 \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}},$$

где x_1 – глубина карбонизации, обнаруженная в бетоне после τ_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.

Для ускорения испытаний исследования на образцах из цементно-песчаного раствора и бетона выполняли при очень высоких концентрациях CO_2 – 10 % и 20 % по объему и относительной влажности – 75 %. Время испытаний составляло 54–219 ч. Такой метод исключал возможность изучения непосредственного взаимодействия поровой жидкости с CO_2 воздуха в реальных условиях эксплуатации.

Многолетние авторские исследования ЖБК по глубине бетона 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, а также о влиянии распределения концентрации карбонатов по глубине бетона на величину рН.

Постановка задачи

Целью данной работы явилось изучение контакта различных типов ЖБК из тяжелых бетонов с различными воздушными средами для разных сроков их эксплуатации и разработка комплексной методики оценки и прогнозирования состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в атмосферных условиях. В основу

методики 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, он является универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к арматуре, а карбонатная составляющая (КС) характеризует количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах.

Объект и методы исследования

Объектами исследования служили железобетонные конструкции различных типов с длительными сроками эксплуатации.

Показатель рН определялся по методике [9]. Показатель КС – объемно-газовым методом [2].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследование распределения показателей рН и КС по времени

Вследствие малой концентрации CO_2 в воздухе процесс накопления карбонатов идет медленно, также медленно увеличение концентрации карбонатной составляющей изменяет рН поровой влаги. Прослеживается это при оценке зависимостей рН–КС с учетом фактора времени и глубины бетона конструкции.

Для исследования зависимостей рН- t ; КС- t использованы образцы бетона (сколы толщиной 10–20 мм) наиболее распространенных железобетонных элементов (колонн, балок (прогонов), плит ребристых и плит пустотного настила), эксплуатирующихся на открытом воздухе и в условиях помещений.

Обработка накопленных данных производилась по методу наименьших квадратов при помощи табличного процессора Excel. По полученным результатам построены регрессионные модели зависимостей рН- t и КС- t для различных условий эксплуатации [3]–[5]. При обработке результатов построено большое количество графиков, в качестве примера приведены результаты исследования колонн, эксплуатирующихся в атмосферных условиях (рис. 1, 2).

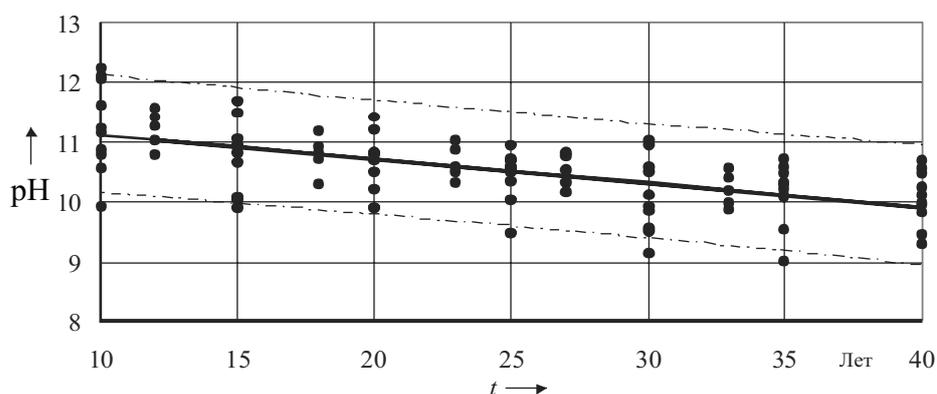


Рис. 1. Диаграмма рассеяния значений рН и соответствующих значений t для колонн при атмосферных условиях с нанесенным уравнением линейной регрессии

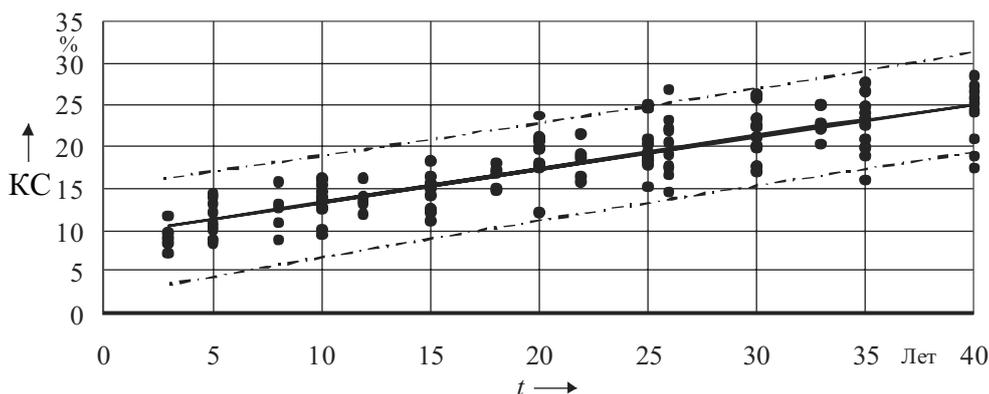


Рис. 2. Диаграмма рассеяния значений КС и соответствующих значений t для колонн при атмосферных условиях с нанесенным уравнением линейной регрессии

Полученные зависимости носят линейный характер и отличаются незначительно углами наклона. Они показывают, что с ростом срока эксплуатации конструкций рН поровой влаги цементного камня линейно снижается, а содержание карбонатов растет.

Суммарные диаграммы рН- t и КС- t для основных видов ЖБК и атмосферных условий эксплуатации приведены на рис. 3.

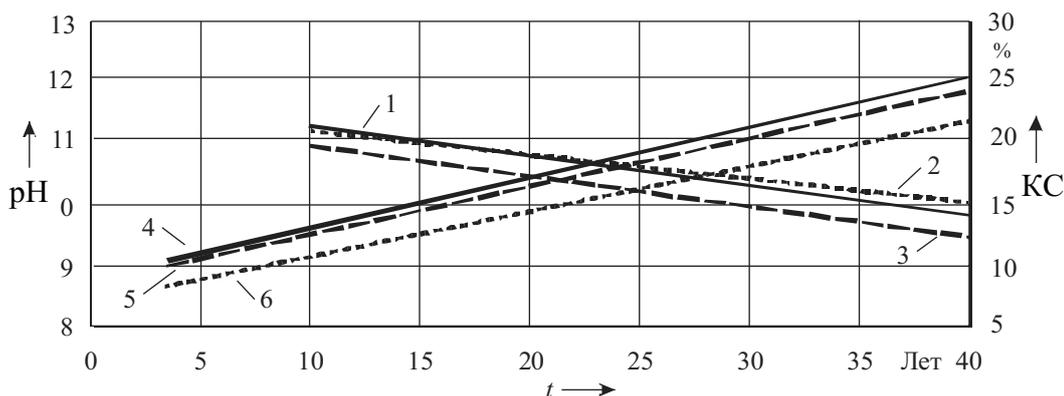


Рис. 3. Диаграммы рН- t и КС- t для атмосферных условий.
рН- t : 1 – колонны; 2 – ригели (прогоны); 3 – плиты ребристые; КС- t : 4 – колонны; 5 – ригели (прогоны); 6 – плиты ребристые

Несмотря на значительный разброс показателей, обусловленных обследованием конструкций с бетонами разных классов и множеством факторов, определяющих их свойства, между временем эксплуатации t , показателями рН и КС существует устойчивая зависимость. Этот вывод справедлив только для средних показателей поверхностного слоя толщиной 10–20 мм и не затрагивает более глубоких слоев тела бетона.

Исследование распределения показателей рН и КС по глубине

Для изучения распределения показателей рН и КС по глубине использовались массивные конструкции (колонны, балки) [3]–[8]. Образцы (в виде порошка) получали выбуриванием из тел конструкций с шагом 5–10 мм до глубины 100 мм.

На рис. 4 приведены результаты исследования бетона по глубине конструкций, эксплуатировавшихся различные длительные промежутки времени.

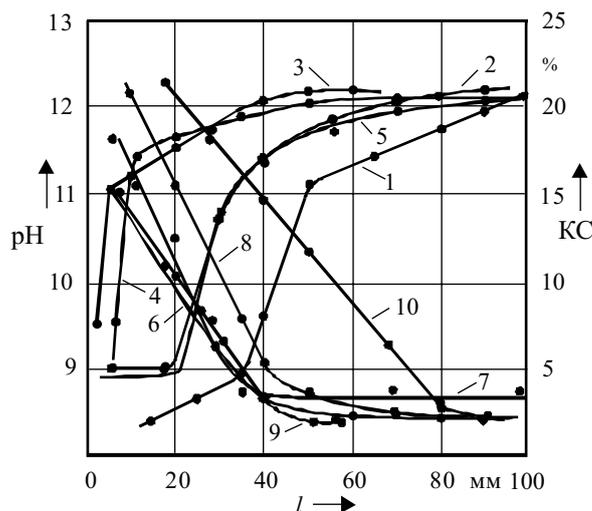


Рис. 4. Зависимости pH-*l* и КС-*l*: 1 – pH-*l*; 10 – КС-*l* – для продольной балки после 40 лет эксплуатации в атмосферных условиях; 2 – pH-*l*; 9 – КС-*l* – для колонны после 40 лет эксплуатации в атмосферных условиях; 3 – pH-*l*; 8 – КС-*l* – для колонн после 30 лет эксплуатации в помещении; 4 – pH-*l*; 7 – КС-*l* – для колонн после 40 лет эксплуатации в помещении коровника; 5 – pH-*l*; 6 – КС-*l* – для колонн после 30 лет эксплуатации в помещении свинарника

Полученные результаты показывают, что во всех случаях концентрация CaCO_3 линейно снижается, а pH поровой влаги возрастает с увеличением глубины залегания бетона в конструкциях (рис. 4). При достижении $\text{pH} \geq 12$ содержание CaCO_3 становится постоянным, а при дальнейшем углублении в бетон стремится к $\text{КС} \leq 5\%$. Наиболее интенсивное изменение pH происходит в области значений карбонатной составляющей $\text{КС} = 6 \div 15\%$.

Исследование распределения карбонатной составляющей по глубине бетона конструкций позволило разработать методики: определения предельной величины карбонизации (ПВК), показывающей содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах, когда весь CaO цемента полностью перейдет в CaCO_3 ; определения степени карбонизации (СК), показывающей процент гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона; а также определения изначального содержания цемента в ЖБК.

Методика оценки состояния железобетонных конструкций

Методика расчета карбонатной составляющей

Для вычисления массы карбоната в анализируемой навески необходимо знать температуру в помещении на момент проведения измерения по шкале Цельсия, давление атмосферы (в мм рт. ст.) с учетом давления насыщенного пара воды и объем выделившегося углекислого газа (в см^3).

По закону Авогадро известно, что в нормальных условиях ($P = 760$ мм рт. ст. и $T = 273$ К) 1 моль любого вещества, перешедшего в газообразное состояние, занимает объем 22400 см^3 .

Поэтому для расчета содержания массы карбоната в анализируемой навеске необходимо полученный объем газа привести к нормальным (стандартным) условиям:

$$V_0 = \frac{V_p \cdot T_0 \cdot P_n}{P_0 \cdot T}, \quad (1)$$

где V_1 – объем газа, приведенный к нормальным условиям, см^3 ; V_p – объем газа, выделяющегося при анализе, см^3 ; T_0 – нормальная температура по шкале Кельвина (273 К); T – температура по шкале Кельвина, при которой проводился анализ $T = (273 \text{ К} + t \text{ }^\circ\text{C})$; P_0 – стандартное давление атмосферы ($P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$); $P_{\text{п}}$ – парциальное давление газа, мм рт. ст.

$$P_{\text{п}} = P_t - P_{\text{в}} - \frac{1}{8}t', \quad (2)$$

где P_t – показания барометра в момент анализа, мм рт. ст.; $P_{\text{в}}$ – давление насыщенного водяного пара, мм рт. ст (табл. 1); $-\frac{1}{8}t'$ – поправка на показания барометра для приведения их к $0 \text{ }^\circ\text{C}$, t' – температура воздуха в помещении, $^\circ\text{C}$.

Таблица 1

Давление насыщенного водяного пара ($P_{\text{в}}$, мм рт. ст.)

№	t , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, мм рт. ст.	№	t , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, мм рт. ст.	№	t , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, мм рт. ст.	№	t , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, мм рт. ст.	№	t , $^\circ\text{C}$	$P_{\text{в}}$, мм рт. ст.
1	10	9,2	6	15	12,8	11	20	17,5	16	25	23,8	21	30	31,8
2	11	9,8	7	16	13,6	12	21	18,6	17	26	25,2	22	31	33,7
3	12	10,5	8	17	14,5	13	22	19,8	18	27	26,7	23	32	35,7
4	13	11,2	9	18	15,5	14	23	21,1	19	28	28,3	24	33	37,7
5	14	12,0	10	19	16,5	15	24	22,4	20	29	30,0	25	34	39,9

Зная V_0 и молекулярную массу CaCO_3 ($M_{\text{CaCO}_3} = 100 \text{ г/моль}$) определяется масса карбоната (m_{CaCO_3}), г из пропорции:

$$22400 \text{ см}^2 - 100 \text{ г/моль},$$

$$V_0 - m_{\text{CaCO}_3},$$

тогда

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{V_0}{22400} 100 \%. \quad (3)$$

Зная массу навески анализируемой пробы ($m_{\text{н}}$), определяется процентное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции из следующей пропорции:

$$m_{\text{н}} - 100 \%,$$

$$m_{\text{CaCO}_3} - \text{КС}, \%,$$

$$\text{КС} = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{н}}} 100 \%, \quad (4)$$

где КС – карбонатная составляющая, %.

Объединяя выражения (1)–(4) и приводя величины: 22400 см^3 , T_0 , P_0 , M_{CaCO_3} к стандартным, получаем постоянный множитель $M = 0,16$, тогда

$$КС = 0,16 \frac{P_n V_p}{m_n \cdot T}, \% . \quad (5)$$

Пример определения карбонатной составляющей

Во время анализа и расчетом получены следующие результаты:
 $P_n = 750$ мм рт. ст.; $V_p = 10,3$ см³; $m_n = 0,5$ г; $T = 298$ К;

$$КС = \frac{750 \cdot 10,3}{0,5 \cdot 298} \cdot 0,16 = 8,3 \ \% .$$

Методика определения предельной величины карбонизации

Зависимости КС- l при их экстраполяции на максимальные значения КС приобретают величины, которые соответствуют предельной величине карбонизации (ПВК). Под ПВК следует понимать содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах, когда весь СаО цемента полностью перейдет в СаСО₃.

Пример определения ПВК длительно эксплуатируемой конструкции

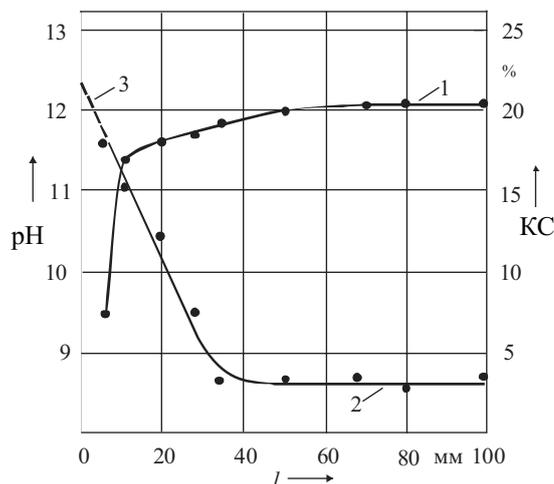


Рис. 5. Зависимости pH- l и КС- l : 1 – pH- l ; 2 – КС- l

На рис. 5 представлены результаты исследования бетона по глубине колонны коровника, эксплуатировавшегося 40 лет.

Для определения ПВК кривую 2 (рис. 5) проводим до пересечения с осью абсцисс кривая 3 (на рис. 5). Полученное значение КС = 21,5 % и является значением предельной величины карбонизации, ПВК = 21,5 %.

Методика определения степени карбонизации

Значение ПВК можно использовать для определения процента гидроокиси кальция и гидратированных клинкерных материалов, перешедших в карбонаты на разной глубине бетона – степени карбонизации (СК).

Степень карбонизации рассчитывается из пропорции:

$$\%ПВК - 100 \% СК;$$

$$\%КС - x \% СК.$$

Пример определения СК для длительно эксплуатируемой конструкции

Для обследованной конструкции ПВК = 21,5 % (рис. 5).

На глубине 10 мм (рис. 5) КС = 17 %.

Тогда степень карбонизации бетона на искомой глубине

$$СК = \frac{17 \cdot 100}{21,5} = 79 \text{ \%}.$$

Полученное значение СК = 79 % показывает, что 79 % СаО перешло в карбонаты. При этом произошло почти полное перерождение цементного камня в карбонаты, силикаты, $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$.

В соответствии с расчетом степень карбонизации на глубине 20 мм составила $СК_{20} = 51 \text{ \%}$, на глубине 40 мм – $СК_{40} = 14 \text{ \%}$, на глубине 60 мм – $СК_{60} = 14 \text{ \%}$.

Методика определения изначального содержания цемента в бетоне

Для определения содержания цемента в бетоне, помимо величины ПВК, необходимо иметь данные о плотности бетона. Плотность определяется экспериментально.

С учетом известной плотности бетона рассчитывается количество $CaCO_3$, $кг/м^3$, при условии, что весь СаО цементного клинкера прореагирует с CO_2 воздуха из пропорции:

$$\rho, кг/м^3 - 100 \text{ \%};$$

$$M_{CaCO_3}, кг/м^3 - \text{ПВК \%};$$

$$M_{CaCO_3} = \frac{\rho \cdot \text{ПВК}}{100}, кг/м^3.$$

Масса СаО в $1 м^3$ бетона определяется из пропорции:

$$M_{CaCO_3} - 100 \text{ г/моль};$$

$$M_{CaO} - 56 \text{ г/моль};$$

$$M_{CaO} = \frac{M_{CaCO_3} \cdot 56}{100}.$$

Поскольку в бетоне находится ориентировочно 60 % СаО, то изначальное содержание цемента в бетоне рассчитывается из пропорции:

$$M_{CaO} - 60 \text{ \%};$$

$$m_{ц} - 100 \text{ \%};$$

$$m_{ц} = \frac{M_{CaO} \cdot 100}{60}.$$

Пример определения изначального содержания цемента в $1 м^3$ бетона

При измерении плотность бетона составляет $\rho = 2400 кг/м^3$, ПВК = 24 %.

Масса $CaCO_3$ в $1 м^3$ бетона:

$$M_{CaCO_3} = \frac{2400 \cdot 24}{100} = 576 \text{ кг}.$$

Масса СаО в 1 м³ бетона:

$$M_{\text{CaO}} = \frac{576 \cdot 56}{100} = 322,56 \text{ кг.}$$

Изначальное количество цемента в 1 м³ бетона:

$$m_{\text{ц}} = \frac{322,56 \cdot 100}{60} = 537,6 \text{ кг.}$$

Оценка состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций

Результаты обследования сотен железобетонных конструкций различных типов с использованием методов рН- и карбометрии позволили определить количественные критерии оценки состояния ЖБК по физико-химическим показателям бетона (табл. 2) [5], [6]. Приведенные данные соответствуют анализам цементно-песчаной фракции проб бетона.

Таблица 2

Критерии состояния ЖБК по физико-химическим показателям бетона

№ п/п	рН	КС, %	Состояние бетона и арматуры
1	12,8–11,5	2–8	Бетон находится в удовлетворительном состоянии и сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии
2	12,8–11,5	9–14	Бетон находится в удовлетворительном состоянии и сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура – в пассивном состоянии Концентрация карбонатной составляющей приближается к границе, после которой происходит резкое снижение показателя рН
3	12,8–11,5	≥ 14	Бетон находится в удовлетворительном состоянии и сохраняет защитные свойства по отношению к арматуре, арматура находится в пассивном состоянии. В качестве крупного заполнителя применен карбонизированный камень либо использована добавка доломитовой муки
4	11,4–10,5	9–15	Наблюдается начало деградиционных процессов в бетоне Происходит изменение поверхностной прочности цементного камня, возникновение коррозии арматуры во влажной среде В сухих условиях коррозионный процесс заторможен
5	10,5–9,5	16–20	Деградация бетона и коррозия арматуры идут ускоренно Состояние бетона и арматуры: не вполне удовлетворительное – неудовлетворительное Необходимо устранение влияющих причин, ремонт (усиление) конструкции
6	< 9,5	> 20	Отслаивание и разрушение защитного слоя, потеря сцепления цементного камня с заполнителем. Интенсивная коррозия (в т. ч. пластинчатая) арматуры Состояние бетона и арматуры – неудовлетворительное Необходимо устранение влияющих причин, замена либо усиление конструкции
6	< 10	2–9	Нарушен рецептурный состав (недостаток вяжущего и избыток заполнителей)

Прогнозирование изменения физико-химических показателей бетона по времени

Прогнозирование изменения показателей pH и КС по времени

Путем обработки полученных экспериментальных данных при помощи пакета программ статистической обработки данных «Statgraphics» построены суммарные регрессионные модели зависимостей pH-*t* и КС-*t* для различных условий эксплуатации. На рис. 6, 7 в качестве примера приведены суммарные диаграммы pH-*t* и КС-*t*, исследованных ЖБК для атмосферных условий.

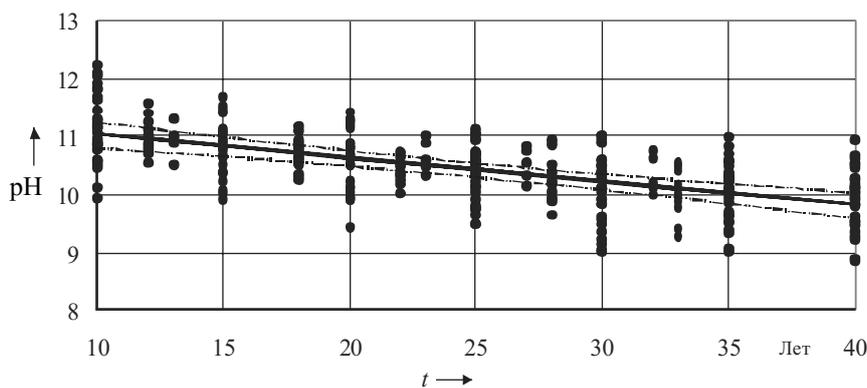


Рис. 6. Обобщенная диаграмма рассеяния значений pH-*t* для атмосферных условий с 95 % доверительным интервалом для средних значений pH

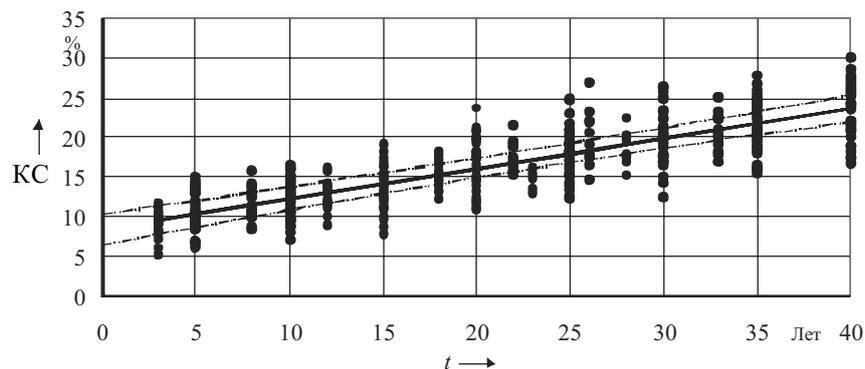


Рис. 7. Обобщенная диаграмма рассеяния значений КС-*t* для атмосферных условий с 95 % доверительным интервалом для средних значений КС

Методами регрессионного и корреляционного анализов получены выражения:

1) для прогнозной оценки среднего значения pH от времени эксплуатации *t*:

– для атмосферных условий

$$\overline{\text{pH}} = 11,44 - 0,0404 t; \tag{6}$$

– для условий общественных помещений

$$\overline{\text{pH}} = 11,46 - 0,0296 t; \tag{7}$$

– для условий помещений сельскохозяйственных комплексов

$$\overline{\text{pH}} = 11,27 - 0,0581 t. \tag{8}$$

- 2) для прогнозной оценки среднего значения $KС$ от времени эксплуатации t :
– для атмосферных условий

$$\overline{KС} = 8,50 + 0,375 t; \quad (9)$$

- для условий общественных помещений

$$\overline{KС} = 7,31 + 0,328 t; \quad (10)$$

- для условий помещений сельскохозяйственных комплексов

$$\overline{KС} = 8,70 + 0,426 t; \quad (11)$$

где t – количество лет эксплуатации конструкции.

Выводы

Предложенная методика позволяет на основе методов рН- и карбометрии выполнить качественную и количественную оценки и прогнозирование состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций при решения практических задач, возникающих при обследовании зданий и сооружений, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях, с целью принятия объективного решения о возможности дальнейшей эксплуатации здания или сооружения, выбора наиболее приемлемых методов и способов усиления конструкций, прогнозирования дальнейших сроков службы, выяснения причин аварий и др.

Литература

1. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – Москва : Стройиздат, 1978. – 205 с.
2. Бабко, А. К. Количественный анализ / А. К. Бабко, И. В. Пятницкий. – Москва : Высш. шк., 1968. – 438 с.
3. Васильев, А. А. Мониторинг состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : ГУ ВПО «Белорусско-российский университет», 2004. – С. 188–189.
4. Васильев, А. А. Опыт использования рН- и карбометрии при определении состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Приложение к Вестн. Брестского государственного технического университета : Строительство и архитектура : материалы XI Междунар. науч.-метод. межвуз. семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь». – Брест, 2004. Ч. 1. – С. 228–232.
5. Васильев, А. А. Об оценке карбонизации железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Вестн. БелГУТа : Наука и транспорт. – 2005. – № 1. – С.37–41.
6. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование основных физико-химических характеристик бетона длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : Материалы XII науч.-метод. межвуз. семинара. – Могилев, 2005. – С. 113–119.

7. 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.
8. Кудрявцев, И. А. Исследование равномерности глубины залегания карбонизированного слоя по глубине в балке пролетного строения : сб. трудов междунар. науч.-практ. семинара / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов. – Минск : Технопринт, 2001. – С. 227–229.
9. Курбатова, И. И. Современные методы химического анализа строительных материалов / И. И. Курбатова. – Москва : Стройиздат, 1972. – С. 175.

Получено 16.01.2006 г.