

УДК 693.54

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА
ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СРЕДЫ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ****канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ****(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)**

Выполнены исследования карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности сразу после изготовления бетона с применением тепловлажностной обработки (ТВО) и в зоне расположения арматуры железобетонных элементов (ЖБЭ), эксплуатировавшихся длительные сроки в условиях жилых и общественных помещений. Методами регрессионного и корреляционного анализов получены регрессионные зависимости развития карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности сразу после ТВО и изменения во времени карбонизации в зоне расположения арматуры ЖБЭ, эксплуатировавшихся длительное время в условиях жилых и общественных помещений. На основе полученных зависимостей построены эвристические расчетно-экспериментальные модели карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности ЖБЭ, для условий различной агрессивности воздушных сред жилых и общественных помещений. Предлагаемые модели достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования карбонизации по сечению ЖБЭ, эксплуатируемых длительные сроки в условиях жилых и общественных зданий.

Введение. Выполненные ранее исследования развития карбонизации бетона в условиях агрессивной среды позволили получить выражения для прогнозирования карбонизации бетона для усредненных толщин защитного слоя для свежизготовленных конструкций и по полученному на момент обследования значению карбонатной составляющей (КС) для эксплуатируемых конструкций [1]. Полученные регрессионные зависимости разработаны для усредненных значений толщин защитного слоя бетона и носят общий характер: не учитывают начальной карбонизации, прочность бетона на сжатие, а также различные факторы, в значительной степени определяющие скорость и степень карбонизации, что не позволяет с необходимой и достаточной точностью прогнозировать развитие карбонизации бетона.

Многолетние исследования карбонизации бетона в реальных условиях эксплуатации ЖБЭ показывают, что для создания модели развития карбонизации бетона во времени необходимо увеличение анализируемой выборки с исключением значений, являющихся «выбросами», обусловленными влиянием различных факторов, учет начальных параметров карбонизации (KC_0), исследование изменения карбонизации по сечению бетона, а также других факторов, определяющих параметры карбонизации.

Целью данной работы явилось построение моделей развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности для условий эксплуатации жилых и общественных зданий.

Объектами исследования служили железобетонные элементы различных типов, эксплуатировавшиеся длительные сроки в различных условиях жилых и общественных помещений, свежизготовленные бетонные кубики сечением $100 \times 100 \times 100$ мм, выполненные из бетонов различных классов по прочности по составу для колонн (поскольку колонны являются массивными элементами, позволяющими наиболее полно проследить развитие карбонизации по сечению).

Для анализа из эксплуатируемых конструкций отбирали образцы бетона (сколы) в зоне расположения арматуры, а также порошки, получаемые выбуриванием по сечению бетона до глубины 100 мм. Аналогично выбуриванием до глубины 50 мм получали образцы из бетонных кубиков.

Исследовали цементно-песчаную фракцию бетона.

Карбонатную составляющую (показатель КС) определяли объемно-газовым методом [2].

Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

Исследование начальной карбонизации бетона. Чтобы определить начальные параметры карбонизации, исследовали кубики сечением $100 \times 100 \times 100$ мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности $C^{12}/_{15}$, $C^{16}/_{20}$, $C^{18}/_{22,5}$, $C^{20}/_{25}$, $C^{25}/_{30}$ и $C^{30}/_{37}$ различных составов, применяемых при изготовлении колонн. После изготовления кубики подвергали тепловлажностной обработке по стандартному режиму.

Составы бетона приведены в таблице 1.

При изготовлении кубиков был использован цемент марки ПЦ500 Костюковичского завода. Для различных составов бетона по прочности на один класс бетона получены зависимости одного характера с близкими, но не одинаковыми значениями KC_0 . Для дальнейшего анализа усредняем значения KC_0 для каждого класса бетона по прочности. Полученные зависимости $l - KC_0$ представлены на рисунке 1.

Таблица 1

Составы образцов бетона

Класс бетона по прочности	В/Ц	Состав смеси, кг/м ³				
		Ц	П	Щ	В	С-3 (П-7)
C ¹² / ₁₅	0,45	255	720	1270	115	17,9
	0,52	169	937	1125	169	–
	0,5	305	830	1250	154	12
C ¹⁶ / ₂₀	0,51	280	830	1180	143	11
	0,29	258	920	1200	75	10(П-7)
	0,28	285	870	1254	80	15(П-7)
C ¹⁸ / _{22,5}	0,39	407	730	1190	162	–
	0,42	465	720	1120	195	–
	0,40	36	780	1200	145	–
C ²⁰ / ₂₅	0,37	365	750	1270	135	15
	0,22	443	784	1175	100	17,7
	0,23	303	881	1253	69	11(П-7)
C ²⁵ / ₃₀	0,32	420	620	1270	135	12
	0,26	396	738	1281	106	15
	0,34	381	681	1218	131	15
C ³⁰ / ₃₇	0,22	485	775	1260	105	19(П-7)
	0,21	390	880	1700	81	15(П-7)
	0,25	540	610	1270	135	4

В/Ц – водоцементное отношение. Ц, П, Щ, В – массы цемента, песка, щебня, воды (кг), приняты по данным заводской лаборатории без учета влажности заполнителей.

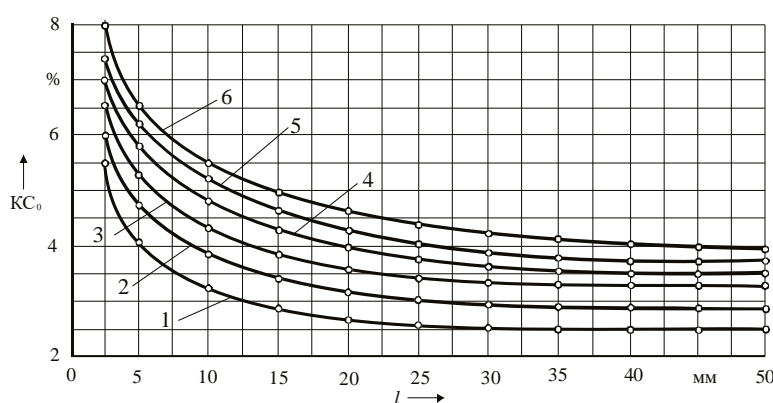


Рис. 1. Распределение показателя КС по сечению образцов бетона сразу после ТВО для классов бетона по прочности: 1 – C¹²/₁₅; 2 – C¹⁶/₂₀; 3 – C¹⁸/_{22,5}; 4 – C²⁰/₂₅; 5 – C²⁵/₃₀; 6 – C³⁰/₃₇

Построение математической модели, адекватно отражающей процесс карбонизации бетона по сечению бетона, осуществлялось на основе экспериментальных данных с использованием методов регрессионного и корреляционного анализа. При этом подборе аппроксимирующей регрессионной кривой следуют двум противоречивым тенденциям, между которыми нужно искать компромисс:

- 1) с одной стороны, уравнение кривой стремятся усложнить для лучшего сглаживания экспериментальных точек (в случае сложных полиномов аппроксимация иногда превращается в интерполяцию);
- 2) с другой стороны, сложные аппроксимирующие функции обладают плохими предсказательными возможностями и содержат в своем составе большое число параметров, требующих оценки.

Кроме того, при выборе аппроксимирующей кривой необходимо учитывать суть происходящих физико-химических процессов деградации свойств бетона по сечению l .

Часто аппроксимирующая кривая удовлетворяет вышеперечисленным требованиям (хорошее сглаживание, соответствие здравому смыслу и т.п.) только на некотором интервале значений влияющей величины глубины l . Поэтому на разных интервалах используют различные аппроксимирующие кривые. Формальным критерием качества сглаживания точек интерполирующей кривой является коэффициент детерминации R^2 . Чем лучше кривая интерполирует точки, тем ближе R^2 к единице.

Представим основные требования к аппроксимирующей функции $КС(l)$:

- 1) непрерывность функции карбонизации $КС(l)$ на интервале значений глубины $0 < l < 0,1$ м;

2) монотонное убывание $KC(l)$ на этом же интервале (производная функции $KC(l)$ на заданном интервале меньше нуля);

3) скорость убывания функции $KC(l)$ уменьшается с ростом значения l (т.е. $KC(l_1) > KC(l_2)$ при $l_1 < l_2$).

При подборе уравнения зависимости $KC(l)$ наилучшие результаты (хорошее сглаживание точек, большой R^2 , соответствие здравому смыслу и заданным выше требованиям) дали пятипараметрические уравнения вида

$$KC(l) = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \cdot l) / (\alpha_3 + \alpha_4 \cdot l^3); \quad (1)$$

$$KC(l) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \exp(-(l - \beta_2) / \beta_3) \beta_4, \quad (2)$$

где параметры α_i и β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) определяются методом наименьших квадратов, известным в математической статистике и реализованным, например, в пакетах Statgraphics или MathCAD.

Достоинством уравнения (1) является возможность аналитического определения параметров β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) методом наименьших квадратов, а достоинствами уравнения (2) – большее, как правило, по сравнению с уравнением (1) значение R^2 ; функция удовлетворяет предъявляемым требованиям на всем множестве значений параметров; наличие конкретного физического смысла ее параметров β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$).

Параметр β_0 определяет наименьшее значение $KC(l)$ (обычно $\beta_0 = KC(0, 1 \text{ м})$); β_1 – разность минимального и максимального значения $KC(l)$, β_2 – минимальное значение l (обычно, $\beta_2 = 0$), $\beta_3 > 0$ и $\beta_4 > 0$ определяют форму кривой и координаты точек перегиба.

Основным недостатком функции (2) является невозможность аналитического определения ее параметров методом наименьших квадратов (в том числе с помощью пакетов компьютерной математики и статистического анализа данных) в силу нелинейности функции по параметрам. Единственным подходом видится численное решение задачи оценки параметров β_i с перебором всех возможных значений параметров для минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии. Сложность реализации данного подхода заключается в следующем:

- наличие локальных минимумов суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии, что обуславливает полный перебор всех возможных значений параметров;
- перебор всех возможных значений параметров с точностью каждого из них в 3 значащие цифры требует $(10^3)^5 = 10^{15}$ итераций (здесь 5 – количество оцениваемых параметров).

Однако удалось уменьшить количество перебираемых параметров до двух (β_2 и β_3), определяя значения других параметров аналитически для заданных значений (β_2 и β_3). Таким образом, количество итераций удалось сократить до $(10^3)^2 = 10^6$, что требует нескольких минут машинного времени.

В дальнейшем для определения параметров уравнения регрессии будет использоваться метод случайного поиска, который предоставляет следующие возможности:

- за незначительное машинное время позволяет получать приемлемое по точности решение;
- за большее машинное время дает более точное решение;
- позволяет получать оценки параметров модели с точностью, ограниченной лишь представлением вещественных чисел в ЭВМ;
- позволит определять как локальные, так и глобальные минимумы суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии.

Дополнительной особенностью предлагаемого подхода определения параметров регрессионной модели (2) карбонизации бетона по сечению является реализация взвешенного метода наименьших квадратов. Предложено использовать экспоненциальную весовую функцию $\lambda \exp(\lambda l)$, управляя параметром которой (λ) можно минимизировать сумму квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии, в первую очередь для малых значений l .

Полученная математическая модель карбонизации бетона и подход определения ее параметров позволит увеличить точность прогноза по сравнению с используемыми моделями (степенной функцией в пакете Excel и эвристической кривой). При разработке модели карбонизации принимали, что после глубины 50 мм скорость развития карбонизации постоянна для любого класса бетона по прочности. За граничное значение $l_{(\infty)}$ принимали $l = 100 \text{ мм}$.

Модель изменения показателя KC_0 по сечению для свежизготовленных бетонов (после ТВО):

$$KC_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left(-\left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}, \quad (3)$$

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 значений $KC(l)$; β_2 – коэффи-

циент, 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 β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) нелинейной функции (3) определялись численно на ЭВМ методом наименьших квадратов [3] и приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения параметров β_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
$C^{12}/_{15}$	2,42	4,79	1,0	3,50	0,65
$C^{16}/_{20}$	2,86	10,0	-2,0	3,00	0,60
$C^{18}/_{22,5}$	3,31	13,5	-3,0	2,75	0,60
$C^{20}/_{25}$	3,47	16,5	-4,0	2,60	0,55
$C^{25}/_{30}$	3,60	20,1	-4,1	2,30	0,51
$C^{30}/_{37}$	3,87	24,0	-4,7	2,10	0,50

Полученные модели изменения показателя KC_0 по сечению для свежизготовленных бетонов (после ТВО) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Регрессионные зависимости карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности сразу после ТВО

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетно-экспериментальная модель карбонизации
$C^{12}/_{15}$	$KC_0(l/t=0) = 2,42 + 4,79e^{\left(-\left(\frac{l-1,0}{3,5}\right)^{0,65}\right)}$
$C^{16}/_{20}$	$KC_0(l/t=0) = 2,86 + 10,0e^{\left(-\left(\frac{l+2,0}{3,0}\right)^{0,60}\right)}$
$C^{18}/_{22,5}$	$KC_0(l/t=0) = 3,31 + 13,5e^{\left(-\left(\frac{l+3,0}{2,75}\right)^{0,60}\right)}$
$C^{20}/_{25}$	$KC_0(l/t=0) = 3,47 + 16,5e^{\left(-\left(\frac{l+4,0}{2,6}\right)^{0,55}\right)}$
$C^{25}/_{30}$	$KC_0(l/t=0) = 3,60 + 20,1e^{\left(-\left(\frac{l+4,1}{2,3}\right)^{0,51}\right)}$
$C^{30}/_{37}$	$KC_0(l/t=0) = 3,87 + 24,0e^{\left(-\left(\frac{l+4,7}{2,1}\right)^{0,5}\right)}$

Ранее, в [2], были выполнены исследования развития карбонизации в зоне расположения арматуры ЖБЭ, эксплуатировавшихся длительные сроки в условиях сельскохозяйственных помещений. Они показали, что с учетом влияния эксплуатационной среды для каждого вида условий эксплуатации характерны две зоны – с обычной и повышенной карбонизацией. Это объясняется тем, что, несмотря на то, что ЖБЭ эксплуатируются в одинаковых по назначению помещениях, влияние эксплуатационной среды на них неоднозначно (различное расположение по длине здания, сухие условия для одних и периодические (постоянные) замачивания для других, расположение в торцах у ворот, приводящее к ускоренному размораживанию бетона и т.д.).

В условиях общественных зданий степень воздействия на ЖБЭ агрессивности воздушной среды также неодинакова. Поэтому для уточнения скорости карбонизации исследовали зоны с обычной и ускоренной карбонизацией, при этом для каждой зоны:

- начальную карбонизацию (KC_0) определяли для усредненной толщины защитного слоя $l = 15$ мм, поскольку в исследуемых областях значения KC определяли для толщин защитного слоя 5 – 25 мм;

- исследовали всю область значений KC в каждой отдельной зоне для определения регрессионной зависимости $\sqrt{t} - KC$ для усредненных значений KC ;

- принимали, что значения KC для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$ и $C^{18}/_{22,5}$ лежат выше регрессионной зависимости $\sqrt{t} - KC$ для усредненных значений KC («низкомарочный» бетон карбонизируется быстрее), классов по прочности $C^{20}/_{25}$ и $C^{25}/_{30}$ – ниже средней линии;

- строили регрессионную зависимость $\sqrt{t} - KC$ для усредненных значений KC для каждой пары бетонов, принимали, что область значений выше средней линии, определяемой регрессионной зависимостью $\sqrt{t} - KC$, принадлежит более «низкомарочному» бетону.

Суммарная регрессионная зависимость $\sqrt{t} - KC$ для различных классов бетона по прочности для области ускоренной карбонизации приведена на рисунке 2, области обычной карбонизации – на рисунке 3.

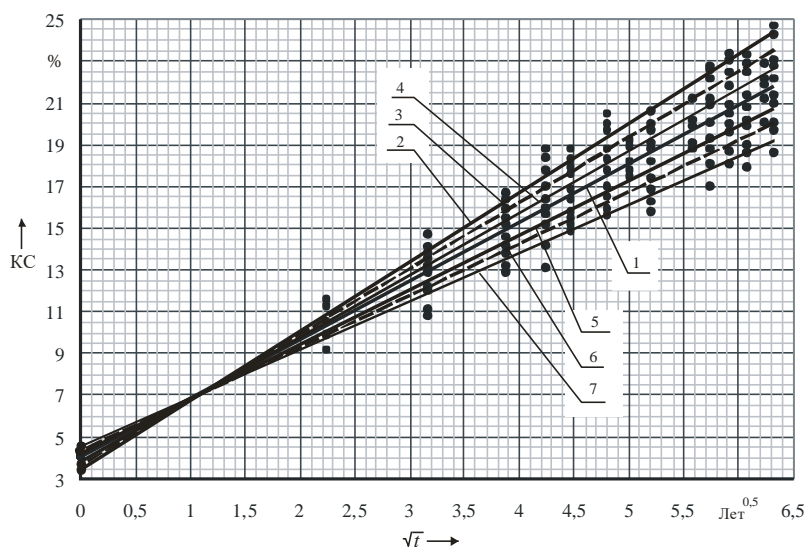


Рис. 2. Регрессионная зависимость $\sqrt{t} - KC$ для условий общественных зданий и области ускоренной карбонизации:

- 1 – общая для области ускоренной карбонизации;
 2 – бетон класса $C^{16}/_{20}$; 3 – усредненная для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$ и $C^{18}/_{22,5}$;
 4 – бетон класса $C^{18}/_{22,5}$; 5 – бетон класса $C^{20}/_{25}$;
 6 – средняя для бетонов классов по прочности $C^{20}/_{25}$ и $C^{25}/_{30}$; 7 – бетон класса $C^{25}/_{30}$

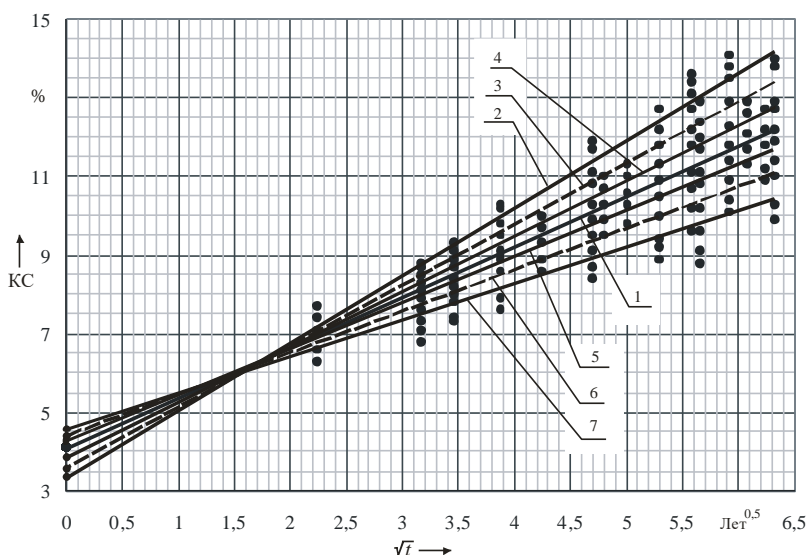


Рис. 3. Регрессионная зависимость $\sqrt{t} - KC$ для условий общественных зданий и области обычной карбонизации:

- 1 – общая для области повышенной карбонизации; 2 – бетон класса $C^{16}/_{20}$;
 3 – средняя для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20}$ и $C^{18}/_{22,5}$;
 4 – бетон класса $C^{18}/_{22,5}$; 5 – бетон класса $C^{20}/_{25}$;
 6 – средняя для бетонов классов по прочности $C^{20}/_{25}$ и $C^{25}/_{30}$; 7 – бетон класса $C^{25}/_{30}$

Модель изменения показателя KC в зоне расположения арматуры во времени для постоянного значения толщины защитного слоя имеет вид

$$KC(t/l = const) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t}, \quad (4)$$

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 (5) определяли по экспериментальным данным методом наименьших квадратов.

Исследования карбонизации длительно эксплуатируемых ЖБЭ в зоне расположения арматуры с учетом начальной карбонизации для различных классов бетона по прочности позволили получить регрессионные зависимости развития карбонизации в условиях различной агрессивности воздушных сред (табл. 4).

Таблица 4

Регрессионные зависимости изменения показателя KC в защитном слое бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Область ускоренной карбонизации	Область обычной карбонизации
$C^{12}/_{15}$	$KC_{прог} = 2,80 + 3,53\sqrt{t}$	$KC_{прог} = 2,80 + 1,90\sqrt{t}$
$C^{16}/_{20}$	$KC_{прог} = 3,48 + 3,30\sqrt{t}$	$KC_{прог} = 3,45 + 1,68\sqrt{t}$
$C^{18}/_{22,5}$	$KC_{прог} = 3,82 + 2,99\sqrt{t}$	$KC_{прог} = 3,80 + 1,42\sqrt{t}$
$C^{20}/_{25}$	$KC_{прог} = 4,25 + 2,62\sqrt{t}$	$KC_{прог} = 4,25 + 1,17\sqrt{t}$
$C^{25}/_{30}$	$KC_{прог} = 4,55 + 2,34\sqrt{t}$	$KC_{прог} = 4,59 + 0,90\sqrt{t}$
$C^{30}/_{37}$	$KC_{прог} = 5,00 + 2,12\sqrt{t}$	$KC_{прог} = 5,00 + 0,73\sqrt{t}$

Поскольку карбонатную составляющую в зоне расположения арматуры определяли в ЖБЭ, измеренная прочность бетона в которых соответствовала классам бетона по прочности $C^{16}/_{20} - C^{25}/_{30}$, для классов бетона по прочности $C^{12}/_{15}$ и $C^{30}/_{37}$ регрессионную зависимость изменения показателя KC в защитном слое бетона для различных условий эксплуатации получали из анализа регрессионных зависимостей $\sqrt{t} - KC$ для бетонов классов по прочности $C^{16}/_{20} - C^{25}/_{30}$ интерполяцией значений основных зависимостей. 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 предложенных моделей необходимо получить значительное количество однотипных экспериментальных данных по карбонизации бетонов различных возрастов на разных глубинах для одинаковых составов, классов по прочности и т.д. В связи со сложностью их получения предложена эвристическая модель $KC(t, l)$, базирующаяся на следующих допущениях:

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

$$KC(t, l) = \beta_0 + \beta(t) e^{\left(-\left(\frac{1-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}. \quad (5)$$

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

$$KC(l/t=15) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} = \beta_0 + \beta_1(t) e^{\left(-\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}. \quad (6)$$

Следовательно,

$$\beta(t) = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0}{e^{\left(-\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}}. \quad (7)$$

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

$$KC(t, l) = \beta_0 + \left(\alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t} - \beta_0\right) e^{\left(\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4} - \left(\frac{1-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}, \quad (8)$$

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 $C^{12/15} - C^{30/37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред жилых и общественных зданий представлены в таблице 5.

Таблица 5

Расчетно-экспериментальные модели карбонизации различных классов бетона по прочности для условий различной агрессивности среды

Класс бетона по прочности на сжатие	Область ускоренной карбонизации	Область обычной карбонизации
$C^{12/15}$	$KC(l,t) = 2,42 + (0,38 + 3,53\sqrt{t})e^{\left(2,46 - \frac{(l-12,0)}{3,5}\right)^{0,65}}$	$KC(l,t) = 2,42 + (0,38 + 1,9\sqrt{t})e^{\left(2,46 - \frac{(l-12,0)}{3,5}\right)^{0,65}}$
$C^{16/20}$	$KC(l,t) = 2,86 + (0,62 + 3,30\sqrt{t})e^{\left(2,83 - \frac{(l+2,0)}{3,0}\right)^{0,6}}$	$KC(l,t) = 2,86 + (0,59 + 1,68\sqrt{t})e^{\left(2,83 - \frac{(l+2,0)}{3,0}\right)^{0,6}}$
$C^{18/22,5}$	$KC(l,t) = 3,31 + (0,51 + 2,99\sqrt{t})e^{\left(3,09 - \frac{(l+3,0)}{2,75}\right)^{0,6}}$	$KC(l,t) = 3,31 + (0,49 + 1,42\sqrt{t})e^{\left(3,09 - \frac{(l+3,0)}{2,75}\right)^{0,6}}$
$C^{20/25}$	$KC(l,t) = 3,47 + (0,86 + 2,62\sqrt{t})e^{\left(2,99 - \frac{(l+4,0)}{2,60}\right)^{0,55}}$	$KC(l,t) = 3,47 + (0,78 + 1,17\sqrt{t})e^{\left(2,99 - \frac{(l+4,0)}{2,60}\right)^{0,55}}$
$C^{25/30}$	$KC(l,t) = 3,6 + (0,95 + 2,34\sqrt{t})e^{\left(2,88 - \frac{(l+4,1)}{2,3}\right)^{0,51}}$	$KC(l,t) = 3,6 + (0,99 + 0,90\sqrt{t})e^{\left(2,88 - \frac{(l+4,1)}{2,3}\right)^{0,51}}$
$C^{30/37}$	$KC(l,t) = 3,87 + (1,13 + 2,12\sqrt{t})e^{\left(3,06 - \frac{(l+4,7)}{2,1}\right)^{0,5}}$	$KC(l,t) = 3,87 + (1,13 + 0,73\sqrt{t})e^{\left(3,06 - \frac{(l+4,7)}{2,1}\right)^{0,5}}$

В качестве примера расчетно-экспериментальные модели карбонизации для бетона класса по прочности $C^{12/15}$ для различных степеней агрессивности эксплуатационной среды жилых и общественных зданий представлены на рисунках 4 и 5, класса по прочности $C^{25/30}$ – на рисунках 6 и 7.

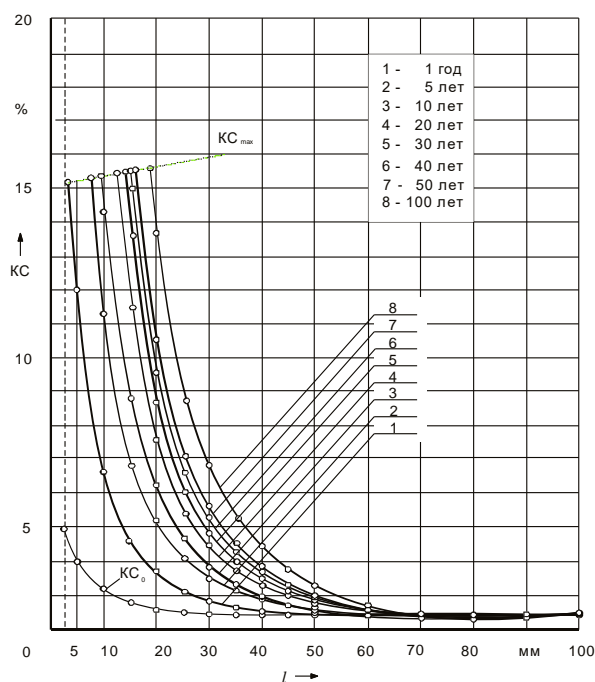


Рис. 4. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{12/15}$ для области обычной карбонизации

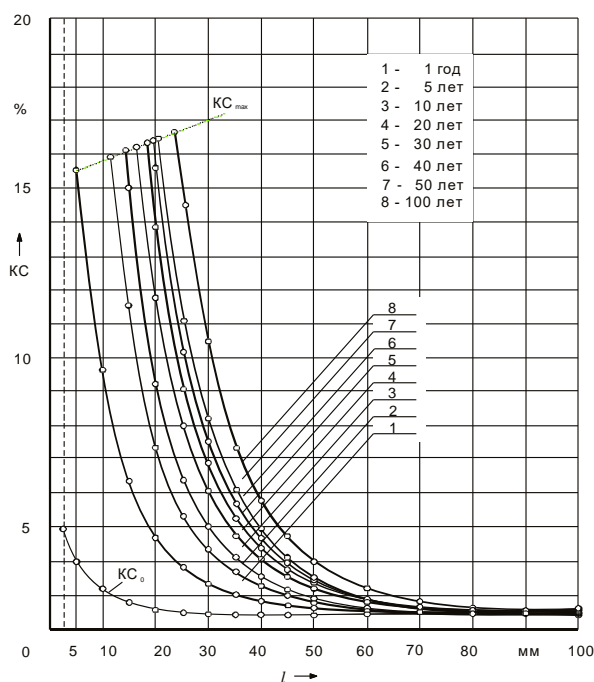


Рис. 5. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{12/15}$ для области ускоренной карбонизации

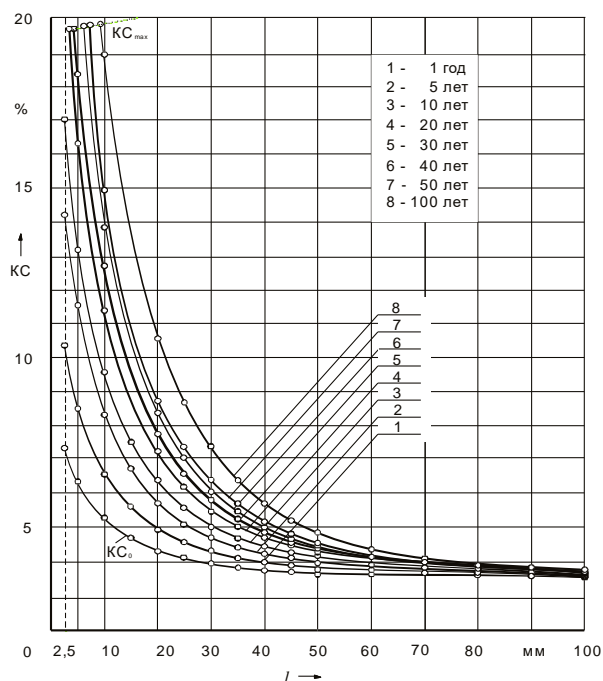


Рис. 6. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{25/30}$ для области обычной карбонизации

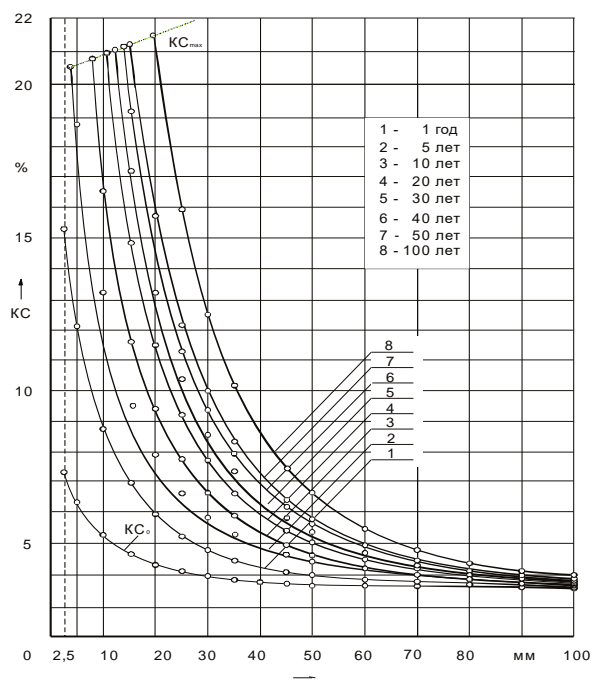


Рис. 7. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации во времени по сечению бетона класса по прочности $C^{25/30}$ для области ускоренной карбонизации

Приведенные модели показывают развитие карбонизации с момента изготовления бетона до возраста 100 лет по сечению бетона до глубины 100 мм. Они построены для дискретных значений возраста бетона.

Для получения величин карбонатной составляющей промежуточных значений возраста бетона необходимо интерполировать значения двух ближайших к искомому возрасту.

В предлагаемых моделях максимальную величину карбонизации KC_{max} определяли с учетом предельной величины карбонизации (ПВК) бетона и изменения степени гидратации цемента (α) во времени. Для различных возрастов бетона

$$KC_{max} = ПВК \cdot \alpha. \quad (9)$$

Значения ПВК рассчитывали в соответствии с [2] для каждого класса бетона по прочности по известному составу. Поскольку значения ПВК определяются из условия, что степень гидратации цемента составляет 100 % ($\alpha=1$) (а даже при самых длительных сроках эксплуатации $\alpha < 1$), изменение карбонатной составляющей вычислили с учетом изменения степени гидратации цемента во времени. Степень гидратации цемента и ее изменение во времени определяли по зависимостям, полученным профессором В.В. Бабицким [4].

Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток твердения, %,

$$\alpha_{28}^{20} = 60X - \sqrt[3]{(1,65X)^2} \cdot e^{1,65X}, \quad (10)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста. Для исследуемых бетонов принимали $X_{cp} = 1,25$ ($X = 1,2 \dots 1,3$).

Увеличение степени гидратации цемента с течением времени

$$\alpha = \alpha_{28}^{20} \left[1 + 0,21 \lg \tau (X - 0,63) (\varphi - 0,6) \right], \quad (11)$$

где τ – время твердения цементного камня (бетона), месяцы; φ – относительная влажность воздуха среды, доли единицы. Для области обычной карбонизации принимали $\varphi = 0,70$, ускоренной – $\varphi = 0,90$.

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

Закключение. В результате многолетних исследований развития карбонизации во времени по сечению реально эксплуатируемых ЖБЭ, а также образцов бетона сразу после изготовления с применением ТВО получены расчетно-экспериментальные модели развития карбонизации во времени по сечению бетонов классов по прочности $C^{12}/_{15} - C^{30}/_{37}$ для различных степеней агрессивности воздушных сред жилых и общественных зданий.

Полученные расчетно-экспериментальные модели карбонизации позволяют разработать модели развития во времени по сечению степени карбонизации бетона, что даст возможность на стадии проектирования в зависимости от предполагаемых условий эксплуатации конструкций зданий закладывать класс бетона по прочности для обеспечения необходимой долговечности бетона с учетом его карбонизации во времени.

Предлагаемые расчетно-экспериментальные модели достаточно хорошо коррелируют с результатами исследования карбонизации по сечению ЖБЭ, эксплуатируемых длительные сроки в условиях жилых и общественных зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 146 с.
2. Васильев, А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций: моногр. / А.А. Васильев; М-во образования Респ. Беларусь; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.
3. Герасимович, А.И. Математическая статистика / А.И. Герасимович. – Минск: Выш. шк., 1983. – 275 с.
4. Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / В.В. Бабицкий; БНТУ. – Минск, 2005. – 540 с.

Поступила 12.11.2012

EXPERIMENT-CALCULATED MODEL OF CARBONIZATION OF CONCRETE FOR OPERATIONAL ENVIRONMENT OF RESIDENTIAL BUILDINGS AND PUBLIC PLACES

V. VASILYEV

Research of carbonization of cross-sectional concrete of different classes of durability is made just after the production of concrete with the use of steam curing and in the area of disposition of reinforcement of concrete elements, being exploited for a long time in conditions of residential buildings and public places. Regression of the development of carbonization of cross-sectional concrete of various classes of durability just after steam curing and change of time of carbonization in the area of disposition of reinforcement of concrete elements is obtained by methods of regression and correlated analyses; on their basis heuristic experiment-calculated models of time carbonization of cross-sectional concrete of various classes of durability of concrete elements, for conditions of different aggression of air quality of residential buildings and public places. The proposed models correlate well enough with the results of the research.