

УДК 691.32:624.012.45/46

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-46-53

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА

канд. техн. наук, доц. А.А. ВАСИЛЬЕВ

(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

В статье обоснована необходимость исследования карбонизации бетона и оценки его максимальной карбонизируемости. Приведено основное уравнение прогнозирования изменения во времени по сечению бетона карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона. Предложено выражение для оценки предельной величины карбонизации бетона (ПВК). Проведено исследование и получены соответствующие зависимости ПВК от состава бетона, классов по прочности на сжатие $C^8/10$ – $C^{50}/60$, составов смесей, марок по удобоукладываемости П1...П5 и Ж1...Ж4. Выполнен анализ полученных значений ПВК.

Ключевые слова: бетон, карбонизация, карбонатная составляющая, предельная величина карбонизации бетона.

Введение. Поврежденность железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах, определяют, в первую очередь, коррозионные повреждения бетона и стальной арматуры. Авторские исследования [1] показывают, что в длительно эксплуатируемых (в различных воздушных средах) ЖБЭ и ЖБК доля коррозионных повреждений бетона и (или) стальной арматуры составляет до 90%. Кроме того, на основании многолетних исследований карбонизации бетона и ее влияния на изменение технического состояния ЖБЭ (ЖБК) показано, что карбонизация является основным видом коррозии бетона, снижающим его защитные свойства по отношению к стальной арматуре ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных воздушных средах. Именно карбонизация бетона определяет остаточный ресурс подавляющего большинства зданий и сооружений [2; 3].

Карбонизацию бетона общепринято определяют и прогнозируют на основе 1-го закона Фика, используя индикаторный (фенолфталеиновый) тест (ФФТ). При этом считается, что она развивается линейно, по всему фронту, кроме того, карбонизация конечна во времени и в пространстве. Степень карбонизации бетона оценивается количеством поглощенного углекислого газа воздуха (CO_2)¹²³⁴ [4–9].

По результатам многолетних исследований (на основе исследования в лабораторных условиях кинетики взаимодействия растворов $Ca(OH)_2$ различных концентраций с CO_2 воздуха методами pH-метрии, карбометрии и микроскопического анализа, исследования кинетики испарения влаги, адсорбции и десорбции паров воды образцами бетона различных классов по прочности на сжатие методом измерения электросопротивления, исследования изменения карбонизации во времени, по сечению, как лабораторных образцов, так и образцов, отобранных из реально эксплуатируемых конструкций) показано, что карбонизация бетона не развивается линейно, по всему фронту, соответственно, она не подчиняется 1-му закону Фика. Ее развитие происходит по сложной экспоненциальной зависимости и ее необходимо исследовать, оценивать и прогнозировать в соответствии со 2-м законом Фика. Кроме того, предлагаемая оценка степени карбонизации по количеству поглощенного углекислого газа воздуха не позволяет корректно оценивать, а тем более прогнозировать развитие карбонизации бетона и ее влияния на состояние защитных свойств по отношению к стальной арматуре [10–15].

Поскольку при карбонизации бетона происходит образование карбонатов ($CaCO_3$), ее предложено оценивать показателем КС (карбонатной составляющей), характеризующей количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах в исследуемой пробе. Данный показатель позволяет оценивать влияние роста карбонатов на изменение показателя pH (водородного показателя водной вытяжки цементного камня), являющегося, во-первых, основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты либо другие продукты химического взаимодействия под воздействием внешней среды и, во-вторых, универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре [1–3].

В прочностных и деформационных расчетах ЖБЭ (ЖБК) принимают (определяют) класс бетона по прочности на сжатие. При этом считается, что физико-механические, химические свойства, соответственно, карбонизируемость и долговечность бетонов различных составов (для одного класса бетона по прочности на сжатие) будут одинаковы.

¹ DuraCrete 7: General guidelines for durability design and redesign. The European Union – Brite EuRam III, Project No. BE95-1347, Probabilistic Performance-based Durability Design of Concrete Structures, Report No T7-01-1, 1999. – 250 p.

² Structural Concrete. Textbook on behavior, design and performance. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/structural-concrete-textbook,-volume-3-240-detail.html>.

³ Бабицкий, В.В. Прогнозирование глубины карбонизации бетона / В.В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь : материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара. – Минск, 2000. – С. 3–6.

⁴ Чернякевич, О.Ю. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации / О.Ю. Чернякевич, С.Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров : материалы XVII Междунар. науч.-метод. семинара, Гродно, 27–28 мая 2010 г. – Гродно, 2010. – С. 369–375.

Карбонизация бетона развивается и продолжается все время эксплуатации ЖБЭ и ЖБК. Степень карбонизации бетона определяется, в первую очередь, эксплуатационными условиями (степенью их агрессивности по отношению к бетону и продолжительностью). Для различных составов бетона максимальные значения карбонатной составляющей будут отличаться. Они будут зависеть от количества использованного цемента и степени его гидратации (α) [16].

Для оценки карбонизируемости бетонов различных составов необходимо определять и сравнивать предельные величины карбонизации.

Основная часть. По результатам многолетних исследований лабораторных образцов бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) и образцов, отобранных из реально эксплуатируемых ЖБЭ (ЖБК) [1–3], получена в общем виде расчетно-экспериментальная зависимость изменения во времени карбонатной составляющей в цементно-песчаной фракции бетона

$$KC(l, t) = \alpha_1 + (\alpha_2 + \alpha_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент, определяющий минимальное значение карбонатной составляющей, %;
 α_2 – коэффициент начальной карбонизации бетона, %;
 α_3 – коэффициент скорости карбонизации, %/лет^{1/2};
 t – величина прогнозного периода, лет;
 14,2 – коэффициент, определяющий точку перегиба кривой;
 l – значение исследуемого сечения бетона, мм;
 100 – максимальное значение глубины сечения бетона, мм;
 5,05 – коэффициент, определяющий форму кривой, мм;
 0,85 – коэффициент, определяющий форму кривой и координаты точек перегиба.

При этом, максимальная величина карбонатной составляющей для бетона определенного класса по прочности на сжатие (состава), %

$$KC(l, t)_{\max} = \alpha_4 \alpha, \quad (2)$$

где α_4 – предельная величина карбонизации бетона (ПВК), %;
 α – степень гидратации цемента, доли ед.

Таким образом, максимальная величина карбонизации бетона будет определяться предельной величиной карбонизации (ПВК), а ее изменение во времени – изменением степени гидратации цемента.

Предельную карбонизируемость бетона предложено оценивать предельной величиной карбонизации (ПВК) [2]. ПВК характеризует содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах при условии, что весь СаО цемента полностью перейдет в СаСО₃ ($\alpha = 1$). Значения ПВК зависят от состава бетона и определяются по известной массе каждого компонента бетонной смеси.

Показатель ПВК предложено определять для цементно-песчаной фракции бетона по следующей методике⁵:

– рассчитывать массу СаО ($m_{\text{СаО}}$) в цементе для приготовления 1 м³ бетона:

$$m_{\text{СаО}} = m_{\text{ц}} \cdot k, \quad (3)$$

где $m_{\text{ц}}$ – масса цемента, используемая для приготовления 1 м³ бетона;
 k – коэффициент, определяющий процентное содержание СаО в цементе;
 – определять массу СаСО₃ (m) при карбонизации $m_{\text{СаО}}$ в 1 м³ бетона из пропорции

$$M_{\text{СаО}} - M_{\text{СаСО}_3},$$

$$m_{\text{СаО}} - m_{\text{СаСО}_3},$$

$$m_{\text{СаСО}_3} = \frac{m_{\text{СаО}} M_{\text{СаСО}_3}}{M_{\text{СаО}}}, \quad (4)$$

где $M_{\text{СаО}}$ – молекулярная масса СаО (56 г/моль, или 56 кг);
 $M_{\text{СаСО}_3}$ – молекулярная масса СаСО₃ (100 г/моль, или 100 кг);

$m_{\text{СаО}}$ – масса СаО в 1 м³ бетона;

– рассчитывать массу цементно-песчаной фракции $m_{\text{цп}}$, кг, в 1 м³ бетона с учетом привеса за счет полного превращения СаО в СаСО₃:

$$m_{\text{цп}} = 1,15Ц + П + (m_{\text{СаСО}_3} - m_{\text{СаО}}), \quad (5)$$

где Ц – масса цемента, кг, в 1 м³ бетона;
 П – масса песка, кг, в 1 м³ бетона;

⁵ См. сноску 4.

– вычислять значение ПВК, %, из пропорции

$$m_{\text{цп}} - 100 \%,$$

$$m_{\text{CaCO}_3} - \text{ПВК},$$

$$\text{ПВК} = \frac{m_{\text{CaCO}_3}}{m_{\text{цп}}} \cdot 100. \quad (6)$$

Для оценки состава бетона на его максимальную карбонируемость определяли значения предельной величины карбонизации для различных классов бетона по прочности на сжатие ($C^{8/10}$ – $C^{50/60}$) для бездобавочных составов смесей, марок по удобоукладываемости П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) для каждой марки по удобоукладываемости.

Составы на каждый класс бетона по прочности на сжатие рассчитывали на основании многофакторного метода, предложенного профессором В.В. Бабицким. Для исследований принят портландцемент ПЦ 500 Д0 ОАО «Белорусский цементный завод» ($k = 0,66$).

Для каждого класса бетона по прочности на сжатие и каждого значения отпускной прочности исследовалось по 65 составов бездобавочного бетона. Таким образом, было исследовано 3900 составов.

В общем виде выражение зависимости ПВК от количества использованного цемента (состава бетона):

$$\text{ПВК} = k_1 \text{Ц} + k_2,$$

где k_1 – коэффициент, определяющий минимальное значение ПВК, $\frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$;

k_2 – коэффициент прироста значений ПВК, %.

Полученные зависимости изменения ПВК от состава для различных классов бетона по прочности на сжатие соответственно для смесей П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) для отпускной прочности бетона 70% и результаты их анализа представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1...П5

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = f(Ц)	Коэффициент детерминации, R ²	Предел значений Ц, кг/м ³	Предел значений ПВК, %	Разница значений ПВК, %	Среднее значение ПВК, %
C ^{8/10}	0,0883 Ц + 2,791	0,9953	133...181	13,57...17,63	4,060	16,42
C ^{10/12,5}	0,0781 Ц + 4,132	0,9960	165...224	16,76...21,47	4,710	20,07
C ^{12/15}	0,0747 Ц + 5,324	0,9962	195...265	19,60...24,94	5,340	23,33
C ^{16/20}	0,0683 Ц + 7,677	0,9973	252...343	24,60...30,92	6,320	28,98
C ^{18/22,5}	0,0662 Ц + 8,549	0,9985	279...385	26,77...33,90	7,130	31,58
C ^{20/25}	0,0644 Ц + 9,359	0,9987	306...428	28,79...36,76	7,970	34,14
C ^{22/27,5}	0,0619 Ц + 10,39	0,9987	331...471	30,61...39,40	8,790	36,56
C ^{25/30}	0,0592 Ц + 11,60	0,9987	357...513	32,40...41,81	9,410	38,84
C ^{28/35}	0,0536 Ц + 14,22	0,9988	418...599	36,29...46,19	9,900	43,03
C ^{30/37}	0,0509 Ц + 15,53	0,9981	441...632	37,64...47,55	9,910	46,42
C ^{32/40}	0,0468 Ц + 17,75	0,9971	476...682	39,58...49,46	9,880	46,38
C ^{35/45}	0,0410 Ц + 21,10	0,9964	533...763	42,49...52,22	9,730	49,21
C ^{40/50}	0,0364 Ц + 24,09	0,9959	589...842	45,02...54,53	9,510	51,62
C ^{45/55}	0,0326 Ц + 26,79	0,9958	644...919	47,27...56,55	9,280	53,70
C ^{50/60}	0,0293 Ц + 29,32	0,9956	697...995	49,25...58,28	9,030	55,52

Таблица 2. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = f(Ц)	Коэффициент детерминации, R ²	Предел значений Ц, кг/м ³	Предел значений ПВК, %	Разница значений ПВК, %	Среднее значение ПВК, %
1	2	3	4	5	6	7
C ^{8/10}	0,1197 Ц – 2,345	0,9997	116...135	11,54...13,82	2,280	12,61
C ^{10/12,5}	0,1142 Ц – 2,067	0,9999	144...168	14,37...17,09	2,720	15,62
C ^{12/15}	0,1091 Ц – 1,660	0,9998	170...198	16,88...19,94	3,060	18,32
C ^{16/20}	0,0983 Ц – 0,178	0,9998	220...256	21,43...24,97	3,540	23,09
C ^{18/22,5}	0,0935 Ц + 0,683	0,9999	243...284	23,39...27,19	3,800	25,20

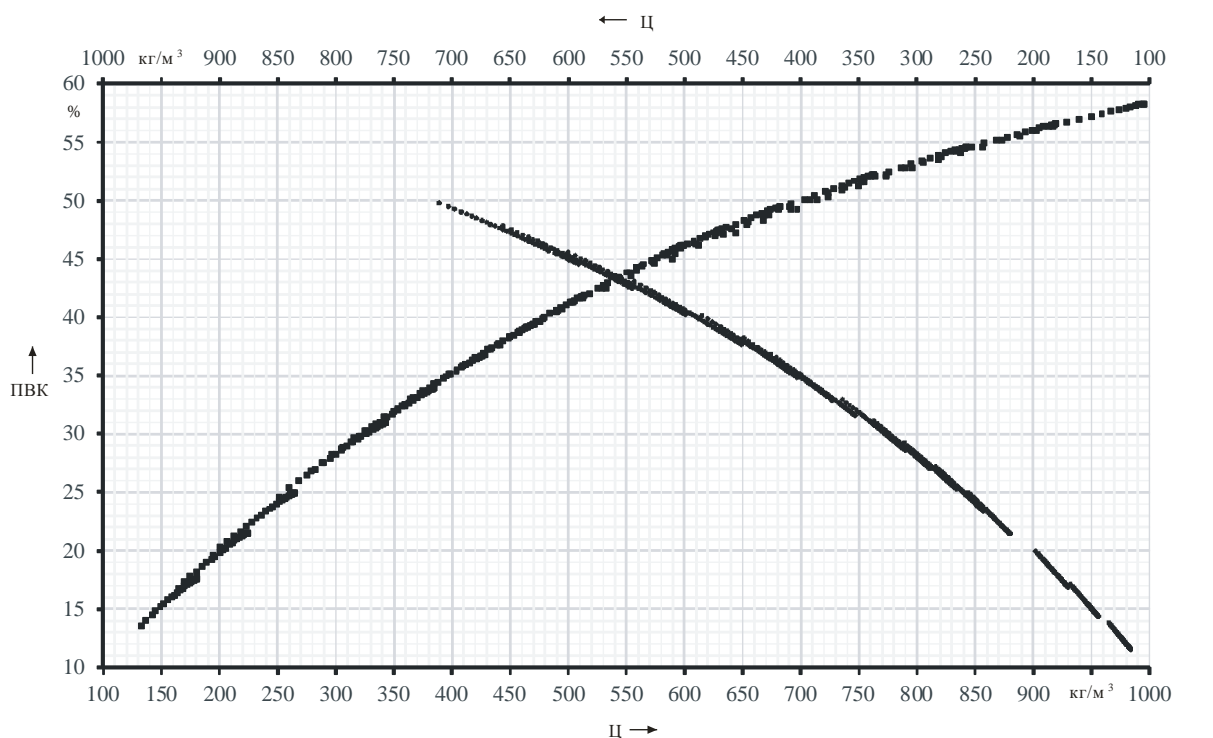
Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
C ²⁰ / ₂₅	0,0886 Ц + 1,713	0,9999	266...311	25,27...29,23	3,960	27,15
C ²² / _{27,5}	0,0845 Ц + 2,620	0,9998	289...337	27,03...31,07	4,040	28,94
C ²⁵ / ₃₀	0,0806 Ц + 3,620	0,9998	310...364	28,60...32,94	4,340	30,62
C ²⁸ / ₃₅	0,0724 Ц + 6,079	0,9997	353...426	31,59...36,84	5,250	34,10
C ³⁰ / ₃₇	0,0695 Ц + 7,030	0,9997	373...449	32,90...37,18	4,280	35,42
C ³² / ₄₀	0,0650 Ц + 8,665	0,9996	403...485	34,81...40,13	5,320	37,37
C ³⁵ / ₄₅	0,0587 Ц + 11,22	0,9997	451...543	37,66...43,04	5,380	40,27
C ⁴⁰ / ₅₀	0,0531 Ц + 13,78	0,9994	499...600	40,21...45,56	5,350	42,82
C ⁴⁵ / ₅₅	0,0484 Ц + 16,18	0,9993	545...656	42,47...47,80	5,330	45,06
C ⁵⁰ / ₆₀	0,0441 Ц + 18,52	0,9993	591...711	44,53...49,78	5,250	47,08

Таблица 3. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1...П5 и Ж1...Ж4

Класс бетона по прочности на сжатие	Среднее значение ПВК, % для марки по удобоукладываемости								
	П1	П2	П3	П4	П5	Ж1	Ж2	Ж3	Ж4
C ⁸ / ₁₀	14,24	15,84	16,93	17,45	17,64	13,53	12,89	12,26	11,75
C ¹⁰ / _{12,5}	17,52	19,39	20,66	21,30	21,49	16,73	15,95	15,21	14,60
C ¹² / ₁₅	20,47	22,54	23,98	24,70	24,95	19,55	18,68	17,86	17,17
C ¹⁶ / ₂₀	25,59	28,03	29,76	30,61	30,91	24,54	23,52	22,56	21,75
C ¹⁸ / _{22,5}	27,83	30,41	32,34	33,44	33,87	26,71	25,66	24,66	23,78
C ²⁰ / ₂₅	29,89	32,73	35,08	36,26	36,72	28,73	27,63	26,57	25,66
C ²² / _{27,5}	31,81	35,16	37,61	38,85	39,35	30,57	29,43	28,35	27,42
C ²⁵ / ₃₀	33,84	37,40	39,95	41,24	41,77	32,35	31,10	29,99	29,03
C ²⁸ / ₃₅	37,77	41,50	44,18	45,55	46,13	36,21	34,76	33,33	32,11
C ³⁰ / ₃₇	39,14	42,91	45,62	56,94	47,48	37,55	36,09	34,60	33,42
C ³² / ₄₀	41,12	44,92	47,60	48,88	49,40	39,51	38,05	36,59	35,34
C ³⁵ / ₄₅	44,02	47,83	50,40	51,64	52,16	42,42	40,94	39,49	38,21
C ⁴⁰ / ₅₀	46,55	50,29	52,78	54,00	54,48	44,96	43,49	42,05	40,76
C ⁴⁵ / ₅₅	48,75	52,39	54,84	56,01	56,49	47,18	45,74	44,30	43,03
C ⁵⁰ / ₆₀	50,70	54,26	56,63	57,77	58,22	49,17	47,74	46,33	45,09

На рисунке 1 приведены области значений ПВК для бездобавочных бетонов классов по прочности на сжатие C⁸/₁₀–C⁵⁰/₆₀, смесей П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) и отпускной прочности бетона на сжатие 70%.



■ – область значений ПВК (смеси П1...П5 (ОК = 1...25 см); ● – область значений ПВК (смеси Ж1...Ж4 (5...40 с)

Рисунок 1. – Область значений ПВК для бездобавочных бетонов классов по прочности на сжатие C⁸/₁₀–C⁵⁰/₆₀ (смеси П1...П5 (ОК = 1...25 см); Ж1...Ж4 (5...40 с) и отпускной прочности на сжатие 70%

Анализ полученных данных показывает, что для одного класса бетона по прочности на сжатие для малопрочных бетонов ($C^{8/10}-C^{16/20}$), бездобавочных составов с подвижностью смеси П1...П5, при отпускной прочности бетона на сжатие 70%, значения ПВК отличаются на 4...6%, с подвижностью смеси Ж1...Ж4 – на 2...4%; для средне- и высокопрочных соответственно на 8...10 и 4...5%.

Аналогично исследовались составы бетонов для отпускных прочностей 80, 90 и 100%. Они показывают, что с повышением отпускной прочности бетона на сжатие разница в ПВК для одного класса бетона по прочности на сжатие незначительно уменьшается. При повышении отпускной прочности бетона на сжатие на 10% средние значения ПВК растут (в среднем на 5%).

В общем виде выражение для прогнозирования значений ПВК, %:

$$\text{ПВК} = k_1 \text{Ц}^3 - k_2 \text{Ц}^2 + k_3 \text{Ц} - k_4, \quad (7)$$

где k_1-k_4 – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 3-ей степени;

$$k_1, \% \left(\frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^3; \quad k_2, \% \left(\frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^2; \quad k_3, \%; \quad k_4, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{КГ}};$$

Ц – количество цемента, кг/м³.

Полученные обобщенные зависимости показателя ПВК от состава для смесей П1...П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1...Ж4 (5...40 с) для отпускных прочностей бетона на сжатие 70, 80, 90 и 100% приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Результаты исследования ПВК для составов бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1...П5 и Ж1...Ж4

Марка по удобоукладываемости	Отпускная прочность бетона, %	Зависимость ПВК = f(Ц)	Коэффициент детерминации, R ²
П1...П5 (ОК = 1...25 см)	70	$3,0 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1240 \text{Ц} - 1,585$	0,9997
	80	$3,3 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1245 \text{Ц} - 1,667$	0,9997
	90	$2,8 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1235 \text{Ц} - 1,567$	0,9997
	100	$2,2 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 9,0 \cdot 10^{-5} \text{Ц}^2 + 0,1222 \text{Ц} - 1,394$	0,9996
Ж1...Ж4 (5-40 с)	70	$5,0 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,1317 \text{Ц} - 2,124$	0,9996
	80	$4,8 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,1307 \text{Ц} - 2,071$	0,9996
	90	$4,3 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,1290 \text{Ц} - 1,938$	0,9997
	100	$4,0 \cdot 10^{-8} \text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4} \text{Ц}^2 + 0,128 \text{Ц} - 1,825$	0,9997

Путем интерполяции значений коэффициентов k_1, k_3, k_4 для граничных значений отпускной прочности бетона на сжатие получены полиномиальные зависимости 2-ой степени коэффициентов k_1, k_3, k_4 для различных отпускных прочностей бетона на сжатие.

В общем виде зависимость коэффициентов k_1, k_3, k_4 от отпускной прочности бетона на сжатие:

$$k_1(3)(4) = k_5(8)(11)R^2 + k_6(9)(12)R + k_7(10)(13), \quad (8)$$

где k_5-k_{13} – коэффициенты, аппроксимирующие полиномиальную кривую 2-ой степени;

R – отпускная прочность бетона на сжатие, МПа.

Значения коэффициентов k_5-k_{13} для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1...П5:

$$k_5 = -0,0028, \frac{\%}{\text{МПа}^2} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^3; \quad k_6 = 0,4325, \frac{\%}{\text{МПа}} \left(\frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^3; \quad k_7 = -13,78, \% \left(\frac{\text{М}^3}{\text{КГ}} \right)^2;$$

$$k_8 = -5,0 \cdot 10^{-6}, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{МПа}^2 \cdot \text{КГ}}; \quad k_9 = 0,0007, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{МПа} \cdot \text{КГ}}; \quad k_{10} = 0,0970, \frac{\% \cdot \text{М}^3}{\text{КГ}}; \quad k_{11} = -6,0 \cdot 10^{-4}, \frac{\%}{\text{МПа}^2};$$

$$k_{12} = 0,1012, \frac{\%}{\text{МПа}}; \quad k_{13} = -2,381, \%$$

Значения коэффициентов k_5-k_{13} для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4:

$$k_5 = -0,0003, \frac{\%}{\text{МПа}^2} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)^3; \quad k_6 = 0,0075, \frac{\%}{\text{МПа}} \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)^3; \quad k_7 = 5,725, \% \left(\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right)^2;$$

$$k_8 = -8,0 \cdot 10^{-7}, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{МПа}^2 \cdot \text{кг}}; \quad k_9 = -9,0 \cdot 10^{-6}, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{МПа} \cdot \text{кг}}; \quad k_{10} = 0,1361, \frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}; \quad k_{11} = -2,0 \cdot 10^{-4}, \frac{\%}{\text{МПа}^2};$$

$$k_{12} = 0,0156, \frac{\%}{\text{МПа}}; \quad k_{13} = 2,782, \%$$

Полученные зависимости для коэффициентов k_1 , k_3 и k_4 составов бетонной смеси различных марок по удобоукладываемости приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5. – Зависимости коэффициентов k_1 , k_3 и k_4 для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1...П5

Коэффициент					
k_1		k_3		k_4	
Зависимость $f(R)$	R^2	Зависимость $f(R)$	R^2	Зависимость $f(R)$	R^2
$-0,0028R^2 + 0,4325R - 13,78$	0,9865	$-5,0 \cdot 10^{-6}R^2 + 0,0007R + 0,0970$	0,9754	$-6,0 \cdot 10^{-4}R^2 + 0,1012R - 2,381$	0,9847

Таблица 6. – Зависимости коэффициентов k_1 , k_3 и k_4 для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4

Коэффициент					
k_1		k_3		k_4	
Зависимость $f(R)$	R^2	Зависимость $f(R)$	R^2	Зависимость $f(R)$	R^2
$-0,0003R^2 + 0,0075R + 5,725$	0,9801	$-8,0 \cdot 10^{-7}R^2 - 9,0 \cdot 10^{-6}R + 0,1361$	0,9936	$-2,0 \cdot 10^{-4}R^2 + 0,0156R + 1,782$	0,9906

Таким образом, полученные по результатам анализа зависимости предельной величины карбонизации бездобавочного бетона от количества использованного цемента для различных отпускных прочностей бетона на сжатие:

- для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости П1...П5

$$\text{ПВК} = (-0,0003R^2 + 0,0075R + 5,725)\text{Ц}^3 + 1,0 \cdot 10^{-4}\text{Ц}^2 + (-8,0 \cdot 10^{-7}R^2 - 9,0 \cdot 10^{-6}R + 0,1361)\text{Ц} + 2,0 \cdot 10^{-4}R^2 - 0,0156R + 1,782; \quad (9)$$

- для составов бетонной смеси марок по удобоукладываемости Ж1...Ж4

$$\text{ПВК} = (-0,0003R^2 + 0,0075R + 5,725)\text{Ц}^3 - 1,0 \cdot 10^{-4}\text{Ц}^2 + (-8,0 \cdot 10^{-7}R^2 - 9,0 \cdot 10^{-6}R + 0,1361)\text{Ц} + 2,0 \cdot 10^{-4}R^2 - 0,0156R + 1,782. \quad (10)$$

Поскольку значения ПВК определяются из условия, что степень гидратации цемента составляет 100% ($\alpha = 1$) (но даже при самых длительных сроках эксплуатации $\alpha < 1$), максимальные величины карбонизации необходимо определять, учитывая степень гидратации цемента, изменяющейся во времени с учетом эксплуатационных условий.

Степень гидратации цемента и ее изменение во времени целесообразно определять по зависимостям, полученным профессором В.В. Бабицким.

Степень гидратации цемента в возрасте 28 суток твердения, %,

$$\alpha_{28}^{20} = 60X - 3\sqrt{(1,65X)^2} \cdot e^{1,65X}, \quad (11)$$

где X – относительное водосодержание цементного теста.
Увеличение степени гидратации цемента с течением времени

$$\alpha = \alpha_{28}^{20} [1 + 0,21l \text{ г } \tau (X - 0,63)(\phi - 0,6)], \quad (12)$$

где τ – время твердения цементного камня (бетона), месяцы;
 ϕ – относительная влажность воздуха среды, доли единицы.

Для области обычной карбонизации целесообразно принимать $\varphi = 0,65$ для условий общественных (промышленных, с неагрессивной или малоагрессивной эксплуатационной средой) зданий, $\varphi = 0,70$ – для открытой атмосферы и $\varphi = 0,75$ – для условий сельскохозяйственных помещений. Для области ускоренной карбонизации – $\varphi = 0,80$ для условий общественных (промышленных, с неагрессивной или малоагрессивной эксплуатационной средой) зданий, $\varphi = 0,85$ – для открытой атмосферы и $\varphi = 0,95$ – для условий сельскохозяйственных помещений.

Заключение. Результаты исследований показывают, что для одного класса бетона по прочности на сжатие, для различных составов (в зависимости от количества использованного цемента), сразу после изготовления, карбонизируемость значительно отличается. Это необходимо учитывать при проектировании ЖБЭ и ЖБК. Нужно принимать составы бетона (с учетом рекомендуемых марок смесей по удобоукладываемости для конкретного изделия), используя как минимум средние значения ППК для каждой марки бетонной смеси по удобоукладываемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, А.А. Прогнозирование коррозионной поврежденности железобетонных элементов для различных условий эксплуатации / А.А. Васильев // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2019. – № 2 (39). – С. 37–39.
2. Васильев, А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : моногр. / А.А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
3. Васильев, А.А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : моногр. / А.А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
4. Papadakis, V.G. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation / V.G. Papadakis, C.G. Vayenas, M.N. Fardis // *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 [et al.] // *J. of Structural and Construction Engineering*. – 2005. – № 595. – P. 17–23.
6. Czarnecki, L. Methods of concrete carbonation testing / L. Czarnecki, P. Woyciechowski // *Construction and Building Materials*. – 2008. – № 426. – P. 5–7.
7. Статистические данные о глубине нейтрализации бетона в железобетонных конструкциях / В.Н. Левченко [и др.] // Вестн. Донбасской нац. акад. стр-ва и архитектуры. – 2009. – № 5 (79). – С. 40–42.
8. Бородай, Д.И. Прогноз сроков карбонизации бетона защитного слоя железобетонных элементов автодорожных мостов / Д.И. Бородай, А.А. Матюнин // Вестн. Донбасской нац. акад. стр-ва и архитектуры. – 2009. – № 1 (75). – С. 147–151.
9. Wang, X. A model for predicting the carbonation depth of concrete containing low-calcium fly ash / X. Wang, H. Lee // *Constr. and Build. Mater.* – 2009. – Vol. 23, iss. 2. – P. 725–733. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.02.019.
10. Васильев, А.А. Совершенствование методов оценки технического состояния железобетонных элементов, эксплуатирующихся в условиях атмосферной агрессии / А.А. Васильев // *Строительная наука и техника*. – 2012. – № 2 (41). – С. 21–28.
11. Васильев, А.А. К вопросу необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А.А. Васильев // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 87–88.
12. Васильев, А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода / А.А. Васильев // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80.
13. Васильев, А.А. О необходимости разработки национального нормативного документа по оценке карбонизации бетона / А.А. Васильев // *Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: В.Ф. Зверев [и др.]*. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2013. – С. 40–54.
14. Васильев, А.А. Совершенствование оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях / А.А. Васильев // *Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О.Н. Лешкевич [и др.]*. – Минск : Ин-т БелНИИС, 2017. – Вып. 9. – С. 148–167.
15. Васильев, А.А. Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий / А.А. Васильев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 8. – С. 43–52.
16. Васильев, А.А. Оценка предельной величины карбонизации бетона / А.А. Васильев, Ю.К. Кабышева, Н.А. Леонов // *Science and education: problems and innovations : сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф.* – Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2021. – С. 22–25.

REFERENCES

1. Vasil'ev, A.A. (2019). Prognozirovanie korrozionnoi povrezhdennosti zhelezobetonnykh elementov dlya razlichnykh uslovii ekspluatatsii [Prediction of corrosion damage of reinforced concrete elements for different operating conditions]. *Vestn. BelGUTA: nauka i transport [Bulletin of BSUT: science and transport]*, (2), 37–39. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Vasil'ev, A.A. (2012). *Karbonizatsiya i otsenka povrezhdennosti zhelezobetonnykh konstruksii*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
3. Vasil'ev, A.A. (2019). *Otsenka i prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruksii s uchetom karbonizatsii betona*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
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*, (595), 17–23.
6. Czarnecki, L. & Woyciechowski, P. (2008). Methods of concrete carbonation testing. *Construction and Building Materials*, (426), 5–7.
7. Levchenko, V.N., Levchenko, D.V., Zaruba, A.V. & Kel'man, E.I. (2009). Statisticheskie dannye o glubine neutralizatsii betona v zhelezobetonnykh konstruksiyakh [Statistical data on concrete neutralization depth in reinforced concrete structures]. *Vestn. Donbasskoi nats. akad. str-va i arkhitektury [Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]*, (5), 40–42. (In Russ., abstr. in Engl.).

8. Borodai, D.I. & Matyunin, A.A. (2009). Prognoz srokov karbonizatsii betona zashchitnogo sloya zhelezobetonnykh elementov avtorozhnykh mostov [Forecast of the time for carbonization of concrete of the protective layer of reinforced concrete elements of road bridges]. *Vestn. Donbasskoi nats. akad. str-va i arkhitektury [Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]*, (1), 147–151. (In Russ., abstr. in Engl.).
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. Vasil'ev, A.A. (2012). Sovershenstvovanie metodov otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh atmosfornoj agressii. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*, (2), 21–28. (In Russ.).
11. 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 carbonization 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), 87–88. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. 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 [Vestnik of Brest State Technical University]*, (1), 77–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Vasil'ev, A.A. (2013). O neobkhodimosti razrabotki natsional'nogo normativnogo dokumenta po otsenke karbonizatsii betona. In V.F. Zverev (Eds.) [et al.] *Voprosy vnedreniya norm proektirovaniya i standartov Evropeiskogo soyuza v oblasti stroitel'stva: sb. nauch.-tekhn. st.* (40–54). Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
14. Vasil'ev, A.A. (2017). Sovershenstvovanie otsenki i prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh elementov i konstruksii, ekspluatiruyushchikhsya v razlichnykh atmosferynykh usloviyakh [Perfection of estimation and prognostication of the technical state of the reinforce-concrete elements and constructions, exploited in different atmospheric terms]. In O.N. Leshkevich [et al.] (Eds.) *Problemy sovremenno go betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr.* (148–167). Minsk: In-t BelNIIS. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Vasil'ev, A.A. (2021). Otsenka karbonizatsii i razvitiya ee parametrov vo vremeni po secheniyu betonov dlya razlichnykh ekspluatatsionnykh uslovii [Assessment of carbonization and development of its parameters during time crossed concrete for different operating conditions]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences]*, (8), 43–52. (In Russ.).
16. Vasil'ev, A.A., Kabysheva, Yu.K. & Leonov, N.A. (2021). Otsenka predel'noi velichiny karbonizatsii betona. In *Science and education: problems and innovations: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (22–25). Penza: MTsNS "Nauka i prosveshchenie". (In Russ.).

Поступила 21.04.2022

ASSESSMENT AND FORECASTING MAXIMUM CARBONIZATION OF CONCRETE

A. VASILIEV

The article substantiates the need to study the carbonation of concrete and evaluate the maximum carbonization of it. The basic equation of prediction of change in time by concrete cross section of carbonate component of cement-sand fraction of concrete is given. An expression is proposed for estimating the limit value of concrete carbonation (PVC). PVC from concrete composition (amount of used cement) for concrete without additives, compressive strength classes $C^{8/10}$ – $C^{50/60}$, mixture compositions, grades for ease of laying P1...P5 and G1...G4 for each class of concrete in terms of compressive strength and different tempering strength of concrete was investigated. The obtained PVC values were analyzed. Dependencies of PVC change on the amount of used cement for any class of concrete in terms of compressive strength and different grades of mixtures in terms of ease of laying, as well as dependence of change of limit value of carbonization of non-addition concrete on the amount of used cement for different tempering strength of concrete and grades of mixtures in terms of ease of laying are obtained.

Keywords: concrete, carbonization, carbonate component, limit value of concrete carbonization.