

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 691.32.001.5

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Д. И. ШЕВЧЕНКО, кандидат технических наук, В. П. КУЦ, инженер, Л. В. ПЛИКУС, инженер, Е. О. АДАРЧЕНКО, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛЬ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНОСТИ СРЕДЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

На основании дополнительных исследований карбонизации бетона, как свежееизготовленных образцов, так и длительно эксплуатируемых конструкций уточнена модель карбонизации во времени по сечению бетона железобетонных элементов (ЖБЭ), эксплуатирующихся в условиях сельскохозяйственных помещений, учитывающая его начальную карбонизацию, изменение степени гидратации цемента во времени и величину предельной карбонизации. Полученная модель карбонизации бетона позволяет на стадии проектирования в зависимости от предполагаемых условий эксплуатации принимать класс бетона по прочности для ЖБЭ сельскохозяйственных зданий для обеспечения их необходимой долговечности.

Введение. Степень интенсивности карбонизационных процессов определяется множеством факторов, среди которых определяющим являются условия эксплуатации. Сельскохозяйственные помещения отличаются повышенными влажностью воздуха и концентрацией углекислого газа. К тому же, большая протяженность зданий такого типа обуславливает некоторые различия воздушной среды и характеризующих ее параметров по длине здания. Так, по торцам здания процессы смены воздушной среды идут более интенсивно за счет проветривания (открытых ворот), вместе с тем, для данных участков характерно интенсивное размораживание бетона под воздействием отрицательных температур. В средней части здания (по длине) влажность и концентрация углекислого газа выше, но колебания их значений меньше по сравнению с торцевыми участками. Таким образом, конструкции, эксплуатирующиеся в одном помещении, подвергаются различному воздействию агрессивных агентов воздушной среды в течение длительного времени, что обуславливает их неравноценную поврежденность.

Основная часть. Ранее, в [1, 2], на основании исследования развития карбонизации бетона во времени, как защитного слоя, в зоне расположения арматуры, так и по сечению бетона свежееизготовленных образцов и длительно эксплуатируемых ЖБЭ была предложена модель карбонизации бетона в агрессивных атмосферных условиях сельскохозяйственных помещений. Вычисленные в соответствии с данной моделью абсолютные величины карбонатной составляющей для различных сроков эксплуатации ЖБЭ и классов бетона по прочности на сжатие несколько отличаются от величин, полученных по результатам исследования бетона реально эксплуатируемых ЖБЭ. Таким образом, скорость карбонизации бетона в соответствии с предлагаемой моделью несколько ниже реальной карбонизации в эксплуатируемых ЖБЭ. Кроме того, в [1] было показано, что карбонизация бетона в агрессивных условиях развивается неравномерно, присутствуют две зоны с обычным и ускоренным ее развитием. В предложенной модели исследовались обе зоны с учетом начальной карбонизации, однако, для прогнозирования скорости карбонизации бетона различных классов по прочности принимались усредненные значения показателя карбо-

натной составляющей (КС) в зонах с обычной и ускоренной карбонизацией, зоны не делились на «низкомарочные» и «высокомарочные» бетоны.

Приведенное выше указывает на необходимость уточнения прогнозной модели.

В [2] была предложена модель изменения показателя КС по сечению для свежееизготовленных бетонов (после ТВО)

$$KC(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{-\left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}}, \quad (1)$$

где β_0 – коэффициент, определяющий наименьшее значение $KC(l)$ (обычно, $\beta_0 = KC(l > 100 \text{ мм})$); β_1 – коэффициент, определяющий разность минимального и максимального значения $KC(l)$; β_2 – коэффициент, определяющий минимальное значение глубины l (обычно, $\beta_2 = 0$), β_3 – коэффициент, определяющий форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_3 > 0$; β_4 – коэффициент, определяющий форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_4 > 0$.

Параметры $\beta_i (i = 0, 1, \dots, 4)$ нелинейной функции (1) определяются численно на ЭВМ методом наименьших квадратов.

Для определения начальных параметров карбонизации дополнительно исследовали кубики сечением $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$, выполненные в заводских условиях из бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15}$, $C^{16}/_{20}$, $C^{18}/_{22,5}$, $C^{20}/_{25}$, $C^{25}/_{30}$ различных составов, применяемых при изготовлении колонн. После изготовления кубики подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) по стандартному режиму. Результаты исследований позволили определить начальные параметры $\beta_0 - \beta_4$ (таблица 1).

Таблица 1 – Значения параметров $\beta_i (i = 0, 1-4)$ в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие

Класс бетона по прочности на сжатие	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
$C^{12}/_{15}$	3,56	5,32	0	4,9	0,7
$C^{16}/_{20}$	3,92	9,62	-1	2,8	0,6
$C^{18}/_{22,5}$	4,11	8,68	0	2,6	0,5
$C^{20}/_{25}$	4,35	23,3	-0,1	0,30	0,3
$C^{25}/_{30}$	4,99	50,2	-0,1	0,11	0,3

Модель изменения показателя КС в зоне расположения арматуры во времени для постоянного значения толщины защитного слоя

$$КС(t/l = \text{const}) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t}, \quad (2)$$

где α_0 – показатель начальной карбонизации, %; α_1 – показатель скорости карбонизации; t – величина прогнозного периода, лет.

Параметры α_i ($i = 0, 1$) линейной функции регрессии (2) определяются по экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Для уточнения скорости карбонизации исследовали зоны с обычной и повышенной карбонизацией, при этом:

– начальную карбонизацию ($КС_0$) определяли для усредненной толщины защитного слоя $l = 15$ мм, поскольку в исследуемых областях значения КС определяли для толщин защитного слоя 5–25 мм;

– для среднего класса бетона по прочности ($C^{18}/_{22,5}$) исследовали всю область значений КС в каждой отдельной зоне (рисунок 1);

– для классов бетона по прочности выше (ниже) $C^{18}/_{22,5}$ исследовали часть зоны, лежащую соответственно ниже (выше) линии, определяемой регрессионной зависимостью \sqrt{t} – КС для бетона класса $C^{18}/_{22,5}$ (рисунок 1).

Исследования карбонизации длительно эксплуатируемых ЖБЭ в зоне расположения арматуры с учетом начальной карбонизации для различных классов бетона по прочности позволили получить регрессионные зави-

симости развития карбонизации в условиях агрессивных воздушных сред (таблица 2).

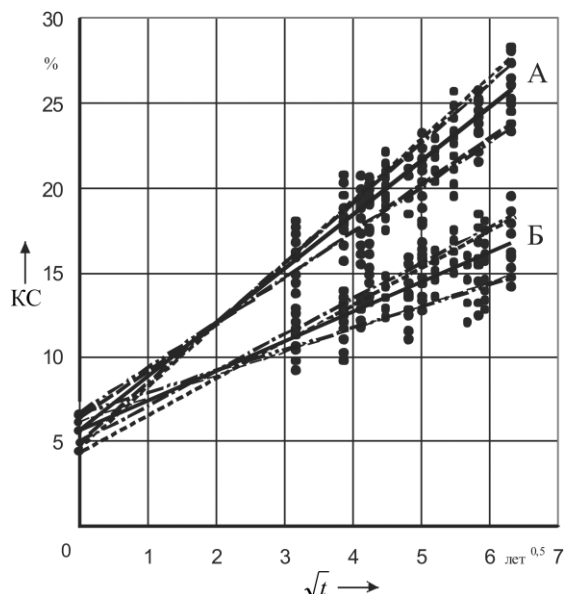


Рисунок 1 – Регрессионная зависимость карбонизации бетона в условиях сельскохозяйственных помещений:

А – область повышенной карбонизации;

Б – область обычной карбонизации

- – класс бетона по прочности $C^{12}/_{15}$
- · - · - · – класс бетона по прочности $C^{16}/_{20}$
- – класс бетона по прочности $C^{18}/_{22,5}$
- – класс бетона по прочности $C^{20}/_{25}$
- · - · - · – класс бетона по прочности $C^{25}/_{30}$

Таблица 2 – Регрессионные зависимости изменения показателя КС в защитном слое бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Область повышенной карбонизации	Область обычной карбонизации
$C^{12}/_{15}$	$КС_{\text{прог}} = 4,40 + 3,68\sqrt{t}$	$КС_{\text{прог}} = 4,30 + 2,21\sqrt{t}$
$C^{16}/_{20}$	$КС_{\text{прог}} = 4,90 + 3,56\sqrt{t}$	$КС_{\text{прог}} = 4,90 + 2,10\sqrt{t}$
$C^{18}/_{22,5}$	$КС_{\text{прог}} = 5,50 + 3,16\sqrt{t}$	$КС_{\text{прог}} = 5,40 + 1,75\sqrt{t}$
$C^{20}/_{25}$	$КС_{\text{прог}} = 5,90 + 2,77\sqrt{t}$	$КС_{\text{прог}} = 5,90 + 1,41\sqrt{t}$
$C^{25}/_{30}$	$КС_{\text{прог}} = 6,50 + 2,66\sqrt{t}$	$КС_{\text{прог}} = 6,50 + 1,29\sqrt{t}$

Полученные регрессионные зависимости показывают, что скорость карбонизации независимо от степени агрессивности эксплуатационной среды зависит от класса бетона по прочности (количества использованного цемента).

Для объединения двух полученных моделей необходимо значительное количество однотипных экспериментальных данных по карбонизации бетонов различных возрастов на различных глубинах для одинаковых составов, классов по прочности и т. д., в связи со сложностью их получения предложена эвристическая модель КС (t, l), базирующаяся на следующих допущениях:

– для каждого возраста бетона справедлива модель карбонизации по сечению бетона (1) за тем лишь исключением, что различные значения (для разных возрастов бетона) может принимать параметр β_1

$$КС(t, l) = \beta_0 + \beta(t) e^{\left(-\left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}; \quad (3)$$

– для только что изготовленного бетона $\beta(t=0) = \beta_1$, а для иных моментов времени $\beta(t)$ определяется решением уравнения

$$КС(l/t=15) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} = \beta_0 + \beta_1(t) e^{\left(-\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}. \quad (4)$$

$$\text{Следовательно, } \beta(t) = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0}{e^{\left(-\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}}. \quad (5)$$

В итоге общая эвристическая модель карбонизации во времени по сечению бетона $КС(t, l)$

$$КС(t, l) = \beta_0 + \left(\alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0\right) e^{\left(\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4} - \left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}, \quad (6)$$

где x – исследуемая толщина защитного слоя бетона, мм.

Полученные на основании выполненных исследований и расчетов модели карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{25/30}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред

сельскохозяйственных зданий представлены в таблице 3.

Приведенные модели показывают, что независимо от степени карбонизации, с повышением прочности на сжатие бетона скорость карбонизации снижается.

Таблица 3 – Модели карбонизации для различных классов бетона по прочности и степени агрессивности эксплуатационной среды

Класс бетона по прочности на сжатие	Область повышенной карбонизации	Область нормальной карбонизации
$C^{12/15}$	$KC(l,t) = 3,56 + (0,84 + 3,68\sqrt{t})e^{\left(2,19 - \frac{(l-0)^{0,7}}{4,9}\right)}$	$KC(l,t) = 3,56 + (0,74 + 2,21\sqrt{t})e^{\left(2,18 - \frac{(l-0)^{0,7}}{4,9}\right)}$
$C^{16/20}$	$KC(l,t) = 3,92 + (1 + 3,56\sqrt{t})e^{\left(2,73 - \frac{(l+1)^{0,6}}{2,8}\right)}$	$KC(l,t) = 3,92 + (0,98 + 2,10\sqrt{t})e^{\left(2,84 - \frac{(l+1)^{0,6}}{2,8}\right)}$
$C^{18/22,5}$	$KC(l,t) = 4,11 + (1,36 + 2,77\sqrt{t})e^{\left(2,4 - \frac{(l-0)^{0,5}}{2,6}\right)}$	$KC(l,t) = 4,11 + (1,29 + 1,75\sqrt{t})e^{\left(2,4 - \frac{(l-0)^{0,5}}{2,6}\right)}$
$C^{20/25}$	$KC(l,t) = 4,35 + (1,59 + 2,77\sqrt{t})e^{\left(3,24 - \frac{(l+0,1)^{0,3}}{0,3}\right)}$	$KC(l,t) = 4,35 + (1,55 + 1,41\sqrt{t})e^{\left(3,24 - \frac{(l+0,1)^{0,3}}{0,3}\right)}$
$C^{25/30}$	$KC(l,t) = 4,99 + (1,53 + 3,09\sqrt{t})e^{\left(4,38 - \frac{(l+0,1)^{0,3}}{0,11}\right)}$	$KC(l,t) = 4,99 + (1,51 + 1,29\sqrt{t})e^{\left(4,38 - \frac{(l+0,1)^{0,3}}{0,11}\right)}$

Модели карбонизации бетонов классов по прочности $C^{25/30}$ и $C^{12/15}$ для различных степеней агрессивности эксплуатационной среды сельскохозяйственных зданий представлены на рисунках 2 и 3. Приведенные модели показывают развитие карбонизации с момента изготовления бетона до возраста 100 лет по сече-

нию бетона до глубины 50 мм. Модели построены для дискретных значений возраста бетона. Для получения величин карбонатной составляющей для промежуточных значений возраста бетона необходимо интерполировать значения двух ближайших кривых к искомому возрасту.

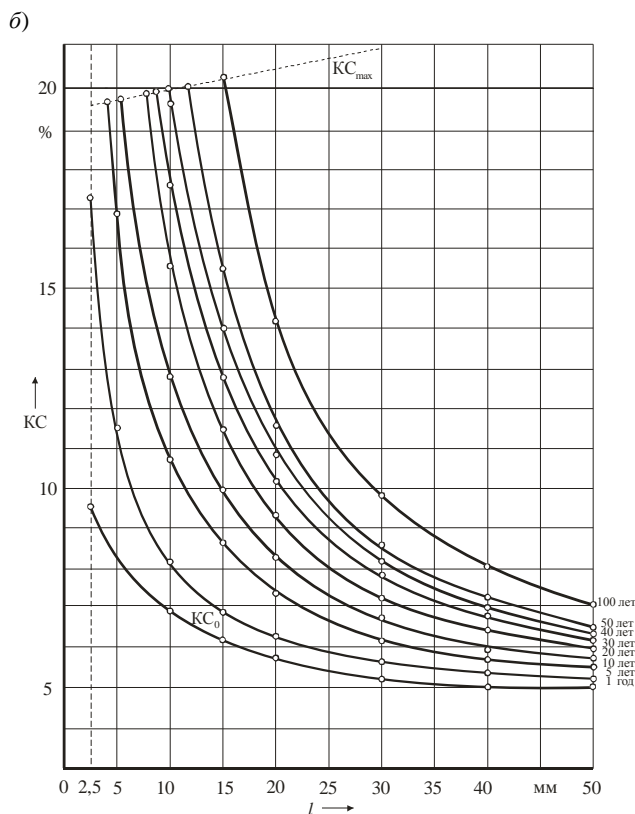
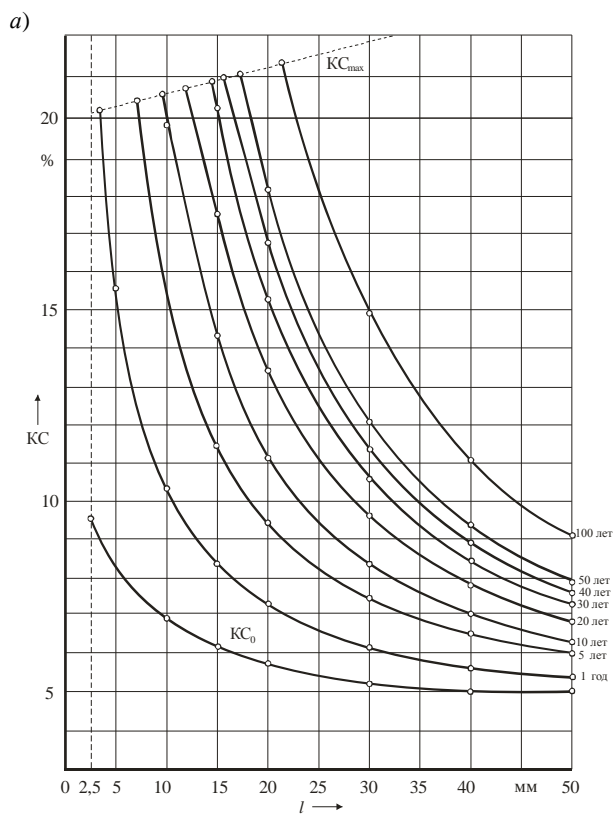


Рисунок 2 – Модели карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{25/30}$ для условий сельскохозяйственных помещений: а – область повышенной карбонизации; б – область обычной карбонизации

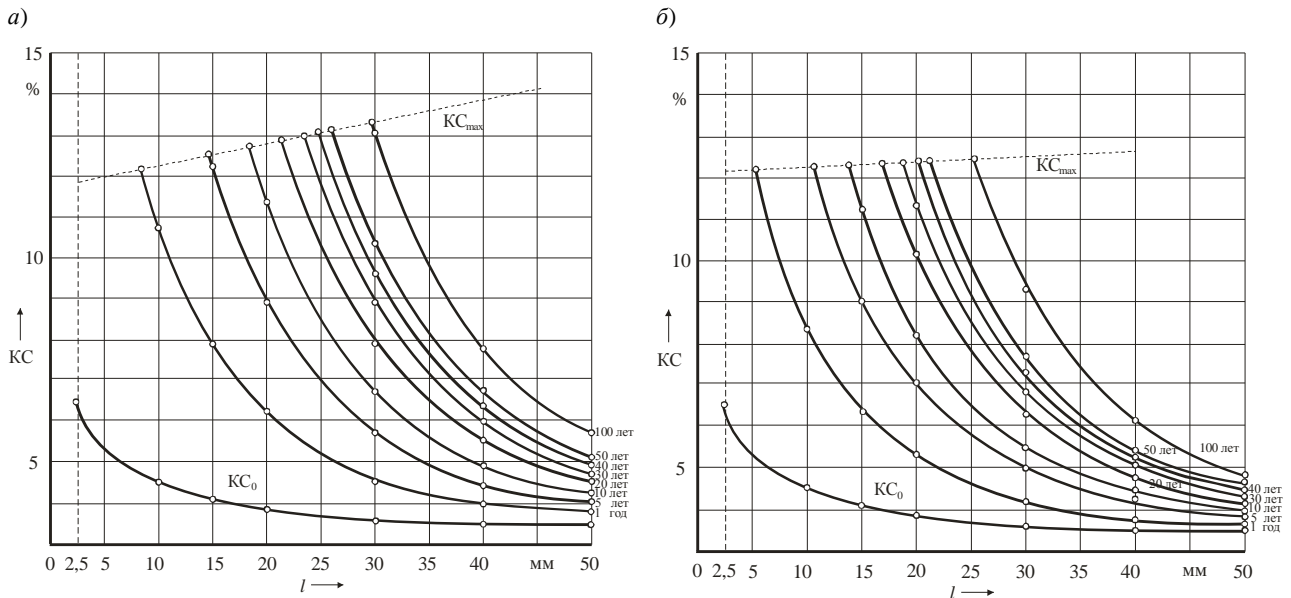


Рисунок 3 – Модели карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{12}/15$ для условий сельскохозяйственных помещений:
 а – область повышенной карбонизации; б – область обычной карбонизации

Максимальную величину карбонизации $КС_{max}$ определяли с учетом предельной величины карбонизации (ПВК) бетона и изменения степени гидратации цемента (α) во времени. Методики определения ПВК по известному составу бетона, степени гидратации цемента и ее изменения во времени приведены в [3], а методика определения $КС_{max}$ – в [4].

Заключение. Приведенные модели достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования карбонизации по сечению ЖБЭ, эксплуатируемых длительные сроки в условиях сельскохозяйственных помещений. Они позволяют на стадии проектирования в зависимости от предполагаемых условий эксплуатации конструкций сельскохозяйственных зданий закладывать класс бетона по прочности для обеспечения необходимой долговечности ЖБЭ.

Получено 28.11.2011

A. A. Vasilyev, D. N. Shevchenko, V. P. Kuts, L. V. Plikus, E. O. Adarchenko. Model of concrete carbonation in the conditions of agricultural building environment aggressiveness.

On the basis of additional investigation of concrete carbonation both of freshly made samples and long term exploited constructions it was specified the model of carbonation against time at cross section of reinforced concrete elements (RCE), maintained in the conditions of agricultural buildings, taking into consideration their initial carbonation, change of cement hydration degree in time and the value of carbonation limit. The obtained carbonation model allows on the stage of design dependent of supposed exploitation conditions to adopt the concrete strength class for RCE of agricultural buildings to provide their necessary durability.

Список литературы

- 1 **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.
- 2 **Исследование** скорости развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2010. – № 1 (20). – С. 109–112.
- 3 **Неразрушающие** методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / 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.
- 4 **Васильев, А. А.** Оценка существующей модели карбонизации / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2009. – № 1 (22). – С. 54–58.