

УДК 624.012.45/46.62-192

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Ю. К. КАБЫШЕВА, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНОВ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ $C^{12}/_{15}$ – $C^{50}/_{60}$ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

По результатам многолетних исследований карбонизации бетона на основе определения изменения во времени по сечению бетона карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона получены расчетно-экспериментальные зависимости прогнозирования карбонизации в зависимости от расчетного содержания цемента для различных марок бетонных смесей по удобоукладываемости и эксплуатационных условий.

Введение. Карбонизация бетона оценивается и прогнозируется на основе использования прямо или косвенно (в полученных зависимостях определения глубины, скорости, времени) фенолфталеинового теста (ФФТ) [1–3].

Многолетние исследования развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных составов показали некорректность использования ФФТ и необходимость разработки и применения других методов исследования карбонизации [4–6].

Основная часть. На основе предложенного метода оценки и прогнозирования карбонизации по определению карбонатной составляющей (показателя КС) цементно-песчаной фракции бетона [2], на базе результатов исследования начальной карбонизации по сечению бетона [7] и развития ее во времени в зоне расположения стальной арматуры для различных эксплуатационных условий [8] была получена расчетно-экспериментальная зависимость развития карбонизации во времени по сече-

нию бетона для расчетного содержания цемента и различных эксплуатационных условий.

В общем виде

$$КС(\rho_p, l, t) = \gamma_1 + (\gamma_2 + \gamma_3 \sqrt{t}) e^{\left(14,2 - \left(\frac{t+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (1)$$

где γ_1 , %; γ_2 , %; γ_3 , %/лет^{1/2} – коэффициенты.

Показатель КС рассчитывался по [9] для составов бетона наиболее часто выпускаемых сборных железобетонных изделий для расчетных значений содержания цемента (ρ_p): для жестких смесей марок по удобоукладываемости Ж1 и Ж2 (для средних значений «Ц»), и подвижных смесей (П1) – для значений количества цемента, соответствующих верхней границе осадки конуса (ОК = 4 см).

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ – $C^{50}/_{60}$ для подвижных (П1) смесей (для расчетных значений цемента) и различных условий эксплуатации приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для подвижных смесей марки по удобоукладываемости П1

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, $\rho_{фп}$, кг/м ³	Условия эксплуатации								
		СХ О			СХ У			ОПЗ О		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$C^{12}/_{15}$	213	2,43	0,510	0,623	2,43	0,500	1,15	2,43	0,500	0,311
$C^{16}/_{20}$	275	2,91	0,570	0,573	2,91	0,570	1,09	2,91	0,570	0,249
$C^{18}/_{22,5}$	305	3,14	0,610	0,549	3,14	0,600	1,06	3,14	0,600	0,219
$C^{20}/_{25}$	334	3,37	0,630	0,526	3,37	0,630	1,03	3,37	0,630	0,190
$C^{22}/_{27,5}$	364	3,60	0,670	0,502	3,60	0,660	1,00	3,60	0,660	0,160
$C^{25}/_{30}$	397	3,85	0,710	0,476	3,85	0,700	0,967	3,85	0,700	0,127
$C^{28}/_{35}$	464	4,37	0,780	0,422	4,37	0,770	0,900	4,37	0,770	0,060
$C^{30}/_{37}$	490	4,57	0,800	0,401	4,57	0,800	0,874	4,57	0,800	0,034
$C^{32}/_{40}$	529	4,87	0,850	0,370	4,87	0,840	0,835	4,87	0,840	–0,005
$C^{35}/_{45}$	592	5,35	0,920	0,320	5,35	0,920	0,772	5,35	0,920	–0,068
$C^{40}/_{50}$	654	5,83	0,990	0,270	5,83	0,980	0,710	5,83	0,980	–0,130
$C^{45}/_{55}$	714	6,29	1,06	0,222	6,29	1,05	0,650	6,29	1,05	–0,190
$C^{50}/_{60}$	774	6,75	1,12	0,174	6,75	1,12	0,590	6,75	1,12	–0,250

Продолжение таблицы 1

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, $\rho_{фп}$, кг/м ³	Условия эксплуатации								
		ОПЗ У			А О			А У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
1	2	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$C^{12}/_{15}$	213	2,43	0,500	0,882	2,43	0,500	0,681	2,43	0,510	0,965
$C^{16}/_{20}$	275	2,91	0,570	0,808	2,91	0,570	0,626	2,91	0,570	0,896
$C^{18}/_{22,5}$	305	3,14	0,600	0,772	3,14	0,610	0,599	3,14	0,610	0,863
$C^{20}/_{25}$	334	3,37	0,630	0,737	3,37	0,640	0,572	3,37	0,630	0,832
$C^{22}/_{27,5}$	364	3,60	0,670	0,701	3,60	0,670	0,545	3,60	0,670	0,799

Окончание таблицы 1

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Ц _{рп} , кг/м ³	Условия эксплуатации								
		ОПЗ У			А О			А У		
		γ ₁	γ ₂	γ ₃	γ ₁	γ ₂	γ ₃	γ ₁	γ ₂	γ ₃
1	2	12	13	14	15	16	17	18	19	20
C ²⁵ / ₃₀	397	3,85	0,710	0,661	3,85	0,720	0,516	3,85	0,710	0,762
C ²⁸ / ₃₅	464	4,37	0,790	0,581	4,37	0,790	0,455	4,37	0,780	0,689
C ³⁰ / ₃₇	490	4,57	0,820	0,550	4,57	0,830	0,432	4,57	0,810	0,660
C ³² / ₄₀	529	4,87	0,870	0,503	4,87	0,870	0,397	4,87	0,850	0,617
C ³⁵ / ₄₅	592	5,35	0,950	0,427	5,35	0,950	0,340	5,35	0,920	0,548
C ⁴⁰ / ₅₀	654	5,83	1,02	0,353	5,83	1,03	0,284	5,83	0,990	0,480
C ⁴⁵ / ₅₅	714	6,29	1,09	0,281	6,29	1,10	0,230	6,29	1,06	0,414
C ⁵⁰ / ₆₀	774	6,75	1,17	0,209	6,75	1,17	0,176	6,75	1,13	0,348

Примечание – Условия помещений сельскохозяйственных зданий (СХ), общественных зданий и производственных с неагрессивной эксплуатационной средой (ОПЗ) и открытой атмосферы (А) и зоны с обычной (О) и ускоренной карбонизацией (У).

Регрессионная расчетно-экспериментальная зависимость изменения показателя карбонатной составляющей во времени по сечению бетонов классов по прочности C¹²/₁₅–C⁵⁰/₆₀ для различных степеней агрессивности воздушных сред с учетом значений фактических значений показателя КС на момент обследования в общем виде:

$$КС_{\text{прог}} = КС_{\phi} + \delta e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)} \left(\sqrt{t_{\text{прог}}} - \sqrt{t_{\phi}}\right), \quad (2)$$

где КС_{прог} – прогнозное значение карбонатной составляющей, %; КС_ф – фактическое значение карбонатной составляющей на момент обследования, %; δ – коэффициент, характеризующий скорость карбонизации, %/лет^{1/2}; t_{прог} – прогнозный срок, лет; t_ф – срок эксплуатации на момент обследования, лет.

Значения коэффициента δ для смесей марки по удобоукладываемости П1 (для расчетных значений цемента) и различных условий эксплуатации приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициента δ для бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1 и различных эксплуатационных условий

Класс бетона по прочности на сжатие	Условия эксплуатации					
	СХ О	СХ У	ОПЗ О	ОПЗ У	А О	А У
C ¹² / ₁₅	0,623	1,15	0,311	0,882	0,681	0,965
C ¹⁶ / ₂₀	0,573	1,09	0,249	0,808	0,626	0,896
C ¹⁸ / _{22,5}	0,549	1,06	0,219	0,772	0,599	0,863
C ²⁰ / ₂₅	0,526	1,03	0,190	0,737	0,572	0,832
C ²² / _{27,5}	0,502	1,00	0,160	0,701	0,545	0,799
C ²⁵ / ₃₀	0,476	0,967	0,127	0,661	0,516	0,762
C ²⁸ / ₃₅	0,422	0,900	0,060	0,581	0,455	0,689
C ³⁰ / ₃₇	0,401	0,874	0,034	0,550	0,432	0,660
C ³² / ₄₀	0,370	0,835	-0,005	0,503	0,397	0,617
C ³⁵ / ₄₅	0,320	0,772	-0,068	0,427	0,340	0,548
C ⁴⁰ / ₅₀	0,270	0,710	-0,130	0,353	0,284	0,480
C ⁴⁵ / ₅₅	0,222	0,650	-0,190	0,281	0,230	0,414
C ⁵⁰ / ₆₀	0,174	0,590	-0,250	0,209	0,176	0,348

Путем математической обработки коэффициентов γ₁–γ₃ получены прогнозные зависимости их изменения во времени для различных условий эксплуатации от гарантированной прочности бетона на сжатие.

Зависимость КС = f(f_{c,cube}^G, l, t) для бетонных смесей марки по удобоукладываемости П1 –

$$КС(f_{c,cube}^G, l, t) = (0,0970 f_{c,cube}^G + 0,9641) + \left((0,0138 f_{c,cube}^G + 0,2944) + \gamma_4 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}; \quad (3)$$

– марки по удобоукладываемости Ж1 –

$$КС(f_{c,cube}^G, l, t) = (0,0864 f_{c,cube}^G + 0,9906) + \left((0,0124 f_{c,cube}^G + 0,2957) + \gamma_4 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}; \quad (4)$$

– марки по удобоукладываемости Ж2 –

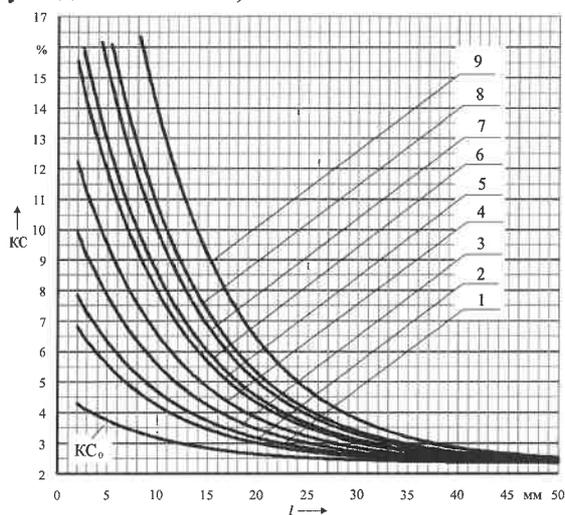
$$КС(f_{c,cube}^G, l, t) = (0,0818 f_{c,cube}^G + 1,001) + \left((0,0116 f_{c,cube}^G + 0,2993) + \gamma_4 \sqrt{t} \right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}; \quad (5)$$

где f_{c,cube}^G – гарантированная прочность бетона на сжатие, МПа; γ₄ – коэффициент (таблица 3), характеризующий скорость карбонизации, %/лет^{1/2}.

Таблица 3 – Значения коэффициента γ_4 для бетонных смесей различных марок по удобоукладываемости

Условия эксплуатации	Марка смеси по удобоукладываемости		
	П1	Ж1	Ж2
СХО	$-0,0101f_{c,cube}^G + 0,7756$	$-0,0090f_{c,cube}^G + 0,7727$	$-0,0085f_{c,cube}^G + 0,7716$
СХУ	$-0,0126f_{c,cube}^G + 1,342$	$-0,0113f_{c,cube}^G + 1,340$	$-0,0106f_{c,cube}^G + 1,338$
ОПЗО	$-0,0126f_{c,cube}^G + 0,5020$	$-0,0112f_{c,cube}^G + 0,4985$	$-0,0107f_{c,cube}^G + 0,4992$
ОПЗУ	$-0,0151f_{c,cube}^G + 1,111$	$-0,0135f_{c,cube}^G + 1,107$	$-0,01275f_{c,cube}^G + 1,105$
АО	$-0,0113f_{c,cube}^G + 0,8535$	$-0,0101f_{c,cube}^G + 0,8503$	$-0,0096f_{c,cube}^G + 0,8487$
АУ	$-0,0138f_{c,cube}^G + 1,175$	$-0,0123f_{c,cube}^G + 1,171$	$-0,0117f_{c,cube}^G + 1,169$

На рисунке 1 представлена в графическом виде прогнозная расчетно-экспериментальная зависимость изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ для эксплуатационных условий открытой атмосферы в зоне повышенной карбонизации (марка смеси по удобоукладываемости П1).



1 – 1 год; 2 – 2 года; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 20 лет; 6 – 25 лет; 7 – 40 лет; 8 – 50 лет; 9 – 100 лет

Рисунок 1 – Графическая расчетно-экспериментальная зависимость $КС = f(l, t)$ для бетона класса по прочности на сжатие $C^{18}/_{22,5}$ условий эксплуатации АУ

Заключение. Полученные расчетно-экспериментальные зависимости изменения во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) показателя КС позволяют прогнозировать фактическую карбонизацию бетона, тем более с учетом начальной карбонизации, которая сегодня не учитывается в существующих моделях [6, 10, 11].

Список литературы

1 Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.

Получено 06.10.2023

A. A. Vasilyev, J. K. Kabyshava. Prediction of compressive strength carbonization of concretes $C^{12}/_{15}-C^{50}/_{60}$ for different operating conditions.

Based on the results of long-term studies of concrete carbonization on the basis of determining the change in the concrete cross-section of the carbonate component of the cement-sand concrete fraction, calculated and experimental dependencies of prediction of carbonization depending on the calculated cement content for various grades of concrete mixtures on the basis of workability and operating conditions were obtained.

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. 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.

5 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.

6 Васильев, А. А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода / А. А. Васильев // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 77–80.

7 Васильев, А. А. Прогнозирование начальной карбонизации бетона различных классов по прочности на сжатие / А. А. Васильев, Ю. К. Кабышева, Н. А. Леонов // Современные научные знания : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – С. 21–24.

8 Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная регрессионная зависимость изменения во времени карбонатной составляющей в зоне расположения стальной арматуры / А. А. Васильев, Ю. К. Кабышева // Инновационные научные исследования : сб. статей II Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – С. 33–36.

9 Васильев, А. А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей цементно-песчаной фракции бетона (показателя КС) / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 94–97.

10 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. статей. – Минск : БНТУ, 2013. – С. 40–54.

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 // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 87–88.