

УДК 691.32.001.5

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, С. В. ДЗИРКО, научный сотрудник, Д. С. СТЕПАНЦОВ, магистрант, А. М. ОВСЯНКИНА, инженер, Е. О. АДАРЧЕНКО, студентка гр. ПС-42, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РАЗВИТИЯ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

Уточнена модель карбонизации бетона во времени в условиях агрессивной среды, позволяющая по полученному показателю карбонатной составляющей (КС) в зоне расположения арматуры на момент обследования конструкции выполнить прогнозирование развития карбонизации с учетом начальной карбонизации бетона, его прочностных характеристик, изменения степени гидратации цемента во времени, интенсивности агрессивности среды.

Введение. Процесс карбонизации бетона относят к основному виду коррозии бетона, т. к. подавляющее большинство бетонных и железобетонных конструкций эксплуатируются в условиях воздушной среды. При карбонизации изменяется содержание карбонатной составляющей (КС), по мере накопления которой происходят структурные изменения цементного камня. Развиваясь во времени, карбонизация вызывает нейтрализацию бетона, т. е. потерю им защитных свойств по отношению к арматуре, что в соответствующих условиях способствует развитию процессов коррозии стальной арматуры различной интенсивности [1, 2].

Многолетние авторские исследования [3–5] показывают, что основным параметром, определяющим скорость карбонизации являются условия эксплуатации, а развитие карбонизации во времени в целом подчиняется квадратичной параболической зависимости. В качестве основных рассматриваются три типа условий эксплуатации: атмосферные, условия общественных (промышленных) зданий, сельскохозяйственных (с.-х.) помещений. Поскольку из вышеперечисленных наиболее агрессивными являются условия с.-х. помещений, дальнейшие исследования карбонизации бетона проводим именно для них. Ранее, в [5] для прогнозирования изменения карбонатной составляющей в поверхностных слоях бетона для условий с.-х. помещений было предложено следующее выражение:

$$КС_{\text{прог}} = 2,18 + 3,52\sqrt{t}, \quad (1)$$

где $КС_{\text{прог}}$ – прогнозируемое значение величины КС, %, t – величина прогнозного периода, лет.

Данное выражение было получено для средних прогнозных значений. Оно не учитывает начальную карбонизацию бетона и хотя описывает характер изменения показателя КС, однако значительный разброс данных при его выводе и, как следствие, невысокий коэффициент корреляции дают основание полагать, что наряду с зависимостью от времени существует и влияние других факторов, что не позволяет с достаточной точностью прогнозировать изменение во времени карбонатной составляющей по данной зависимости.

Результаты исследования. Выполненные ранее в [7] исследования развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды позволили получить выражения для прогнозирования карбонизации бетона при различных толщинах защитного слоя соответственно для свежизготовленных конструкций и по полученному на момент обследования значению КС для эксплуатируемых конструкций.

В общем виде:

$$КС_{\text{прог}}^x = КС_0^x + A\sqrt{t}; \quad (2)$$

$$КС_{\text{прог}}^x = КС_{\text{ф}}^x + A(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_{\text{ф}}}). \quad (3)$$

где $КС_{\text{прог}}^x$ – прогнозируемое значение показателя КС, %; $КС_0^x$ – начальное значение показателя КС, %, на глубине x , мм; A – коэффициент, учитывающий развитие карбонизации во времени по сечению бетона; t – величина прогнозного периода, лет; $КС_{\text{ф}}^x$ – фактическое значение показателя КС, %, полученное по результатам обследования конструкции на глубине x мм; $t_{\text{прог}}$ – величина прогнозного периода с учетом возраста конструкции на момент обследования, лет; $t_{\text{ф}}$ – возраст конструкции на момент обследования, лет.

В качестве примера в таблице 1 приведены выражения для прогнозирования карбонизации бетона классов по прочности $C^{12/15} - C^{25/30}$ для условий повышенной карбонизации конструкций, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственных помещений. Полученные зависимости показывают, что с увеличением толщины защитного слоя коэффициент A , определяющий угол наклона регрессионной кривой, и, как следствие, скорость развития карбонизации, увеличивается. Таким образом, с ростом глубины увеличивается и скорость карбонизации, что противоречит существующей теории карбонизации, в соответствии с которой [1, 2] она развивается широким фронтом, линейно с поверхности в глубь конструкции, при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне. И полностью противоречит выполненным ранее авторским исследованиям

[4, 5], в соответствии с которыми она развивается с поверхностных слоев в глубь бетона конструкций не фронтально, а по сложной экспоненциальной зависимости (степень карбонизации бетона максимальна в поверхностных слоях).

Таким образом, результаты исследований показывают, что для возможности прогнозирования развития карбонизации при различной толщине защитного слоя необходимо обязательно учитывать ее изменение по сечению бетона.

Таблица 1 – Выражения для прогнозирования карбонизации бетона для условий повышенной карбонизации в условиях сельскохозяйственных помещений

Класс бетона согласно СТБ 1544-2005	Толщина защитного слоя бетона, мм	Уравнения для прогнозирования карбонизации, %	Время до наступления полной карбонизации бетона t_{max} , годы
C ¹² / ₁₅	2,5	$KC_{прог} = 8,20 + 2,11\sqrt{t}$	19
C ¹⁸ / _{22,5}		$KC_{прог} = 9,26 + 3,44\sqrt{t}$	6
C ²⁵ / ₃₀		$KC_{прог} = 10,32 + 1,61\sqrt{t}$	29
C ¹² / ₁₅	5	$KC_{прог} = 8,11 + 2,08\sqrt{t}$	20
C ¹⁸ / _{22,5}		$KC_{прог} = 9,16 + 3,04\sqrt{t}$	8
C ²⁵ / ₃₀		$KC_{прог} = 9,84 + 1,65\sqrt{t}$	31
C ¹² / ₁₅	10	$KC_{прог} = 7,44 + 2,17\sqrt{t}$	21
C ¹⁸ / _{22,5}		$KC_{прог} = 8,49 + 2,44\sqrt{t}$	15
C ²⁵ / ₃₀		$KC_{прог} = 9,07 + 1,73\sqrt{t}$	33
C ¹² / ₁₅	15	$KC_{прог} = 6,09 + 2,33\sqrt{t}$	24
C ¹⁸ / _{22,5}		$KC_{прог} = 7,34 + 2,04\sqrt{t}$	28
C ²⁵ / ₃₀		$KC_{прог} = 7,92 + 1,85\sqrt{t}$	36
C ¹² / ₁₅	20	$KC_{прог} = 4,84 + 2,48\sqrt{t}$	26
C ¹⁸ / _{22,5}		$KC_{прог} = 5,9 + 1,66\sqrt{t}$	56
C ²⁵ / ₃₀		$KC_{прог} = 6,47 + 2,03\sqrt{t}$	38
C ¹² / ₁₅	25	$KC_{прог} = 4,07 + 2,58\sqrt{t}$	27
C ¹⁸ / _{22,5}		$KC_{прог} = 4,94 + 1,31\sqrt{t}$	106
C ²⁵ / ₃₀		$KC_{прог} = 5,61 + 2,12\sqrt{t}$	40

Ранее в работе [8] была представлена модель развития карбонатной составляющей по сечению бетона, описываемая пятипараметрическим уравнением вида

$$KC(x) = \beta_0 + \beta_1 e^{-\left(\frac{x-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}}, \quad (4)$$

где $\beta_0 - \beta_4$ – параметры, определяемые методом наименьших квадратов.

Многолетние исследования карбонизации бетона по сечению длительно эксплуатируемых конструкций [9] позволили оценить параметры $\beta_0 - \beta_4$ для различных классов бетона по прочности из условия полной карбонизации бетона. Так, для бетона класса C¹²/₁₅ выражение (4) принимает вид

$$KC(x) = 2,56 + 23,88 e^{-\left(\frac{x+5}{28,5}\right)^{1,2}}, \quad (5)$$

класса C¹⁸/_{22,5} –

$$KC(x) = 4,02 + 26,87 e^{-\left(\frac{x+5}{20,5}\right)^{1,2}}, \quad (6)$$

класса C²⁰/₂₅ –

$$KC(x) = 4,66 + 31,60 e^{-\left(\frac{x+5}{16,0}\right)^{1,2}}, \quad (7)$$

где x – исследуемая толщина защитного слоя бетона, мм.

Из выражений (5)–(7) получаем коэффициент k , учитывающий характер изменения карбонатной составляющей по сечению бетона для различных классов по прочности. Так, для бетона класса C¹²/₁₅

$$k = e^{-\left(\frac{x+5}{28,5}\right)^{1,2}}, \quad \text{класса } C^{18}/_{22,5} \quad - \quad k = e^{-\left(\frac{x+5}{20,5}\right)^{1,2}},$$

$$\text{класса } C^{20/25} - k = e^{-\left(\frac{x+5}{16,0}\right)^{1,2}}$$

Из выражений (2), (3) получаем уравнения для определения изменения карбонатной составляющей во времени:

$$KC_{\text{прог}}^x = KC_0^x + B\sqrt{t}; \quad (8)$$

$$KC_{\text{прог}}^x = KC_{\phi}^x + B(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_{\phi}}), \quad (9)$$

где B – коэффициент, учитывающий развитие карбонизации во времени по сечению бетона.

Поскольку в [6] области значений KC приведены для различных толщин защитного слоя (2–30 мм), коэффициенты B для различных классов бетона по прочности и толщин защитного слоя получаем, принимая за среднее значение толщины защитного слоя $x = 15$ мм.

На основании приведенных выражений получены зависимости изменения во времени карбонизации по сечению бетона для различных толщин защитного слоя бетона, классов по прочности $C^{12/15} - C^{25/30}$ для условий повышенной карбонизации конструкций, эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственных помещений.

В качестве примера на рисунке 1 представлены регрессионные зависимости изменения во времени показателя KC для различных толщин защитного слоя бетона класса $C^{18/22,5}$ для условий сельскохозяйственных зданий, а на рисунке 2 – модель развития карбонизации по сечению бетона во

времени для аналогичных бетона и условий эксплуатации.

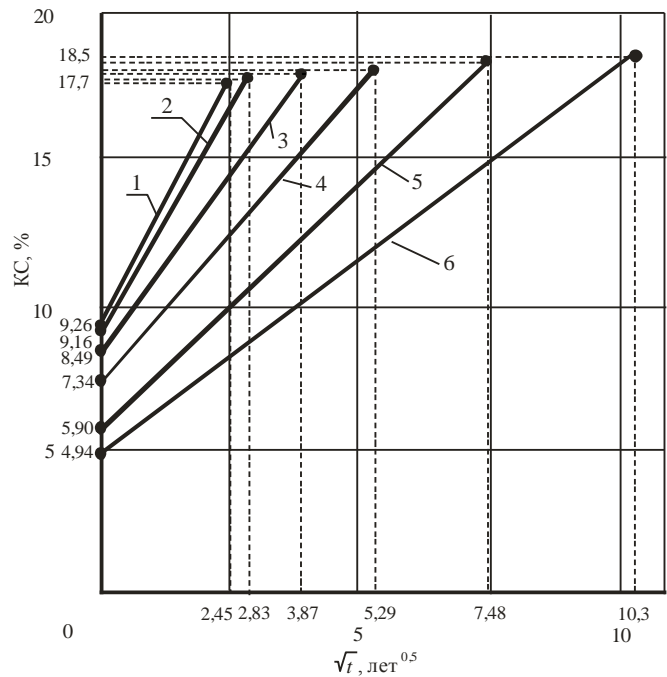


Рисунок 1 – Регрессионные зависимости изменения во времени показателя KC для различных толщин защитного слоя бетона класса $C^{18/22,5}$ для ЖБК, эксплуатирующихся в сельскохозяйственных зданиях в условиях повышенной карбонизации:

$$1 - x = 2,5 \text{ мм}; KC_{\text{прог}} = 9,26 + 3,44\sqrt{t}; 2 - x = 5,0 \text{ мм}; KC_{\text{прог}} = 9,16 + 3,04\sqrt{t};$$

$$3 - x = 10 \text{ мм}; KC_{\text{прог}} = 8,49 + 2,44\sqrt{t}; 4 - x = 15 \text{ мм}; KC_{\text{прог}} = 7,34 + 2,04\sqrt{t};$$

$$5 - x = 20 \text{ мм}; KC_{\text{прог}} = 5,90 + 1,66\sqrt{t}; 6 - x = 25 \text{ мм}; KC_{\text{прог}} = 4,94 + 1,31\sqrt{t}.$$

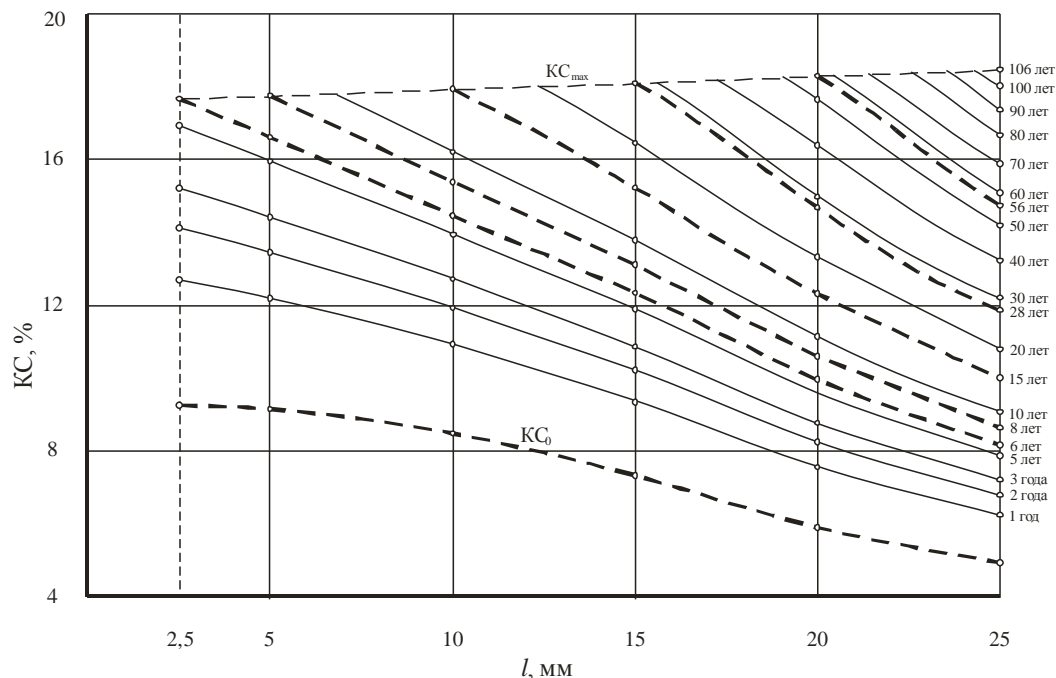


Рисунок 2 – Развитие карбонизации бетона класса $C^{18/22,5}$ для ЖБК, эксплуатирующихся в сельскохозяйственных помещениях в условиях повышенной карбонизации

Полученные результаты показывают, что интенсивность карбонизации с увеличением глубины снижается по экспоненциальной зависимости. При не-

значительной толщине защитного слоя (до 10 мм), что постоянно наблюдается в конструкциях, изготовленных на предприятиях сельстройиндустрии,

нейтрализация бетона в условиях повышенной карбонизации достигает предельных значений уже через 10 лет.

Однако, несмотря на такие минимальные значения долговечности бетона в части сохранения им своих защитных свойств по отношению к арматуре, результаты исследования развития во времени карбонизации реально эксплуатирующихся конструкций дают заниженные значения скорости карбонизации, что указывает на необходимость углубленного изучения процесса гидратации цемента в конструкциях, подвергающихся ТВО.

Выводы. Результаты исследований позволили сделать следующие выводы:

1 Изучение развития карбонизации как во времени, так и по сечению бетона с учетом начальной карбонизации бетона, различных толщин защитного слоя, изначального класса бетона по прочности, изменения степени гидратации цемента во времени, дали возможность получить выражения для прогнозирования карбонизации бетона во времени в зоне расположения арматуры (для конкретной толщины защитного слоя бетона) в зависимости от степени интенсивности карбонизации.

2 Полученные зависимости позволяют:

– на стадии проектирования закладывать класс бетона по прочности на сжатие с учетом предполагаемых условий эксплуатации и требуемой долговечности;

– в зависимости от полученных на момент обследования значений карбонатной составляющей и толщины защитного слоя бетона, а также с учетом возраста конструкции, оценить интенсивность карбонизации и в зависимости от существующих (предполагаемых условий эксплуатации) подобрать выра-

жение для прогнозирования скорости карбонизации и оценить остаточный срок службы конструкции до полной карбонизации бетона.

Список литературы

1 **Алексеев, С. Н.** Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. – М. : Стройиздат, 1976. – 205 с.

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

3 **Васильев, А. А.** Исследование механизма и кинетики карбонизации железобетонных конструкций / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2006. – № 1 (4). – С. 52–57.

4 **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.

5 **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.

6 **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.

7 **Исследование** скорости развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2009. – № 2 (19). – С. 80–85.

8 **Модель** карбонизации бетона по сечению конструкций / А. А. Васильев [и др.] // Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса: материалы II междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2008. – С. 259–260.

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, S. V. Dzirko, D. S. Stepanyov, A. M. Ovsiankina, E. O. Adarchenko. Investigation of concrete carbonisation velocity progress in the aggressive environment.

It was specified the concrete carbonisation model against time in the aggressive environment which allows using the obtained carbonisation component (CC) parameter in the area of reinforcement location at the moment of the construction emanation to perform the forecasting of carbonisation development taking into consideration initial concrete carbonisation, its strength characteristics, cement hydration degree change against time, environment aggressiveness intensity.