

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННОЙ
ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ
ПРИ ПЕРЕХОДЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ
НА ЕВРОПЕЙСКИЕ СТАНДАРТЫ**

(г. Минск, БНТУ — 26-27.05.2015)

УДК 624.01/. 04

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ
КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА СРАЗУ ПОСЛЕ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВО**

ВАСИЛЬЕВ А.А.ШЕВЧЕНКО Д.Н.

Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

Введение

Карбонизация является основным видом коррозии бетона железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Поэтому для ее оценки и прогнозирования разработаны различные модели. В основном все они базируются на использовании индикаторного метода – фенолфталеинового теста (ФФТ).

Его применение считается возможным, поскольку в соответствии с общепринятыми представлениями карбонизация развивается линейно с поверхности вглубь бетона, при этом реакция карбонизации происходит в узкой (около 1 мм) зоне. Скорость карбонизации определяется диффузионными процессами. Процесс карбонизации рассматривается как конечный во времени и по сечению бетона [1]. На основе определения толщины нейтрализованного слоя бетона фенолфталеиновым тестом выведено основное уравнение карбонизации бетона [1].

Соответственно, оценку и прогнозирование развития карбонизации рекомендуется выполнять на основе ФФТ.

Так в Европе сегодня используются нормативные документы EN13295: 2004 «Продукты и системы защиты и ремонта бетонных конструкций. Методы испытания. Определение стойкости и карбонизации», EN 14630: 2006 «Продукты и системы для защиты и восстановления бетонных конструкций. Метод тестирования. Определение глубины карбонизации в затвердевшем бетоне фенолфталеиновым методом».

Результаты многолетних авторских исследований развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности [1,2] показывают, что карбонизация по сечению бетона развивается не линейно, с четкой границей «здорового» и «больного» бетонов, а по сложной экспоненциальной зависимости. Для ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных средах, она никогда не прекращается, в течение времени, в зависимости от изменяющихся эксплуатационных условий, может только изменяться ее интенсивность. А введенный для увязки (по ФФТ) толщины карбонизированного бетона эффективный коэффициент диффузии CO_2 абсолютно не определяет карбонизационные процессы в реально эксплуатируемых ЖБЭ и ЖБК. Соответственно, и попытки на его основе оценивать и прогнозировать карбонизацию в зависимости от различных факторов, не дают положительного результата.

Для создания расчетно-экспериментальной модели развития карбонизации во времени по сечению бетонов необходимо:

- исследовать изменение карбонизации по сечению бетонов различных составов для каждого основного класса по прочности сразу после изготовления бетона (начальную карбонизацию);
- исследовать изменение карбонизации во времени в зоне расположения арматуры для бетонов различных классов по прочности;
- получить регрессионные зависимости развития карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности для разных составов сразу после изготовления бетона;
- получить регрессионные зависимости развития карбонизации во времени в зоне расположения арматуры бетонов различных классов по прочности;

– на основании анализа полученных выражений предложить расчетно-экспериментальные зависимости изменения карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности при проектировании ЖБЭ (ЖБК) и в зависимости от количества использованного цемента, В/Ц, и др. – при проектировании состава бетонной смеси;

– получить расчетно-экспериментальные зависимости изменения карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности в зависимости от фактического значения карбонизации при обследовании ЖБЭ и ЖБК.

Результаты экспериментов и их анализ

В данной работе рассмотрено получение регрессионных зависимостей развития карбонизации сразу после ТВО (начальной карбонизации).

Для оценки и прогнозирования карбонизации при исследовании цементно-песчаной фракции бетона определяли карбонатную составляющую (показатель КС). Поскольку именно он определяет количество образовавшегося карбоната кальция (CaCO_3) – карбонизацию бетона. Показатель КС определяли объемно-газовым методом [2]. Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

Для определения начальных параметров карбонизации (показателя КС_0) исследовали кубики сечением $100 \times 100 \times 100$ мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности $\text{C}^{12}/_{15}$ – $\text{C}^{30}/_{37}$ различных типовых составов для основных типов ЖБЭ. При выборе составов учитывались требования существующих нормативов в части рекомендуемых: марок цемента, его количества и параметров бетонной смеси для различных типов ЖБЭ.

Для подбора составов бетона использовался многофакторный метод проф. В. В. Бабицкого. Для изготовления кубиков использовали цемент М500 активностью 28–32 МПа и бетонную смесь П1 с ОК1–4.

Составы бетона приведены в таблице 1.

При изготовлении кубиков был использован цемент марки ПЦ500 Костюковичского завода. После изготовления кубики подвергали тепловлажностной обработке (ТВО) по стандартному режиму.

Для каждого состава бетона на определенный класс по прочности исследовали по три кубика. Определяли значения K_{C0} по сечению с шагом 2,5 мм.

Поскольку в поверхностном слое бетона происходит разложение образовавшихся карбонатов под воздействием агрессивных кислотных газов, что особенно сказывается при длительной эксплуатации ЖБЭ, и должно быть учтено при моделировании карбонизации во времени, за начальное значение принимали отметку сечения – 2,5 мм.

Таблица 1

Составы образцов бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	В/Ц	Осадка конуса, см	Состав смеси, кг/м ³				
			Ц	П	Щ	В	С-3, κ = 8 %
C ¹² / ₁₅	0,858	1	194	851	1194	166	15,5
	0,856	4	212	832	1158	181	17,0
C ¹⁶ / ₂₀	0,655	1	250	793	1210	164	20,0
	0,653	4	273	773	1172	178	21,8
C ¹⁸ / _{22,5}	0,587	1	277	770	1213	163	22,2
	0,599	4	302	751	1161	181	24,2
C ²⁰ / ₂₅	0,546	1	303	746	1208	165	24,2
	0,546	4	331	729	1160	181	26,5
C ²² / _{27,5}	0,502	1	328	727	1207	165	26,2
	0,489	4	349	713	1188	171	27,9
C ²⁵ / ₃₀	0,453	1	353	714	1212	160	28,2
	0,466	4	392	676	1154	183	31,4
C ²⁸ / ₃₅	0,409	1	411	667	1186	168	32,9
	0,409	4	457	637	1126	187	36,6
C ³⁰ / ₃₇	0,391	1	434	653	1177	170	34,7
	0,391	4	482	621	1117	189	38,6

Примечания
 1 В/Ц – водоцементное отношение.
 2 Ц, П, Щ, В, С-3 – массы цемента, песка, щебня, воды, добавки, кг.

Для каждого состава бетона на определенный класс по прочности исследовали по четыре кубика. Отбор проб бетона выполняли в соответствии с методиками [2].

Был получен набор значений показателя K_{C0} для каждого сечения (по 10 значений с учетом отбраковки с погрешностью более 20 %), по которым были построены усредненные экспериментальные регрессионные зависимости $l-K_{C0}$ (рисунок 1).

Проверка значимости регрессионной модели выполнялась методами математической статистики.

Для каждого сечения (2,5– 25 мм) с шагом 2,5 мм строились гистограммы остатков. Для проверки того, что неучитываемые в модели факторы взаимно компенсируются и среди них нет значимо влияющих (помимо уже учтенных), проверялась гипотеза о нормальном распределении остатков с нулевым математическим ожиданием.

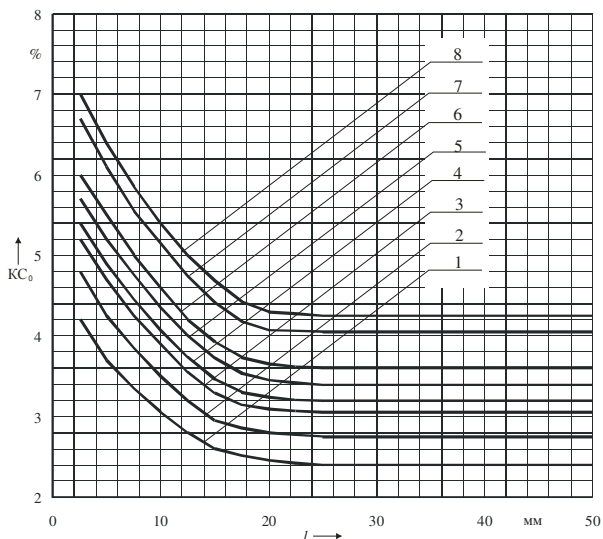


Рис. 2.1. Распределение карбонатной составляющей по сечению образцов бетона сразу после ТВО для классов бетона по прочности:

1 – $C^{12}/_{15}$; 2 – $C^{16}/_{20}$; 3 – $C^{18}/_{22,5}$; 4 – $C^{20}/_{25}$; 5 – $C^{22}/_{27,5}$;
6 – $C^{25}/_{30}$; 7 – $C^{28}/_{35}$; 8 – $C^{30}/_{37}$

Проверка «нормальности» остатков осуществлялась критериями Шапиро-Вилка, Колмогорова-Смирнова, реализованными в пакете Statgraphics. Отсутствие систематической ошибки определялось критерием Стьюдента.

На рисунке 2 и в таблице 2 представлена оценка значимости регрессионной модели $l-KC_0$ для сечения 5,0 мм бетона класса по прочности $C^{12}/_{15}$.

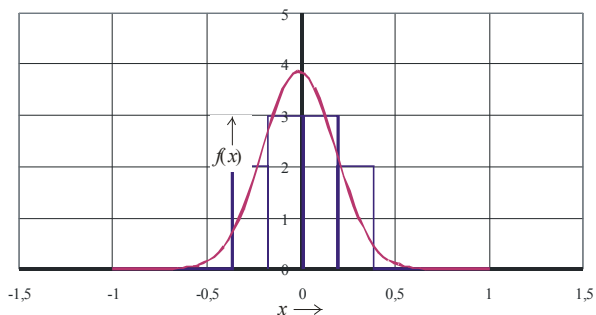


Рис. 2.2. Гистограмма остатков с нанесенной функцией плотности нормального распределения для сечения 5,0 мм

Таблица 2

Статистическая проверка остатков регрессионной модели
для сечения 5,0 мм

Параметр	«Нормальность» остатков		Отсутствие систематической ошибки	Попадание в 95 % интервал, % значений KC_0	Попадание в 50 % интервал, % значений KC_0
	Статистика Шапиро-Вилка, P-Value	Статистика Колмогорова-Смирнова, P-Value	t статистика Стьюдента, P-Value		
Остаток	0,453597	0,902483	0,860972	10	4

Значимость регрессионной модели определялась критерием Фишера.

В качестве примера в таблице 3 приведена статистическая проверка остатков регрессионной модели для бетона класса по прочности $C^{12}/_{15}$.

Она показала, что по всем сечениям все исследованных бетонов значения показателя P-value (критерии Шапиро-Вилка, Колмогорова-Смирнова и Стьюдента) значительно больше 0,05, что свидетельствует о том, что гипотезы о нормальном распределении остатков и нулевом математическом ожидании остатков согласуются с фактическими данными. А поскольку для критерия Фишера значения показателя P-value значительно меньше 0,05, то гипотеза о «неадекватности» модели отклоняется и с вероятностью, превышающей 0,95 (принятой в инженерной практике для оценки уровня значимости), можно утверждать, что все полученные регрессионные модели адекватно описывают предложенные зависимости.

Таблица 3

Статистическая проверка остатков регрессионных моделей
для бетона класса по прочности $C^{12}/_{15}$

Статистическая проверка		«Нормальность» остатков		Отсутствие систематической ошибки	Адекватность модели	
Параметр	Сечение, мм	Статистика Шапиро-Вилка, P-Value	Статистика Колмогорова-Смирнова, P-Value	t статистика Стьюдента, P-Value	Статистика Фишера	
					F-ratio	P-Value
Остатки	2,5	0,916114	0,974589	0,413864	5,01232	0,733422
	5,0	0,453597	0,902483	0,860972		
	7,5	0,876427	0,993139	0,412097		
	10,0	0,731286	0,943848	0,701185		
	12,5	0,916864	0,999581	0,144112		
	15,0	0,314978	0,855167	0,723929		
	17,5	0,138313	0,343340	0,457120		
	20,0	0,281766	0,852560	0,626846		
	22,5	0,940944	0,978880	0,508345		
	25,0	0,093214	0,639199	0,210498		

Для построения математической модели, адекватно отражающей процесс карбонизации бетона по его сечению, на основе экспериментальных данных использовали методы регрессионного и корреляционного анализа.

При этом, при подборе аппроксимирующей регрессионной кривой учитывали две противоречивые тенденции:

1) с одной стороны, уравнение кривой стремились усложнить, для лучшего сглаживания экспериментальных точек;

2) с другой стороны, сложные аппроксимирующие функции обладают плохими предсказательными возможностями и содержат в своем составе большое число параметров, требующих оценки, что усложняет их применение.

Кроме того, при выборе аппроксимирующей кривой учитывали суть происходящих химических процессов деградации свойств бетона по сечению l .

Поскольку аппроксимирующая кривая зачастую удовлетворяет вышеперечисленным требованиям (хорошее сглаживание, соответствие здравому смыслу и т.п.) только на некотором интервале значений влияющей величины глубины l , на ее разных интервалах использовали различные аппроксимирующие кривые.

Основные требования, предъявленные к аппроксимирующей функции $KC(l)$:

1) непрерывность функции карбонизации $KC(l)$ 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

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

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

где параметры α_i и β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) определялись методом наименьших квадратов, известным в математической статистике и реализованным в пакетах Statgraphics и 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, $\beta_0 = KC(0,1$ м)); β_1 – разность минимального и максимального значений $KC(l)$; 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 виделось 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 три 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:

- за незначительное машинное время позволит получать приемлемое по точности решение;

- позволит получать оценки параметров модели с точностью, ограниченной лишь представлением вещественных чисел в ЭВМ;

- даст возможность 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 .

При разработке математической модели карбонизации принимали, что после глубины 50 мм скорость развития карбонизации постоянна для любого класса бетона по прочности.

За граничное значение $l(\infty)$ принимали $l = 100$ мм.

Регрессионная зависимость изменения показателя КСО (начальной карбонизации) по сечению для свежеизготовленных 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 – β_4 – коэффициенты, определяющие соответственно: β_0 – наименьшее значение $KC(l)$ [обычно, $\beta_0 = KC(l > 100 \text{ мм})$]; β_1 – разность минимального и максимального значений $KC(l)$; β_2 – минимальное значение глубины l (обычно, $\beta_2 = 0$); β_3 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_3 > 0$; β_4 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_4 > 0$.

Параметры β_i ($i = 0 \dots 4$) нелинейной функции (3) определялись численно на ЭВМ методом наименьших квадратов.

При описании регрессионных уравнений были подобраны параметры β_i ($i = 0 \dots 4$), позволившие получить максимальные значения коэффициента детерминации (R^2) для каждого уравнения, однако, параметры β_0 – β_4 для каждого класса бетона, соответственно, хоть и близки, но отличаются, что не позволяет их использовать при создании единой системы уравнений – модели, позволяющей прогнозировать изменение генерального элемента (показателя KC_0) для любого класса бетона по прочности по значению показателя, в первую очередь определяющего карбонизацию бетона (количеству использованного цемента).

Поэтому, в дальнейшем, подбор параметров β_i осуществляли из условия равенства показателей β_2 , β_3 и β_4 для всех составов бетона. Это несколько снизило показатель R^2 для каждого регрессионного уравнения, но позволило создать систему взаимосвязанных уравнений с достаточной точностью.

Полученные параметры регрессионных уравнений для различных классов бетона по прочности для составов с $OK=1$ приведены в таблице 4.

Таблица 4

Значения параметров регрессионных уравнений $l-KC_0$
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	R^2
$C^{12}/_{15}$	2,33	740742	-100	5,05	0,85	0,978652
$C^{16}/_{20}$	2,64	863755				0,985486
$C^{18}/_{22,5}$	2,94	914926				0,986994
$C^{20}/_{25}$	3,09	938093				0,987364
$C^{22}/_{27,5}$	3,29	983110				0,989376
$C^{25}/_{30}$	3,42	1028144				0,988291
$C^{28}/_{35}$	3,92	1130050				0,988758
$C^{30}/_{37}$	4,12	1174605				0,990212

Регрессионные зависимости изменения показателя KC_0 по сечению для бетонов сразу после ТВО для составов с ОК=1 представлены в таблице 5.

Таблица 5

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

Класс бетона по прочности на сжатие	Регрессионная зависимость начальной карбонизации
$C^{12}/_{15}$	$KC_0(l/t=0) = 2,33 + 740742e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{16}/_{20}$	$KC_0(l/t=0) = 2,64 + 863755e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{18}/_{22,5}$	$KC_0(l/t=0) = 2,94 + 914926e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{20}/_{25}$	$KC_0(l/t=0) = 3,09 + 938093e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{22}/_{27,5}$	$KC_0(l/t=0) = 3,29 + 983110e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{25}/_{30}$	$KC_0(l/t=0) = 3,42 + 1028144e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{28}/_{35}$	$KC_0(l/t=0) = 3,92 + 1130050e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{30}/_{37}$	$KC_0(l/t=0) = 4,12 + 1174605e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$

Аналогично исследовали образцы бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ для составов с ОК=4.

Для составов с ОК=1 и 4 бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ исследовались фактические различия значений показателей карбонатной составляющей.

В таблице 6 приведен анализ значений показателя KC_0 для бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ для составов с ОК=1 и 4.

По результатам анализа получено, что для любых условий эксплуатации для наиболее различных по составу (количеству использованного цемента) бетонов (с ОК=1 и 4) во всех сечениях значения карбонатной составляющей различаются не более, чем на 9 %, т.е. средние значения показателя KC отличаются от крайних значений не более, чем на 4,5 %, что практически не превышает погрешность самих методов измерения.

Таблица 6

Прогнозные значения показателя KC , %, для бетонов классов по прочности $C^{12/15} - C^{30/37}$ для составов с ОК=1 и 4

Параметр	Значение карбонатной составляющей KC_0 , %															
	$C^{12/15}$		$C^{16/20}$		$C^{18/22,5}$		$C^{20/25}$		$C^{22/27,5}$		$C^{25/30}$		$C^{28/35}$		$C^{30/37}$	
Сечение, мм	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4	ОК1	ОК4
2,5	4,14	4,34	4,75	5,06	5,18	5,49	5,38	5,80	5,69	5,60	6,00	6,49	6,68	7,31	6,99	7,62
5,0	3,72	3,90	4,25	4,55	4,65	4,94	4,84	5,22	5,13	5,41	5,41	5,86	6,03	6,61	6,32	6,89
7,5	3,39	3,53	3,87	4,16	4,24	4,52	4,43	4,78	4,70	4,96	4,96	5,39	5,54	6,07	5,81	6,34
10,0	3,14	3,20	3,58	3,86	3,94	4,17	4,14	4,45	4,39	4,60	4,61	5,00	5,16	5,67	5,41	5,95
12,5	2,95	3,10	3,36	3,64	3,70	3,95	3,88	4,19	4,12	4,35	4,35	4,74	4,87	5,35	5,11	5,59
15,0	2,81	2,95	3,20	3,46	3,52	3,76	3,69	3,99	3,93	4,15	4,15	4,53	4,65	5,11	4,88	5,34
17,5	2,70	2,83	3,07	3,33	3,38	3,62	3,55	3,84	3,78	3,99	4,00	4,37	4,48	4,93	4,71	5,15
20,0	2,61	2,74	2,97	3,23	3,28	3,51	3,44	3,73	3,67	3,88	3,88	4,24	4,35	4,79	4,57	5,01
22,5	2,55	2,68	2,89	3,15	3,19	3,42	3,36	3,64	3,58	3,79	3,79	4,15	4,25	4,68	4,47	4,90
25,0	2,50	2,62	2,83	3,09	3,13	3,36	3,30	3,57	3,51	3,72	3,72	4,07	4,18	4,60	4,39	4,81

Поэтому, в дальнейшем, состав бетона (количество использованного цемента) для одного класса по прочности, можно считать статистически незначимым, что позволяет предложить единые (для различного количества использованного цемента) усредненные для одного класса бетона по прочности регрессионные зависимости начальной карбонизации по сечению бетонов (таблица 7).

Таблица 7

Усредненные регрессионные зависимости карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности сразу после ТВО

Класс бетона по прочности на сжатие	Регрессионная зависимость начальной карбонизации
$C^{12}/_{15}$	$KC_0(l/t = 0) = 2,39 + 759364e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{16}/_{20}$	$KC_0(l/t = 0) = 2,77 + 874723e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{18}/_{22,5}$	$KC_0(l/t = 0) = 3,04 + 937631e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{20}/_{25}$	$KC_0(l/t = 0) = 3,22 + 971835e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{22}/_{27,5}$	$KC_0(l/t = 0) = 3,39 + 1005627e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{25}/_{30}$	$KC_0(l/t = 0) = 3,62 + 1059095e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{28}/_{35}$	$KC_0(l/t = 0) = 4,12 + 1175041e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
$C^{30}/_{37}$	$KC_0(l/t = 0) = 4,32 + 1220706e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$

Заклучение

Выполненные исследования позволили предложить систему регрессионных зависимостей изменения карбонизации по сечению бетонов различных классов по прочности сразу после изготовления с применением ТВО, что позволяет использовать их:

- при оценке начальной карбонизации бетонов различных классов по прочности (для основных типов ЖБЭ) независимо от количества использованного цемента;

- для создания расчетно-экспериментальной модели карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 304 с.

УДК 699.82

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛЕНОК В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

ГАЛУЗО.О.Г., РОМАНОВ Д.В., ВЕРШЕНЯ Е.Г.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Современные полимерные изоляционные пленки предназначены для защиты ограждающих конструкций (наружные стены, вентилируемые фасады) от неблагоприятного внешнего воздействия окружающей среды и от влияния микроклимата внутри помещений.

К основным негативным факторам, воздействующим на ограждающие конструкции относятся:

- образование конденсата в теплоизоляционном слое в результате проникновения влаги из отапливаемых помещений в зимний период;

- увлажнение утеплителя и элементов конструкции под воздействием атмосферных осадков, проникающих через зазоры основного покрытия;

- потери тепла, связанные с проникновением наружного холодного воздуха в утеплитель;

- выдувание волокон минеральной теплоизоляции во внешнюю среду;