

УДК 691.32:624.012.45/.46

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Ю. К. КАБЫШЕВА, аспирант, М. И. ТКАЧЕВА, аспирант, К. Э. АГЕЕВА, магистрант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ ДЛЯ ПОДВИЖНЫХ СМЕСЕЙ БЕТОНОВ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{12}/_{15}-C^{50}/_{60}$

Показана необходимость исследования граничных значений карбонизации бетона. Предложена характеристика предельной величины карбонизации бетона (показателя ПВК). Предложена методика упрощенного расчета показателя ПВК и зависимости ПВК = $f(\rho, R)$, полученные на его основе. Выполнены расчеты показателя ПВК и приведены математические зависимости показателя ПВК от количества использованного цемента и отпускной прочности бетона для бетонов различных классов по прочности на сжатие, бездобавочных смесей марок по удобоукладываемости П1–П5. Выполнен анализ применения различных зависимостей расчета показателя ПВК.

Введение. Карбонизация бетона – основной вид коррозии бетона железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах [1–3]. Именно она, в первую очередь, определяет остаточный ресурс, долговечность, материальные затраты на восстановление подавляющего большинства ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в мире [3].

Результаты многолетних исследований [4–10] показали, что существующие методы оценки и прогнозирования карбонизации бетона, основанные на ФФТ (фенолфталеиновом тесте) не позволяют ни оценивать, ни прогнозировать толщину карбонизированного бетона, т. е. совершенно неработоспособны на практике, а разработанный на основе определения карбонатной составляющей (показателя КС), характеризующей количественное содержание карбонатов в цементно-песчаной фракции бетона в массовых процентах в исследуемой пробе, комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния ЖБЭ (ЖБК) с учетом карбонизации бетона [1–3], позволяет оценивать и прогнозировать не только карбонизацию бетона в любом сечении конструкции, но и коррозионное состояние стальной арматуры, техническое состояние, остаточный ресурс и долговечность ЖБЭ (ЖБК) в целом.

Карбонизация бетона продолжается всё время эксплуатации бетона и железобетона, однако для различных составов бетона максимальные значения карбонатной составляющей как сразу после изготовления, так и в процессе эксплуатации будут отличаться, причем отличия будут возрастать с увеличением срока эксплуатации и агрессивности эксплуатационной среды.

Граничные значения параметров карбонизации зависят от различных факторов, в первую очередь от количества использованного цемента и степени гидратации цемента (α), во вторую – от степени агрессивности эксплуатационных условий [3].

Для определения карбонизируемости бетонов различных составов необходимо ввести в практику новые понятия, в том числе понятие предельной величины карбонизации – показателя ПВК, позволяющего определять и сравнивать предельные величины карбонизации в зависимости от состава бетона (содержания цемента). Он является базовым для создания производных показателей карбонизации, позволяющих количественно и качественно оценивать и прогнозировать карбонизацию бетона.

Основная часть. Максимальную карбонизируемость бетона предложено оценивать предельной величиной карбонизации [3]. 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 определялся для цементно-песчаной фракции бетонной смеси по методике, представленной в [4]. Для расчета предельных величин карбонизации исследовали бездобавочные бетоны составов марок по удобоукладываемости П1–П5 (ОК = 1...25 см) для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}-C^{50}/_{60}$.

Для расчета составов бетона использовали вычислительный комплекс «Технолог», реализующий многофакторный метод, проф. В. В. Бабицкого. При расчете компонентов бетонной смеси принимали портландцемент ПЦ 500 Д0 (ОАО «Белорусский цементный завод»), для которого процентное содержание СаО в цементе – 0,66; активность цемента – 50,0 МПа; нормальная густота НГ = 26,5 %.

Значения ПВК рассчитывали для отпускных прочностей бетона $R = 70, 80, 90$ и 100 %. Для каждого класса бетона по прочности на сжатие, и каждого значения отпускной прочности рассчитывали значения ПВК по 25 составам бездобавочного бетона. Было выполнено исследование 1300 составов бетонов. По полученным значениям ПВК строили зависимости ПВК = $f(\rho, R_{гр})$. При построении зависимостей ПВК = $f(\rho, R_{гр})$ использовали только крайние (граничные значения ρ , кг/м³, и ПВК, %), что достаточно, поскольку ранее в работе [4] были получены зависимости ПВК = $f(\rho, R_{гр})$ для различных классов бетона по прочности на сжатие, для каждого значения ρ и ПВК (ОК = 1...25 см), с коэффициентами детерминации $R^2 = 0,9999...0,9959$.

В общем виде выражение зависимости ПВК от количества использованного цемента (состава бетона) [11]

$$ПВК = k_1 \rho + k_2, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент, определяющий минимальное значение ПВК, $\frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$; ρ – содержание цемента, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; k_2 –

коэффициент прироста значений ПВК, %.

Полученные зависимости ПВК = $f(\rho, R_{гр})$ для различных классов бетона по прочности на сжатие (составов) и граничных значений отпускных прочностей бетона 70, 80, 90 и 100 % представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимости ПБК = $f(\Pi, R_{пр})$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (смеси П1–П5) для различных граничных значений отпускных прочностей бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Предел значений Π , кг/м ³	Зависимость ПБК = $f(\Pi, R_{пр})$	Предел значений ПБК, %	Предел значений Π , кг/м ³	Зависимость ПБК = $f(\Pi, R_{пр})$	Предел значений ПБК, %
70			80			
C ¹² / ₁₅	195–265	0,0763 Π + 4,730	19,60–24,94	211–286	0,0745 Π + 5,340	21,06–26,64
C ¹⁶ / ₂₀	252–343	0,0695 Π + 7,080	24,60–30,92	273–374	0,0680 Π + 7,720	26,28–33,14
C ¹⁸ / _{22,5}	279–385	0,0673 Π + 7,890	26,77–33,90	302–422	0,0657 Π + 8,667	28,77–36,38
C ²⁰ / ₂₅	306–428	0,0653 Π + 8,802	28,79–36,76	311–470	0,0629 Π + 9,764	30,59–39,34
C ²² / _{27,5}	331–471	0,0628 Π + 9,8395	30,61–39,40	360–518	0,0599 Π + 11,02	32,60–42,07
C ²⁵ / ₃₀	357–513	0,0589 Π + 11,20	32,40–41,81	394–565	0,0524 Π + 12,75	34,80–44,52
C ²⁸ / ₃₅	418–599	0,0547 Π + 14,44	36,29–46,19	461–661	0,0494 Π + 15,99	38,29–48,66
C ³⁰ / ₃₇	441–632	0,0519 Π + 14,76	37,64–47,55	487–698	0,0466 Π + 17,46	40,18–50,02
C ³² / ₄₀	476–682	0,0480 Π + 16,75	39,58–49,46	527–754	0,0428 Π + 19,62	42,19–51,90
C ³⁵ / ₄₅	533–763	0,0420 Π + 19,95	42,49–52,22	591–845	0,0375 Π + 22,95	45,11–54,63
C ⁴⁰ / ₅₀	589–842	0,0376 Π + 22,90	45,02–54,53	654–935	0,0329 Π + 26,12	47,66–56,92
C ⁴⁵ / ₅₅	644–919	0,0337 Π + 25,56	47,27–56,55	716–1022	0,0293 Π + 28,94	49,88–58,83
C ⁵⁰ / ₆₀	697–995	0,0303 Π + 28,13	49,25–58,28	777–1092	0,0271 Π + 30,82	51,84–60,36
90			100			
C ¹² / ₁₅	242–308	0,0727 Π + 5,970	22,40–28,36	242–330	0,0707 Π + 6,658	23,77–30,00
C ¹⁶ / ₂₀	293–407	0,0664 Π + 8,374	27,83–35,40	314–442	0,0645 Π + 9,140	29,40–37,65
C ¹⁸ / _{22,5}	325–460	0,0636 Π + 9,504	30,18–38,76	348–500	0,0612 Π + 10,47	31,78–41,09
C ²⁰ / ₂₅	357–513	0,0605 Π + 10,77	32,37–41,81	389–558	0,0572 Π + 12,24	34,50–44,16
C ²² / _{27,5}	395–566	0,0568 Π + 12,44	34,87–44,58	430–616	0,0532 Π + 14,12	37,01–46,90
C ²⁵ / ₃₀	432–619	0,0524 Π + 14,63	37,11–47,01	471–675	0,0479 Π + 16,95	39,32–49,19
C ²⁸ / ₃₅	507–726	0,0446 Π + 18,59	41,21–50,98	554–793	0,0405 Π + 21,05	43,46–53,13
C ³⁰ / ₃₇	535–766	0,0421 Π + 20,08	42,58–52,30	586–836	0,0379 Π + 22,66	44,88–54,44
C ³² / ₄₀	580–829	0,0384 Π + 22,37	44,63–54,18	635–908	0,0342 Π + 25,24	46,93–56,26
C ³⁵ / ₄₅	652–931	0,0331 Π + 26,02	47,58–56,81	716–1022	0,0293 Π + 28,94	49,88–58,83
C ⁴⁰ / ₅₀	723–1031	0,029 Π + 29,17	50,11–59,03	795–1133	0,0254 Π + 32,23	52,39–60,96
C ⁴⁵ / ₅₅	792–1129	0,0254 Π + 32,17	52,31–60,87	872–1242	0,0221 Π + 35,23	54,52–62,71
C ⁵⁰ / ₆₀	860–1226	0,0225 Π + 34,85	54,23–62,48	949–1350	0,0195 Π + 37,86	56,39–64,22

Путем интерполяции значений коэффициентов k_1 и k_2 для граничных значений отпускной прочности бетона на сжатие (70, 80, 90 и 100 %) получены линейные зависимости коэффициентов k_1 и k_2 для различных отпускных прочностей бетона.

В общем виде зависимость коэффициентов k_1 и k_2 от отпускной прочности бетона

$$k_1 = k_3 R + k_4, \quad (2)$$

$$k_2 = k_5 R + k_6, \quad (3)$$

где k_3 – k_6 – коэффициенты, аппроксимирующие линейную зависимость; $k_3, \frac{M^3}{кг}$; $k_4, \frac{\% \cdot M^3}{кг}$; $k_5, \text{д. ед.}$; $k_6, \%$; R – отпускная прочность бетона, МПа.

С учетом зависимостей $k_1 = f(R)$ и $k_2 = f(R)$ получены выражения ПБК = $f(\Pi, R)$ для различных классов бетона по прочности на сжатие (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимости ПБК = $f(\Pi, R)$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (подвижной смеси П1–П5) и отпускной прочности 70–100 %

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПБК = $f(\Pi, R)$
C ¹² / ₁₅	$(-0,0002R + 0,0894)\Pi + 0,0641R + 0,2220$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 195 \dots 330 \text{ кг/м}^3$)
C ¹⁶ / ₂₀	$(-0,0002R + 0,0812)\Pi + 0,0683R + 2,697$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 252 \dots 442 \text{ кг/м}^3$)
C ¹⁸ / _{22,5}	$(-0,0002R + 0,0818)\Pi + 0,0830R + 2,102$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 279 \dots 500 \text{ кг/м}^3$)

Окончание таблицы 2

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПБК = $f(\Pi, R)$
C ²⁰ / ₂₅	$(-0,0003R + 0,0842)\Pi + 0,1131R + 0,7767$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 306 \dots 558 \text{ кг/м}^3$)
C ²² / _{27,5}	$(-0,0003R + 0,0853)\Pi + 0,1427R - 0,2760$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 331 \dots 616 \text{ кг/м}^3$)
C ²⁵ / ₃₀	$(-0,0004R + 0,0878)\Pi + 0,1911R - 0,9919$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 357 \dots 675 \text{ кг/м}^3$)
C ²⁸ / ₃₅	$(-0,0005R + 0,0876)\Pi + 0,2544R - 4,356$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 418 \dots 793 \text{ кг/м}^3$)
C ³⁰ / ₃₇	$(-0,0005R + 0,0842)\Pi + 0,2632R - 3,626$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 441 \dots 836 \text{ кг/м}^3$)
C ³² / ₄₀	$(-0,0005R + 0,0798)\Pi + 0,2820R - 2,977$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 476 \dots 908 \text{ кг/м}^3$)
C ³⁵ / ₄₅	$(-0,0004R + 0,0724)\Pi + 0,3001R - 1,047$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 533 \dots 1022 \text{ кг/м}^3$)
C ⁴⁰ / ₅₀	$(-0,0004R + 0,0657)\Pi + 0,3013R + 1,231$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 589 \dots 1133 \text{ кг/м}^3$)
C ⁴⁵ / ₅₅	$(-0,0004R + 0,0605)\Pi + 0,3226R + 3,054$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 644 \dots 1242 \text{ кг/м}^3$)
C ⁵⁰ / ₆₀	$(-0,0004R + 0,0563)\Pi + 0,3322R + 4,677$ ($R = 70 \dots 100 \%$; $\Pi = 697 \dots 1350 \text{ кг/м}^3$)

Ранее, в [12], на основании исследования составов бездобавочных бетонов классов по прочности на сжа-

тие $C^8/10-C^{40}/50$ были получены полиномиальные зависимости 3-й степени предельной величины карбонизации бездобавочного бетона от количества использованного цемента для различных отпускных прочностей бетона марок бетонной смеси по удобоукладываемости П1–П5 ($OK = 1 \dots 25$ см).

$$\begin{aligned}
 ПВК = & (-0,0028R^2 + 0,4325R - 13,78)10^{-8}Ц^3 - \\
 & - 9,0 \cdot 10^{-5}Ц^2 + (-5,0 \cdot 10^{-6}R^2 + 0,0007R + 0,0970)Ц + \\
 & + 6,0 \cdot 10^{-4}R^2 - 0,1012R + 2,381.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Представляет интерес сравнение полученных выражений по анализу граничных значений ПВК, определенных по выражениям (1) и (4) для оценки возможности применения зависимостей (1) как менее сложных при достаточной точности.

Для анализа получаемых значений ПВК строили зависимости $ПВК = f(Ц, R)$ для всех вышеперечисленных бетонов классов по прочности на сжатие по зависимостям (1) и (4).

В качестве примера, на рисунках 1–3 представлены зависимости Ц-ПВК при $R = 75\%$, полученные по выражениям (1) с учетом зависимостей (2), (3) и (4) для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/15$, $C^{28}/35$ и $C^{50}/60$ соответственно.

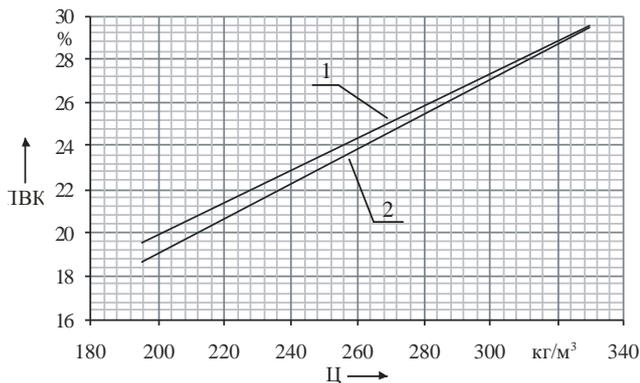


Рисунок 1 – Зависимость Ц-ПВК для бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/15$ и отпускной прочности бетона 75 %
1 – по зависимости (1); 2 – по зависимости (2)

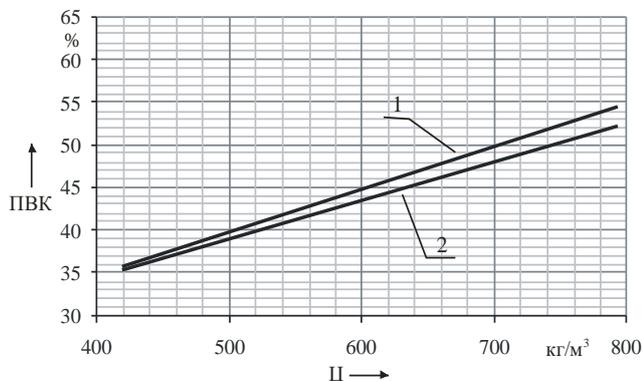


Рисунок 2 – Зависимость Ц-ПВК для бетона класса по прочности на сжатие $C^{28}/35$ и отпускной прочности бетона 75 %:
1 – по зависимости (1); 2 – по зависимости (2)

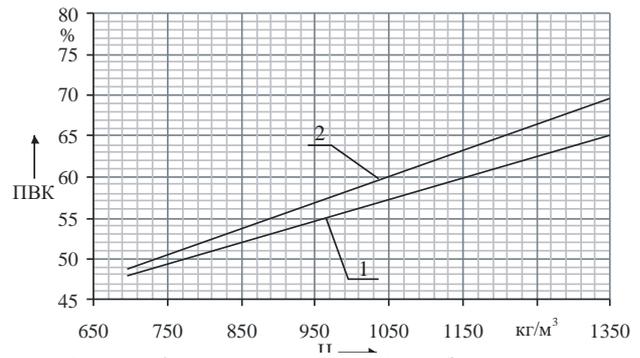


Рисунок 3 – Зависимость Ц-ПВК для бетона класса по прочности на сжатие $C^{50}/60$ и отпускной прочности бетона 75 %
1 – по зависимости (1); 2 – по зависимости (2)

Анализ полученных результатов показывает, что для бетона класса по прочности на сжатие $C^{12}/15$ разница в значениях ПВК составляет до 4,7 %, при этом максимальная разница в абсолютных значениях ПВК – до 0,9 %. Для бетона класса по прочности на сжатие $C^{28}/35$, разница значений ПВК составила, соответственно до 4,1 и 2,2 %. Для бетона класса по прочности на сжатие $C^{50}/60$ – соответственно до 6,5 и 4,4 %.

Разница значений ПВК при перерасчете значений ПВК в СФК (степень фактической карбонизации) [3] дает такое же (либо меньшее) различие, что практически соизмеримо с точностью отбора проб бетона (4 %) [2] и является несущественным.

Необходимо отметить, что при производстве наиболее часто применяемых железобетонных изделий массово используются бетонные смеси марки по удобоукладываемости П1.

Зависимости $ПВК = f(Ц, R)$ для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/15-C^{50}/60$ смесей марки по удобоукладываемости П1 ($OK = 1 \dots 4$ см) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимости $ПВК = f(Ц_{п1}, R)$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (подвижность смеси П1) и отпускной прочности 70–100 %

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость $ПВК = f(Ц_{п1}, R)$
$C^{12}/15$	$(-0,0003R + 0,1108)Ц + 0,0661R - 2,808$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 195 \dots 265$ кг/м ³)
$C^{16}/20$	$(-0,0003R + 0,0987)Ц + 0,0841R - 1,630$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 252 \dots 343$ кг/м ³)
$C^{18}/22,5$	$(-0,0003R + 0,0957)Ц + 0,0841R - 0,611$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 279 \dots 387$ кг/м ³)
$C^{20}/25$	$(-0,0003R + 0,0951)Ц + 0,1025R - 1,060$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 306 \dots 432$ кг/м ³)
$C^{22}/27,5$	$(-0,0004R + 0,0953)Ц + 0,1319R - 2,035$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 331 \dots 478$ кг/м ³)
$C^{25}/30$	$(-0,0004R + 0,0970)Ц + 0,1679R - 3,683$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 357 \dots 523$ кг/м ³)
$C^{28}/35$	$(-0,0004R + 0,0913)Ц + 0,2188R - 3,375$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 418 \dots 615$ кг/м ³)
$C^{30}/37$	$(-0,0004R + 0,0897)Ц + 0,2188R - 3,530$ ($R = 70 \dots 100\%$; $Ц = 441 \dots 651$ кг/м ³)

Окончание таблицы 3

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПБК = $f(\rho_{пл}, R)$
C ^{32/40}	$(-0,0005R + 0,0886)\rho + 0,2547R - 4,655$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 476 \dots 705$ кг/м ³)
C ^{35/45}	$(-0,0005R + 0,0835)\rho + 0,2900R - 4,361$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 533 \dots 794$ кг/м ³)
C ^{40/50}	$(-0,0005R + 0,0766)\rho + 0,3038R - 2,518$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 589 \dots 802$ кг/м ³)
C ^{45/55}	$(-0,0005R + 0,0717)\rho + 0,3275R - 1,656$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 644 \dots 878$ кг/м ³)
C ^{50/60}	$(-0,0004R + 0,0644)\rho + 0,3215R + 1,574$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 697 \dots 1052$ кг/м ³)

Кроме того, при укрупненном прогнозировании значений ПБК, учитывая, что для марки бетонной смеси П1 массово применяются составы с ОК = 3 (4) см, целесообразно принимать не среднее значение количества использованного цемента, а соответствующее верхней границе (ОК = 4 см). Таким образом, при укрупненном прогнозировании можно использовать абсолютные значения ПБК (полученные с учетом зависимостей (1)–(3), приведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Зависимости ПБК = $f(\rho_{гр}, R)$ для бетонов различных классов по прочности на сжатие (подвижность смеси П1, ОК = 4 см) для отпускной прочности 70–100 %

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПБК = $f(\rho_{гр}, R)$
C ^{12/15}	$-0,0134R + 26,55$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 265$ кг/м ³)
C ^{16/20}	$-0,022R + 32,22$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 343$ кг/м ³)
C ^{18/22,5}	$-0,032R + 36,43$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 387$ кг/м ³)
C ^{20/25}	$-0,0271R + 40,02$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 432$ кг/м ³)
C ^{22/27,5}	$-0,0593R + 43,52$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 478$ кг/м ³)
C ^{25/30}	$-0,0413R + 47,05$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 523$ кг/м ³)
C ^{28/35}	$-0,0444R + 52,77$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 615$ кг/м ³)
C ^{30/37}	$-0,0416R + 54,87$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 651$ кг/м ³)
C ^{32/40}	$-0,0978R + 57,81$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 705$ кг/м ³)
C ^{35/45}	$-0,1070R + 61,94$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 794$ кг/м ³)
C ^{40/50}	$-0,1372R + 65,04$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 802$ кг/м ³)
C ^{45/55}	$-0,1115R + 61,30$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 878$ кг/м ³)
C ^{50/60}	$-0,0993R + 69,32$ ($R = 70 \dots 100$ %; $\rho = 1052$ кг/м ³)

Заключение. Результаты исследований показывают, что для расчета (прогнозирования) величин предельной карбонизации бетона можно пользоваться укрупненной зависимостью ПБК = $f(\rho, R)$, представленной в таблице 2 с достаточной точностью. Кроме того, при проектировании ЖБЭ (ЖБК) для укрупненной оценки их проектной долговечности возможно использование зависимостей ПБК = $f(\rho_{пл}, R)$ и ПБК = $f(\rho_{гр}, R)$, приведенных в таблицах 3 и 4 соответственно. Необходимо отметить, что полученные зависимости используются при известных, либо прогнозируемых составах бетонной смеси.

Список литературы

- 1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
- 2 Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
- 3 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
- 4 Васильев, А. А. Модель карбонизации бетона в атмосферных условиях / А. А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 69–82.
- 5 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.
- 6 Васильев, А. А. Критерии оценки технического состояния железобетонных элементов по физико-химическим характеристикам бетона / А. А. Васильев // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства : сб. науч.-техн. статей. В 2 ч. Ч. 2. – Минск : БНТУ, 2012. – С. 39–47.
- 7 Васильев, А. А. Комплексный метод оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных элементов и конструкций, эксплуатируемых в воздушных средах / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск : Издатель А. Н. Вараксин, 2014. – Вып. 6. – С. 59–67.
- 8 Васильев, А. А. Математическая расчетно-экспериментальная модель начальной карбонизации бетона / А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 176–179.
- 9 Васильев, А. А. Оценка применимости бетонов в железобетонных элементах и конструкциях для различных эксплуатационных условий / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 2 (35). – С. 133–135.
- 10 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. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 148–167.

11 Анализ предельной величины карбонизации бетона для различных классов бетона по прочности на сжатие / А. А. Васильев [и др.] // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 1 (44). – С. 88–90.

12 **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.

Получено 21.02.2024

A. A. Vasilyev, J. K. Kabysheva, M. I. Tkacheva, K. E. Ageeva. Carbonization limit analysis for mobile mixtures concretes of compressive strength classes $C^{12/15}$ – $C^{50/60}$.

The necessity to study boundary values of concrete carbonization is shown. The invention proposes the characteristic of the ultimate concrete carbonization (LVC index). Method of simplified calculation of LVK index and $LVC = f(C, R)$ dependence obtained on its basis is proposed. Calculations of the LVC index were made and mathematical dependencies of the LVC index on the amount of cement used and the concrete tempering strength for concretes of various classes in terms of compressive strength, non-additive mixtures of grades in terms of P1–P5 workability were given. The application of various dependencies of the LVC calculation was analyzed.