

УДК 691.32:624.012.45/46

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-19-27

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ НАЧАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНОВ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{12}/_{15}...C^{50}/_{60}$

канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ, Ю.К. КАБЫШЕВА, М.И. ТКАЧЕВА
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

В статье обоснована необходимость исследования начальной карбонизации бетона. На основании лабораторных исследований образцов бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}...C^{50}/_{60}$, составов смесей марки по удобоукладываемости П1 ($OK = 4$ см) получена система расчетно-экспериментальных зависимостей начальной карбонизации $KC_0 = f(C)$. Выполнена проверка зависимостей методами математической статистики, показавшая адекватность полученных зависимостей.

Получены зависимости начальной карбонизации $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ от гарантированной прочности бетона на сжатие для смесей марки по удобоукладываемости П1.

Путем математической обработки коэффициентов полученных выражений выведены зависимости начальной карбонизации $KC_0 = f(C_p)$ и $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}...C^{50}/_{60}$, составов смесей марок по удобоукладываемости Ж1 (8 с) и Ж2 (15 с).

Ключевые слова: бетон, карбонизация, карбонатная составляющая, начальная карбонизация бетона.

Введение. Карбонизация бетона – основной вид его коррозии в любых воздушных средах [1]. Разработка (построение) модели карбонизации, адекватно описывающей (определяющей) ее развитие во времени по сечению бетона для любых эксплуатационных условий – одна из важнейших задач долговечности бетона и, в первую очередь, железобетона [2].

Существующие методы оценки (прогнозирования) карбонизации бетона базируются на фенолфталеиновом тесте (ФФТ) [3–12]. На его основе, соответственно, созданы различные модели карбонизации бетона. Наиболее известна сегодня в Европе модель, разработанная Пападакисом [4], учитывающая 11 параметров. Однако, на наш взгляд, наиболее объективной (с учетом того, что она базируется на ФФТ) является модель, разработанная профессором В.В. Бабицким¹. Все модели в зависимости от различных параметров (окружающей среды, состава бетона и т.д.) позволяют условно прогнозировать карбонизацию. Условно, потому что зона перемещения слоя резкого изменения окраски происходит при значении $pH \approx 10,3$ (а при карбонизации бетона значения pH водной вытяжки цементного камня изменяются на практике, как минимум, в пределах 13,2...8,4), и ФФТ является частным случаем оценки и прогнозирования карбонизации [2].

Необходимо отметить, что все модели не учитывают начальную карбонизацию бетона, а еще в начале двухтысячных годов профессор И.А. Кудрявцев и доцент В.П. Богданов в своих исследованиях показали, что уже на стадии перемешивания бетонной смеси карбонизация достигает весомых значений. Справедливости ради необходимо отметить, что оценка карбонизации ФФТ и не дает возможности (практически) учитывать начальную карбонизацию бетона.

Доцентом А.А. Васильевым по результатам многолетних исследований параметров карбонизации (реакции, механизма, изменения во времени по сечению бетона в различных эксплуатационных условиях) показано и полностью доказано, что существующие методы исследования карбонизации бетона не позволяют ни оценивать, ни тем более прогнозировать карбонизацию бетона [1; 2]. Соответственно, они не дают возможность оценивать начальную карбонизацию бетона (сразу после его изготовления), оказывающую значительное влияние на ход развития карбонизации и ее абсолютные значения [2].

Карбонизация бетона сегодня оценивается показателем «степень карбонизации», определяющим количество поглощенного углекислого газа воздуха. Таким образом, она оценивается косвенно (не по количеству образовавшихся карбонатов), кроме того, трудно (скорее невозможно) найти еще направление науки, в котором степень определяется количеством. Не говоря уже о том, что отсутствуют количественные и качественные критерии оценки количества поглощенного углекислого газа воздуха.

Карбонизацию необходимо исследовать на основе определения количества образующихся карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона, что абсолютно логично [1]. Такой подход позволяет оценивать карбонизацию количественно и качественно в любом сечении бетона и на любом временном отрезке ее развития. Получение системы расчетно-экспериментальных зависимостей развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие для разных эксплуатационных условий является базой для создания фактической модели карбонизации. Исследование карбонизации для создания расчетно-экспериментальной

¹ Бабицкий В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. – Минск, 2005. – 540 л.

модели развития карбонизации во времени по сечению бетонов необходимо выполнять в несколько этапов. Первым из них является исследование изменения карбонизации по сечению бетонов различных составов для основных классов по прочности на сжатие сразу после изготовления бетона (начальной карбонизации). Вторым этапом – получение регрессионных зависимостей развития карбонизации во времени по сечению бетонов основных классов по прочности на сжатие для различных эксплуатационных условий [2].

Основная часть. Карбонизацию бетона исследовали на основе определения карбонатной составляющей (показателя K_{C_0}) цементно-песчаной фракции бетона сразу после его изготовления с применением тепловлажностной обработки (ТВО).

Показатель K_{C_0} получали объемно-газовым методом (экспресс-метод определения показателя K_{C_0} приведен в [13]). Статистическую обработку экспериментальных данных производили при помощи табличного процессора «Excel».

Для определения показателя K_{C_0} исследовали кубики размером $100 \times 100 \times 100$ мм, выполненные в заводских условиях из бетонов основных классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$, $C^{16}/_{20}$, $C^{18}/_{22,5}$, $C^{20}/_{25}$, $C^{22}/_{27,5}$, $C^{25}/_{30}$, $C^{28}/_{35}$, $C^{30}/_{37}$, $C^{32}/_{40}$, $C^{35}/_{45}$, $C^{40}/_{50}$, $C^{45}/_{55}$ и $C^{50}/_{60}$.

Поскольку у бетона любого класса по прочности на сжатие значения количества использованного цемента для составов марок по удобоукладываемости П1...П5 отличаются до 35%, марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4 – до 18% [14], при прогнозировании начальной карбонизации (показателя K_{C_0}) целесообразно использовать расчетные значения использованного цемента (Π_p) в зависимости от массовости применения бетонов в железобетонных элементах (ЖБЭ) и конструкциях (ЖБК). Так, поскольку для наиболее часто выпускаемых ЖБЭ используют смеси марок по удобоукладываемости П1 (ОК = 1...4 см), Ж1 (5–10 с) и Ж2 (11–20 с), целесообразно принимать Π_p для смесей П1 (ОК = 4 см), Ж1 – (7 с), Ж2 – (15 с).

При выборе составов учитывались требования² в части рекомендуемых: марок цемента, количества цемента и параметров бетонной смеси для различных типов ЖБЭ.

Для изготовления кубиков использовали цемент М500 активностью 28–32 МПа. При расчете составов бетона применялся вычислительный комплекс «Технолог», основанный на многофакторном методе подбора состава бетона, разработанном профессором В.В. Бабицким.

Составы бетона для наиболее часто применяемой отпускной прочности бетона (70%) приведены в таблице 1.

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
$C^{12}/_{15}$	0,866	4	213	827	1154	184
$C^{16}/_{20}$	0,666		275	766	1164	183
$C^{18}/_{22,5}$	0,599		305	741	1165	183
$C^{20}/_{25}$	0,546		334	718	1163	182
$C^{22}/_{27,5}$	0,502		364	695	1158	183
$C^{25}/_{30}$	0,466		397	670	1149	185
$C^{28}/_{35}$	0,409		465	624	1126	190
$C^{30}/_{37}$	0,391		490	608	1116	192
$C^{32}/_{40}$	0,366		529	584	1099	194
$C^{35}/_{45}$	0,334		592	548	1070	198
$C^{40}/_{50}$	0,307		654	517	1039	201
$C^{45}/_{55}$	0,286		714	488	1006	205
$C^{50}/_{60}$	0,268		774	462	973	208

Примечание. В/Ц – водоцементное отношение; Ц, П, Щ, В – массы цемента, песка, щебня, воды, добавки, кг.

После изготовления кубики подвергали ТВО по стандартному режиму. Для каждого состава бетона на определенный класс по прочности на сжатие исследовали по 2 кубика. Образцы бетона отбирали по двум противоположным граням кубиков.

Отбор образцов бетона, приготовление проб и определение карбонатной составляющей (показателя K_{C_0}) выполняли в соответствии с методиками [2].

Значения K_{C_0} определяли по сечению кубиков с шагом 2,5 мм. Так как в процессе эксплуатации ЖБЭ (ЖБК) в лобых воздушных средах в поверхностном слое бетона под воздействием кислых газов происходит разложение образовавшихся карбонатов, в расчетно-экспериментальных зависимостях изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона в различных эксплуатационных условиях фактические значения карбонатной составляющей на поверхности бетона будут значительно отличаться от прогнозных. Для учета вышеприведенного за начальное значение K_{C_0} принимали глубину сечения бетона 2,5 мм.

² СТБ 1544-2005. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия. – Введ. 01.07.2005. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2005. – 17 с.

Для каждого сечения (2,5–25 мм) был получен набор значений показателя K_{C_0} (по 10 значений с учетом отбраковки с погрешностью более 8% – удвоенной погрешности приготовления образцов цементно-песчаной фракции бетона). По полученным значениям K_{C_0} были построены усредненные экспериментальные регрессионные зависимости $l-K_{C_0}$ для каждого класса бетона по прочности на сжатие составов с ОК = 4 см.

Так, зависимость $l-K_{C_0}$ для класса бетона по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ (бетона, массово применяемого для изготовления массивных ЖБЭ – колонн) приведена на рисунке 1.

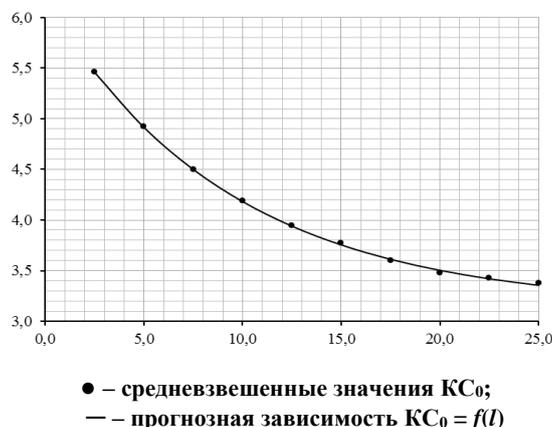


Рисунок 1. – Гистограмма остатков с нанесенной функцией плотности нормального распределения для сечений

Проверка значимости регрессионной модели для каждого класса бетона по прочности на сжатие выполнялась методами математической статистики. По полученным экспериментальным значениям K_{C_0} для всех классов бетона по прочности на сжатие с шагом 2,5 мм (по сечению 2,5...25 мм) строились гистограммы остатков. Для доказательства 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.

На рисунках 2 и 3 и в таблице 2 представлена, соответственно, оценка значимости регрессионной модели $l-K_{C_0}$ для сечений 5,0 и 20 мм бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ с ОК = 4 см.

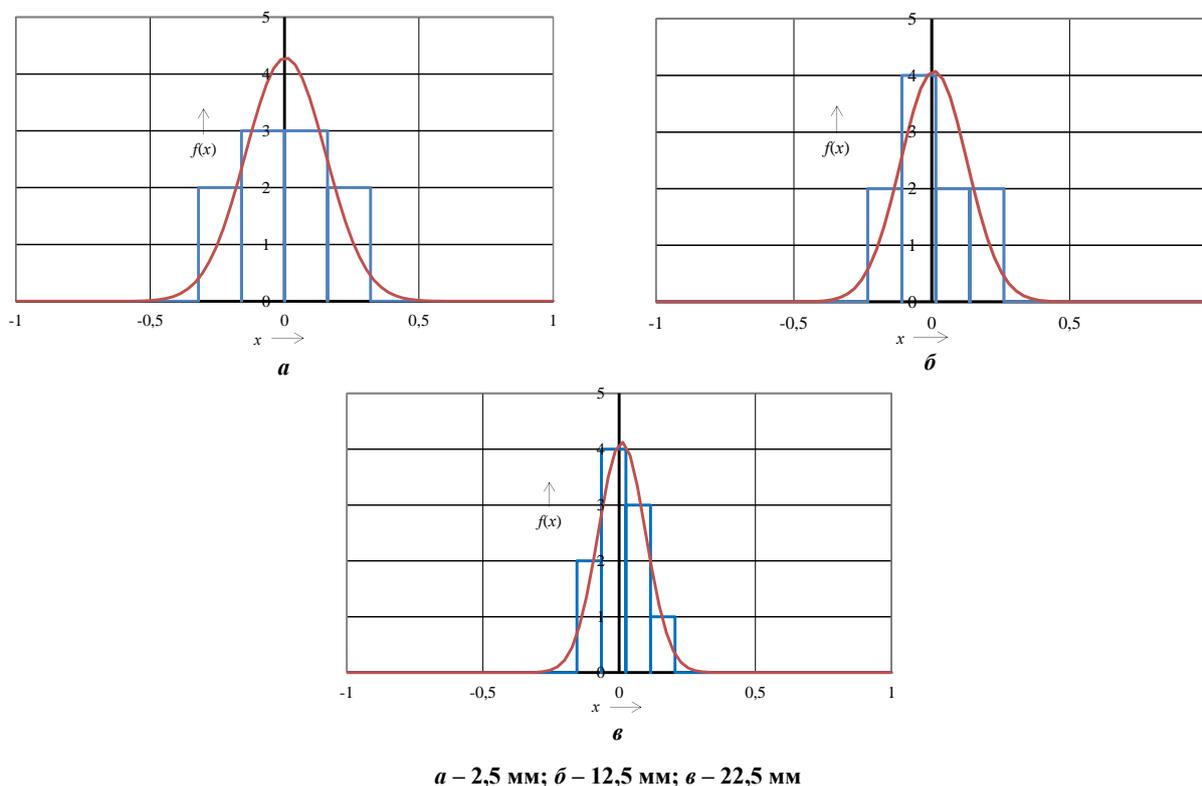


Рисунок 2. – Гистограмма остатков с нанесенной функцией плотности нормального распределения для сечений

Таблица 2. – Статистическая проверка остатков регрессионной модели

Параметр	«Нормальность» остатков		Отсутствие систематической ошибки	Попадание в 95%-й интервал, % значений КС ₀	Попадание в 50%-й интервал, % значений КС ₀
	Статистика Шапиро-Вилка, P-Value	Статистика Колмогорова-Смирнова, P-Value	t-статистика Стьюдента, P-Value		
Сечение 2,5 мм					
Остаток	0,906760	0,965678	0,934210	10	5
Сечение 12,5 мм					
	0,811967	0,959118	0,838677	10	4
Сечение 22,5 мм					
	0,892828	0,983681	0,724790	10	4

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

Результаты статистической проверки остатков регрессионной модели для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ состава с ОК = 4 см приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Статистическая проверка остатков регрессионных моделей для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ состава с ОК = 4 см

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	0,906760	0,965678	0,934210	1038,47	<0,01000
	5,0	0,867493	0,857346	0,876819		
	7,5	0,882650	0,999813	0,950833		
	10,0	0,228906	0,578319	0,351257		
	12,5	0,811967	0,959118	0,838677		
	15,0	0,8766901	0,998773	0,381408		
	17,5	0,937936	0,994325	0,798246		
	20,0	0,923755	0,996482	0,436714		
	22,5	0,892828	0,983681	0,724790		
25,0	0,793704	0,998996	0,417182			

По результатам проверки получено, что по всем сечениям значения показателя P-value (критерии Шапиро-Вилка, Колмогорова-Смирнова и Стьюдента) значительно больше 0,05, а для критерия Фишера значения показателя P-Value значительно меньше 0,05. Это свидетельствует о том, что гипотезы о нормальном распределении остатков и нулевом математическом ожидании остатков согласуются с фактическими данными, а также о том, что с вероятностью, превышающей 0,95 (принятой в инженерной практике для оценки уровня значимости), можно утверждать, что все полученные регрессионные модели адекватно описывают предложенные зависимости.

Полученные регрессионные зависимости для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12}/_{15} \dots C^{50}/_{60}$ (смеси П1 ОК = 4 см) в графическом виде представлены на рисунке 3.

Для построения математической модели, адекватно отражающей процесс начальной карбонизации бетона по его сечению, на основе экспериментальных данных использовали методы регрессионного и корреляционного анализа. Подбор аппроксимирующей кривой подробно описан в [15].

Полученная регрессионная зависимость изменения показателя КС₀ (начальной карбонизации) по сечению для свежизготовленных бетонов (после ТВО) [7]:

$$КС_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left(- \left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3} \right)^{\beta_4} \right)}, \quad (1)$$

где $\beta_0-\beta_4$ – коэффициенты, определяющие соответственно: β_0 – наименьшее значение КС(l) [обычно $\beta_0 = КС(l > 100 \text{ мм})$];

β_1 – разность минимального и максимального значений $KС(l)$;

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, $\beta_4 > 0$.

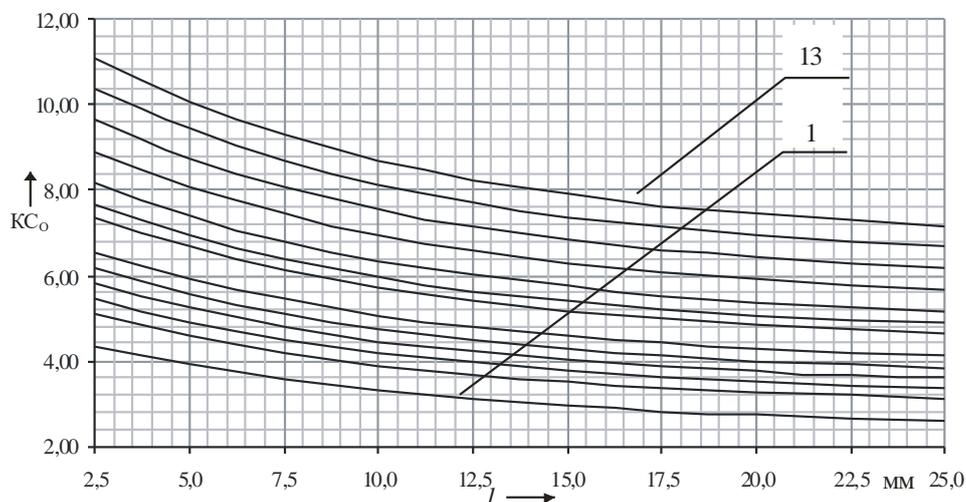


Рисунок 3. – Распределение карбонатной составляющей по сечению образцов бетона составов с ОК = 4 см сразу после ТВО для классов бетона по прочности на сжатие: 1 – C¹²/15; 2 – C¹⁶/20; 3 – C¹⁸/22,5; 4 – C²⁰/25; 5 – C²²/27,5; 6 – C²⁵/30; 7 – C²⁸/35; 8 – C³⁰/37; 9 – C³²/40; 10 – C³⁵/45; 11 – C⁴⁰/50; 12 – C⁴⁵/55; 13 – C⁵⁰/60

Параметры β_i ($i = 0 \dots 4$) нелинейной функции (1) 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 по прочности на сжатие близки, но отличаются, что не дает возможность их использовать при создании единой системы уравнений – модели, позволяющей прогнозировать изменение генерального элемента (показателя $KС_0$) для любого класса бетона по прочности на сжатие по значению показателя, в первую очередь определяющего карбонизацию бетона (количеству использованного цемента). Параметры β_2 – β_4 для каждого класса бетона по прочности на сжатие отличаются незначительно, 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 на сжатие для составов с ОК = 4 см приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Значения параметров регрессионных уравнений l – $KС_0$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие смесей П1 с ОК = 4 см

Класс бетона по прочности на сжатие	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2
C ¹² /15	2,43	785959	-100	5,05	0,85	0,978652
C ¹⁶ /20	2,91	895662				0,985486
C ¹⁸ /22,5	3,14	948744				0,986994
C ²⁰ /25	3,37	1000057				0,987364
C ²² /27,5	3,60	1053139				0,989376
C ²⁵ /30	3,85	1111529				0,988291
C ²⁸ /35	4,37	1230079				0,988758
C ³⁰ /37	4,57	1276083				0,990212
C ³² /40	4,87	1345090				0,993648
C ³⁵ /45	5,35	1456562				0,994876
C ⁴⁰ /50	5,83	1566265				0,986144
C ⁴⁵ /55	6,29	1672429				0,973328
C ⁵⁰ /60	6,75	1778593				0,998611

Регрессионные зависимости изменения показателя KC_0 по сечению для бетонов сразу после ТВО для составов с ОК = 4 см представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Регрессионные зависимости начальной карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности на сжатие сразу после ТВО составов с ОК = 4 см

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $KC_0 = f(\rho_p)$	Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $KC_0 = f(\rho_p)$
C ^{12/15}	$2,43 + 785959e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	C ^{30/37}	$4,57 + 1276083e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{16/20}	$2,91 + 895662e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	C ^{32/40}	$4,87 + 1345090e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{18/22,5}	$3,14 + 948744e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	C ^{35/45}	$5,35 + 1456562e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{20/25}	$3,37 + 1000057e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	C ^{40/50}	$5,83 + 1566265e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{22/27,5}	$3,60 + 1053139e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	C ^{45/55}	$6,29 + 1672429e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{25/30}	$3,85 + 1111529e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	C ^{50/60}	$6,75 + 1778593e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{28/35}	$4,37 + 1230079e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$		

Полученные зависимости (таблица 2) возможно использовать при проектировании ЖБЭ (ЖБК) при известных (заданных) классах бетона по прочности на сжатие.

Путем математической обработки коэффициентов β_0 и β_1 получены зависимости их значений от количества использованного цемента:

$$\beta_0 = 0,0077Ц + 0,7932; (R^2 = 0,9969); \quad (2)$$

$$\beta_1 = 1769,4Ц + 409077; (R^2 = 0,9959), \quad (3)$$

где Ц – содержание цемента, кг/м³.

В общем виде зависимость начальной карбонизации бетона (для смесей П1) от количества использованного цемента

$$KC_0(l/t=0) = (0,0077Ц + 0,7932) + (1769Ц + 409077)e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}. \quad (4)$$

Таким образом, при проектировании состава бетона при известном (заданном) количестве цемента возможно использование зависимости (4).

Путем математической обработки коэффициентов β_0 и β_1 получены прогнозные регрессионные зависимости их изменения от гарантированной прочности бетона на сжатие для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости. Так, для смесей марки по удобоукладываемости П1

$$\beta_0 = 0,0970f_{c,cube}^G + 0,9641; \quad (5)$$

$$\beta_1 = 22287f_{c,cube}^G + 447979, \quad (6)$$

где $f_{c,cube}^G$ – гарантированная прочность бетона на сжатие, МПа.

Расчетно-экспериментальная зависимость начальной карбонизации $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для бетонных смесей марки по удобоукладываемости ПП

$$KC_0 = 0,0970 f_{c,cube}^G + 0,9641 + (22287 f_{c,cube}^G + 447979) e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}. \quad (7)$$

С учетом того, что количественное содержание цемента в первую очередь определяет абсолютные значения карбонатной составляющей сразу после изготовления бетона, путем математической обработки аналогично получены зависимости $KC_0 = f(\rho)$ для смесей марок по удобоукладываемости Ж1 и Ж2. Расчетные содержания цемента (ρ) приняты для смесей Ж1 для 7 с, смесей Ж2 – 15 с (таблица 6).

Таблица 6. – Регрессионные зависимости начальной карбонизации по сечению различных классов бетона по прочности на сжатие сразу после ТВО составов смесей Ж1 и Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	Регрессионная зависимость $KC_0 = f(\rho)$ начальной карбонизации для смесей Ж1 (7 с)	Регрессионная зависимость $KC_0 = f(\rho)$ начальной карбонизации для смесей Ж2 (15 с)
C ^{12/15}	$2,30 + 754110e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$2,23 + 739955e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{16/20}	$2,73 + 854966e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$2,65 + 835502e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{18/22,5}	$2,94 + 902740e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$2,86 + 883276e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{20/25}	$3,15 + 950513e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$3,05 + 9275116e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{22/27,5}	$3,35 + 996518e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$3,24 + 971746e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{25/30}	$3,54 + 1040753e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$3,42 + 1012442e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{28/35}	$4,01 + 1148686e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$3,85 + 1111529e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{30/37}	$4,18 + 1187613e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$4,02 + 1150456e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{32/40}	$4,46 + 1251311e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$4,27 + 12088466e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{35/45}	$4,90 + 1352167e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$4,70 + 1306163e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{40/50}	$5,33 + 11451254e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$5,11 + 1399941e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{45/55}	$5,74 + 1546801e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$5,50 + 1490180e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$
C ^{50/60}	$6,16 + 1642349e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$	$5,90 + 1582189e^{-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}}$

Аналогично выведены зависимости $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для прогнозирования начальной карбонизации для бетонных смесей марок по удобоукладываемости Ж1 и Ж2.

Расчетно-экспериментальная зависимость начальной карбонизации $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ для бетонных смесей:

– марки по удобоукладываемости Ж1

$$KC_0 = 0,0865 f_{c,cube}^G + 0,9866 + (19858 f_{c,cube}^G + 454249) e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)};$$

– марки по удобоукладываемости Ж2

$$KC_0 = 0,0818 f_{c,cube}^G + 1,001 + (18776 f_{c,cube}^G + 457312) e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}.$$

Заключение. Результаты исследований позволили получить системы расчетно-экспериментальных зависимостей начальной карбонизации от количества использованного цемента ($KC_0 = f(\Pi)$) бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/12} \dots C^{50/60}$ для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2; расчетно-экспериментальные зависимости начальной карбонизации от гарантированной прочности бетона на сжатие ($KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$) для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2.

Полученные зависимости ($KC_0 = f(\Pi)$) являются базовыми для создания системы расчетно-экспериментальных зависимостей карбонизации бетона (изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие в разных эксплуатационных средах).

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций: моногр. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев А.А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона: моногр. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 215 с.
3. Васильев А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80.
4. Papadakis V.G., Vayenas C.G., Fardis M.N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation // *ACI Materials Journal*. – 1991. – Vol. 88, № 4. – P. 363–373.
5. Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer / Y. Kishimoto, Sh. Hokoi, K. Harada et al. // *J. of Structural and Construction Engineering*. – 2005. – № 70(595). – P. 17–23.
6. Czarnecki L., Woyciechowski P. Methods of concrete carbonation testing // *Construction and Building Materials*. – 2008. – № 426. – P. 5–7.
7. Czarnecki L., Woyciechowski P. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? // *Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences*. – 2015. – Vol. 63, № 1. – P. 43–54.
8. Ishida T., Maekawa K., Kishi T. Multi-scale Modeling of concrete performance // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2003. – Vol. 1, № 2. – P. 91–126.
9. Wang X. Lee H. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash // *Constr. and Build. Mater.* – 2009. – Vol. 23, iss. 2. – P. 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Do Lago Helene P.R., Castro-Borges P. A novel method to predict concrete carbonation // *Concreto y cemento. Investigación y Desarrollo*. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 25–35.
11. Galan I., Andrade C. Comparison of Carbonation Models // 3rd International RILEM PhD Student Workshop on modeling the Durability of Reinforced Concrete, Guimarães, Portugal, University of Minho, 22–24 October 2009 / ed.: R.M. Ferreira, J. Gulikers, C. Andrade. – Guimarães, 2009. – P. 41–49.
12. Васильев А.А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2017. – № 1(34). – С. 87–88.
13. Васильев А.А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей (показателя КС) цементно-песчаной фракции бетона // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2021. – № 1(42). – С. 94–97.
14. Определение начальной максимальной величины карбонизации бетона / А.А. Васильев, Ю.К. Кабышева, Н.А. Леонов и др. // Лучшая научная работа 2022: сб. ст. VII междунар. науч.-исслед. конкурса; под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2022. – С. 23–30.
15. Васильев А.А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона: моногр. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 263 с.

REFERENCES

1. Vasil'ev, A.A. (2012). *Karbonizatsiya i otsenka povrezhdennosti zhelezobetonnnykh konstruksii: monogr.* Gomel': BelGUT. (In Russ.).
2. Vasil'ev, A.A. (2019). *Otsenka i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnnykh konstruksii s uchetom karbonizatsii betona: monogr.* Gomel': BelGUT. (In Russ.).

3. Vasil'ev, A.A. (2020). K voprosu ob"ektivnosti sovremennoi otsenki i prognozirovaniya karbonizatsii betona na osnove indikatornogo metoda [On the issue of objectivity of modern assessment and prediction of concrete carbonization based on the indicator method]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta. Ser. Str-vo i arkhitektura*, (1), 77–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Papadakis, V.G., Vayenas, C.G. & Fardis, M.N. (1991). Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*, 88(4), 363–373.
5. Kishimoto, Y., Hokoi, Sh., Harada, K. & Takada, S. (2005). Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer. *J. of Structural and Construction Engineering*, 70(595), 17–23.
6. Czarniecki, L. & Woyciechowski, P. (2008). Methods of concrete carbonation testing. *Construction and Building Materials*, (426), 5–7.
7. Czarniecki, L. & Woyciechowski P. (2015). Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space? // *Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences*, 63(1), 43–54.
8. Ishida, T., Maekawa, K. & Kishi, T. (2003). Multi-scale Modeling of concrete performance. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 91–126.
9. Wang, X. & Lee, H. (2009). A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash. *Constr. and Build. Mater.*, 23(2), 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Do Lago Helene, P.R. & Castro-Borges, P. (2009). A novel method to predict concrete carbonation. *Concreto y cemento. Investigación y Desarrollo*, 1(1), 25–35.
11. Galan, I. & Andrade C. (2009). Comparison of Carbonation Models. In R.M. Ferreira (Eds.), J. Gulikers (Eds.) & C. Andrade (Eds.) *3rd International RILEM PhD Student Workshop on modeling the Durability of Reinforced Concrete* (41–49). Guimarães: University of Minho.
12. Vasil'ev, A.A. (2017). K voprosu neobkhodimosti ucheta karbonizatsii betona v normativnykh dokumentakh Respubliki Belarus' po otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov i konstruksii [On the issue of the need to take into account the carbonation of concrete in the regulatory documents of the Republic of Belarus on the assessment of the technical condition of reinforced concrete elements and structures]. *Vestn. BelGUTA: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, 1(34), 87–88. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Vasil'ev, A.A. (2021). Ekspres-metod opredeleniya karbonatnoi sostavlyayushchei (pokazatelya KS) tsementno-peschanoi fraktsii betona [Express method of determination of carbonate component (CC index) of cement-sand fraction of concrete]. *Vestn. BelGUTA: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, 1(42), 94–97. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Vasil'ev, A.A., Kabysheva, Yu.K., Leonov, N.A. & Dolya, V.A. (2022). Opredelenie nachal'noi maksimal'noi velichiny karbonizatsii betona [Definition of initial maximum concrete carbonization]. In G.Yu. Gulyaev (Eds.) *Luchshaya nauchnaya rabota 2022: sb. st. VII mezhdunar. nauch.-issled. konkursa* (23–30). Penza: MTsNS «Nauka i prosveshchenie». (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Vasil'ev, A.A. (2016). *Raschetno-eksperimental'naya model' karbonizatsii betona: monogr.* Gomel': BELGUT. (In Russ.).

Поступила 01.07.2024

CALCULATION AND EXPERIMENTAL DEPENDENCIES OF INITIAL CARBONATION OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH CLASSES $C^{12/15} \dots C^{50/60}$

A. VASILIEV, U. KABYSHEVA, M. TKACHEVA
(Belarusian State University of Transport, Gomel)

The article substantiates the need to study the preliminary carbonization of concrete. Based on laboratory studies of concrete samples of compressive strength classes $C^{12/15} \dots C^{50/60}$, mixture compositions of workability grades P1 ($OK = 4$ cm), a system of calculated and experimental dependencies of initial carbonization $KC_0 = f(L)$ was obtained. The dependencies were checked using mathematical statistics methods, which showed the adequacy of the obtained dependencies.

Obtained depending on the preliminary carbonization $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ on the guaranteed compressive strength of concrete for mixtures of workability grade P1.

By mathematical processing of the dependence coefficients derived from the dependence of the initial carbonization $KC_0 = f(L_p)$ and $KC_0 = f(f_{c,cube}^G)$ for classes of concrete in terms of compressive strength $C^{12/15} \dots C^{50/60}$, mixture compositions of workability grades G1 (8 s) and G2 (15 s).

Keywords: concrete, carbonation, carbonate component, initial carbonation of concrete.