

УДК 624.011.2:692.46(476.2)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАРБОНИЗАЦИИ ВО ВРЕМЕНИ ПО СЕЧЕНИЮ БЕТОНА РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ДЛЯ РАЗНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ

к.т.н., доцент

КАБЫШЕВА ЮЛИЯ КОНСТАНТИНОВНА

м.т.н.

ЛЕОНОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

магистрант

УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Аннотация: на базе полученных экспериментальных регрессионных зависимостей начальной карбонизации и карбонизации во времени бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{30/37}$ составов марки по удобоукладываемости П1 выведена зависимость изменения во времени по сечению бетона карбонатной составляющей (показателя КС) от количества использованного цемента. Получены коэффициенты для зависимости развития во времени по сечению бетона карбонизации для марок смеси по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15}-C^{50/60}$.

Ключевые слова: бетон, цемент, карбонатная составляющая, карбонизация во времени и по сечению.

CARBONIZATION PREDICTION OVER TIME ACROSS CONCRETE SECTION DIFFERENT COMPRESSIVE STRENGTH CLASSES FOR DIFFERENT OPERATING CONDITIONS

**Vasiljev Alexander Anatoljevich,
Kabysheva Uliya Konstantinovna,
Leonov Nikolaj Aleksandrovich**

Abstract: On the basis of the obtained experimental regression dependencies on the initial carbonization and carbonization in time of concretes of classes by strength and strength for compression $C^{12/15}-C^{30/37}$ compositions of the grade by workability, the dependence of the change in time over the cross section of the concrete of the carbonate component (CC indicator) on the amount of cement used M1 derived. Coefficients are obtained for dependence of development over time along the section of carbonization beta-ton for grades of mixture by workability of M1, H1 and H2 concrete of compressive strength classes $C^{12/15}-C^{50/60}$.

Keywords: concrete, cement, carbonate component, carbonization in time and cross-section.

С учетом того, что карбонизация бетона, в первую очередь, определяет коррозионное состояние бетона и стальной арматуры и, как следствие, техническое состояние, долговечность и остаточный ресурс железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных атмосферных средах [1-3], в [3] для разработки системы расчетно-экспериментальных зависимостей развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие для разных типов эксплуатационных условий предложены:

- регрессионная зависимость начальной карбонизации (показателя KC_0) по сечению бетона:

$$KC_0(l/t=0) = \beta_0 + \beta_1 e^{\left(-\left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}, \quad (1)$$

где $\beta_0 - \beta_4$ – коэффициенты, определяющие: β_0 – наименьшее значение $KC(l)$, % [обычно, $\beta_0 = KC(l > 100 \text{ мм})$]; β_1 – разность минимального и максимального значений $KC(l)$, %; β_2 – минимальное значение глубины l , мм, (обычно, $\beta_2 = 0$); β_3 – форму кривой и координаты точек перегиба, мм, $\beta_3 > 0$; β_4 – форму кривой и координаты точек перегиба, д. ед., $\beta_4 > 0$; l – расчетное значение глубины бетона, мм;

- регрессионная зависимость изменения карбонизации во времени (показателя KC_B)

$$KC(l,t) = \alpha_1 + \alpha_2 \sqrt{t}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент начальной карбонизации, %; α_2 – коэффициент прироста карбонизации во времени, %/лет^{1/2}.

Выявлена зависимость показателей β_0, β_1 и α_1, α_2 от количества использованного цемента [3] и путем математической обработки получены значения коэффициентов β_0, β_1 и α_1, α_2 в регрессионные зависимости (1) и (2) для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12/15} - C^{50/60}$ [4, 5].

Объединяя выражения (1) и (2) в [3] получена эвристическая модель изменения карбонатной составляющей во времени по сечению бетона

$$KC(t,l) = \beta_0 + \left(\alpha_1 + \alpha_2 \sqrt{t} - \beta_0\right) e^{\left(\left(\frac{15-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4} - \left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}. \quad (3)$$

После преобразований, с учетом значений коэффициентов $\beta_0 - \beta_4$, на основании выражения (3) принята расчетно-экспериментальная зависимость развития карбонизации во времени по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие для разных типов эксплуатационных условий:

$$KC(l,t) = \gamma_1 + \left(\gamma_2 + \gamma_3 \sqrt{t}\right) e^{\left(14,2 - \left(\frac{l+100}{5,05}\right)^{0,85}\right)}, \quad (4)$$

где $\gamma_1 - \gamma_3$ – коэффициенты.

Рассчитанные значения коэффициентов $\gamma_1 - \gamma_3$ для классов бетона по прочности на сжатие $C^{12/15} - C^{50/60}$ для подвижных (П1) и жестких (Ж1 и Ж2) смесей (для расчетных значений цемента) и условий эксплуатации сельскохозяйственных зданий (СХ), общественных зданий и производственных с неагрессивной эксплуатационной средой (ОПЗ) и открытой атмосферы (А) и зон с обычной (О) и ускоренной карбонизацией (У) приведены в таблицах 1...9.

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, Цр П1, кг/м ³	Условия эксплуатации					
		СХ О			СХ У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	213	2,43	0,510	0,623	2,43	0,500	1,15
C ¹⁶ / ₂₀	275	2,91	0,570	0,573	2,91	0,570	1,09
C ¹⁸ / _{22,5}	305	3,14	0,610	0,549	3,14	0,600	1,06
C ²⁰ / ₂₅	334	3,37	0,630	0,526	3,37	0,630	1,03
C ²² / _{27,5}	364	3,60	0,670	0,502	3,60	0,660	1,00
C ²⁵ / ₃₀	397	3,85	0,710	0,476	3,85	0,700	0,967
C ²⁸ / ₃₅	464	4,37	0,780	0,422	4,37	0,770	0,900
C ³⁰ / ₃₇	490	4,57	0,800	0,401	4,57	0,800	0,874
C ³² / ₄₀	529	4,87	0,850	0,370	4,87	0,840	0,835
C ³⁵ / ₄₅	592	5,35	0,920	0,320	5,35	0,920	0,772
C ⁴⁰ / ₅₀	654	5,83	0,990	0,270	5,83	0,980	0,710
C ⁴⁵ / ₅₅	714	6,29	1,06	0,222	6,29	1,05	0,650
C ⁵⁰ / ₆₀	774	6,75	1,12	0,174	6,75	1,12	0,590

Таблица 2

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, Цр П1, кг/м ³	Условия эксплуатации					
		ОПЗ О			ОПЗ У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	213	2,43	0,500	0,311	2,43	0,500	0,882
C ¹⁶ / ₂₀	275	2,91	0,570	0,249	2,91	0,570	0,808
C ¹⁸ / _{22,5}	305	3,14	0,600	0,219	3,14	0,600	0,772
C ²⁰ / ₂₅	334	3,37	0,630	0,190	3,37	0,630	0,737
C ²² / _{27,5}	364	3,60	0,660	0,160	3,60	0,670	0,701
C ²⁵ / ₃₀	397	3,85	0,700	0,127	3,85	0,710	0,661
C ²⁸ / ₃₅	464	4,37	0,770	0,060	4,37	0,790	0,581
C ³⁰ / ₃₇	490	4,57	0,800	0,034	4,57	0,820	0,550
C ³² / ₄₀	529	4,87	0,840	-0,005	4,87	0,870	0,503
C ³⁵ / ₄₅	592	5,35	0,920	-0,068	5,35	0,950	0,427
C ⁴⁰ / ₅₀	654	5,83	0,980	-0,130	5,83	1,02	0,353
C ⁴⁵ / ₅₅	714	6,29	1,05	-0,190	6,29	1,09	0,281
C ⁵⁰ / ₆₀	774	6,75	1,12	-0,250	6,75	1,17	0,209

Таблица 3

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, Цр П1, кг/м ³	Условия эксплуатации					
		А О			А У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	213	2,43	0,500	0,681	2,43	0,510	0,965
C ¹⁶ / ₂₀	275	2,91	0,570	0,626	2,91	0,570	0,896
C ¹⁸ / _{22,5}	305	3,14	0,610	0,599	3,14	0,610	0,863
C ²⁰ / ₂₅	334	3,37	0,640	0,572	3,37	0,630	0,832
C ²² / _{27,5}	364	3,60	0,670	0,545	3,60	0,670	0,799
C ²⁵ / ₃₀	397	3,85	0,720	0,516	3,85	0,710	0,762
C ²⁸ / ₃₅	464	4,37	0,790	0,455	4,37	0,780	0,689
C ³⁰ / ₃₇	490	4,57	0,830	0,432	4,57	0,810	0,660
C ³² / ₄₀	529	4,87	0,870	0,397	4,87	0,850	0,617
C ³⁵ / ₄₅	592	5,35	0,950	0,340	5,35	0,920	0,548
C ⁴⁰ / ₅₀	654	5,83	1,03	0,284	5,83	0,990	0,480
C ⁴⁵ / ₅₅	714	6,29	1,10	0,230	6,29	1,06	0,414
C ⁵⁰ / ₆₀	774	6,75	1,17	0,176	6,75	1,13	0,348

Таблица 4

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для жестких смесей марки по удобоукладываемости Ж1

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Цср ж1, кг/м ³	Условия эксплуатации					
		СХ О			СХ У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	195	2,30	0,480	0,637	2,30	0,470	1,17
C ¹⁶ / ₂₀	252	2,73	0,550	0,592	2,73	0,550	1,11
C ¹⁸ / _{22,5}	279	2,94	0,580	0,570	2,94	0,570	1,09
C ²⁰ / ₂₅	306	3,15	0,610	0,548	3,15	0,600	1,06
C ²² / _{27,5}	332	3,35	0,630	0,528	3,35	0,630	1,03
C ²⁵ / ₃₀	357	3,54	0,660	0,508	3,54	0,660	1,01
C ²⁸ / ₃₅	418	4,01	0,730	0,459	4,01	0,730	0,946
C ³⁰ / ₃₇	440	4,18	0,750	0,441	4,18	0,750	0,924
C ³² / ₄₀	476	4,46	0,790	0,412	4,46	0,790	0,888
C ³⁵ / ₄₅	533	4,90	0,850	0,367	4,90	0,850	0,831
C ⁴⁰ / ₅₀	589	5,33	0,920	0,322	5,33	0,910	0,775
C ⁴⁵ / ₅₅	643	5,74	0,980	0,279	5,74	0,980	0,721
C ⁵⁰ / ₆₀	697	6,16	1,04	0,236	6,16	1,03	0,667

Таблица 5

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для жестких смесей марки по удобоукладываемости Ж1

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Ц _{ср ж1} , кг/м ³	Условия эксплуатации					
		ОПЗ О			ОПЗ У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	195	2,30	0,470	0,329	2,30	0,470	0,904
C ¹⁶ / ₂₀	252	2,73	0,550	0,272	2,73	0,540	0,835
C ¹⁸ / _{22,5}	279	2,94	0,570	0,245	2,94	0,570	0,803
C ²⁰ / ₂₅	306	3,15	0,600	0,218	3,15	0,600	0,770
C ²² / _{27,5}	332	3,35	0,630	0,192	3,35	0,630	0,739
C ²⁵ / ₃₀	357	3,54	0,660	0,167	3,54	0,670	0,709
C ²⁸ / ₃₅	418	4,01	0,730	0,106	4,01	0,740	0,636
C ³⁰ / ₃₇	440	4,18	0,750	0,084	4,18	0,770	0,610
C ³² / ₄₀	476	4,46	0,790	0,048	4,46	0,810	0,566
C ³⁵ / ₄₅	533	4,90	0,850	-0,009	4,90	0,870	0,498
C ⁴⁰ / ₅₀	589	5,33	0,910	-0,065	5,33	0,940	0,431
C ⁴⁵ / ₅₅	643	5,74	0,980	-0,119	5,74	1,01	0,366
C ⁵⁰ / ₆₀	697	6,16	1,03	-0,173	6,16	1,07	0,301

Таблица 6

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для жестких смесей марки по удобоукладываемости Ж1

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Ц _{ср ж1} , кг/м ³	Условия эксплуатации					
		А О			А У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	195	2,30	0,470	0,698	2,30	0,480	0,984
C ¹⁶ / ₂₀	252	2,73	0,550	0,646	2,73	0,550	0,922
C ¹⁸ / _{22,5}	279	2,94	0,580	0,622	2,94	0,580	0,892
C ²⁰ / ₂₅	306	3,15	0,610	0,598	3,15	0,610	0,862
C ²² / _{27,5}	332	3,35	0,640	0,574	3,35	0,640	0,834
C ²⁵ / ₃₀	357	3,54	0,670	0,552	3,54	0,670	0,806
C ²⁸ / ₃₅	418	4,01	0,740	0,497	4,01	0,730	0,739
C ³⁰ / ₃₇	440	4,18	0,770	0,477	4,18	0,760	0,715
C ³² / ₄₀	476	4,46	0,810	0,445	4,46	0,790	0,675
C ³⁵ / ₄₅	533	4,90	0,880	0,393	4,90	0,860	0,613
C ⁴⁰ / ₅₀	589	5,33	0,950	0,343	5,33	0,920	0,551
C ⁴⁵ / ₅₅	643	5,74	1,02	0,294	5,74	0,980	0,492
C ⁵⁰ / ₆₀	697	6,16	1,08	0,246	6,16	1,04	0,432

Таблица 7

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для жестких смесей марки по удобоукладываемости Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Цср ж2, кг/м3	Условия эксплуатации					
		СХ О			СХ У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	187	2,23	0,480	0,644	2,23	0,470	1,18
C ¹⁶ / ₂₀	241	2,65	0,530	0,600	2,65	0,530	1,12
C ¹⁸ / _{22,5}	268	2,86	0,560	0,579	2,86	0,560	1,10
C ²⁰ / ₂₅	293	3,05	0,590	0,559	3,05	0,590	1,07
C ²² / _{27,5}	318	3,24	0,620	0,539	3,24	0,620	1,05
C ²⁵ / ₃₀	341	3,42	0,640	0,520	3,42	0,640	1,02
C ²⁸ / ₃₅	397	3,85	0,710	0,476	3,85	0,700	0,967
C ³⁰ / ₃₇	419	4,02	0,730	0,458	4,02	0,730	0,945
C ³² / ₄₀	452	4,27	0,770	0,432	4,27	0,770	0,912
C ³⁵ / ₄₅	507	4,70	0,820	0,388	4,70	0,820	0,857
C ⁴⁰ / ₅₀	560	5,11	0,880	0,345	5,11	0,880	0,804
C ⁴⁵ / ₅₅	611	5,50	0,940	0,304	5,50	0,930	0,753
C ⁵⁰ / ₆₀	663	5,90	1,00	0,263	5,90	0,990	0,701

Таблица 8

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для жестких смесей марки по удобоукладываемости Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Цср ж2, кг/м3	Условия эксплуатации					
		ОПЗ О			ОПЗ У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	187	2,23	0,470	0,337	2,23	0,460	0,913
C ¹⁶ / ₂₀	241	2,65	0,530	0,283	2,65	0,520	0,848
C ¹⁸ / _{22,5}	268	2,86	0,560	0,256	2,86	0,560	0,816
C ²⁰ / ₂₅	293	3,05	0,590	0,231	3,05	0,590	0,786
C ²² / _{27,5}	318	3,24	0,620	0,206	3,24	0,620	0,756
C ²⁵ / ₃₀	341	3,42	0,640	0,183	3,42	0,640	0,728
C ²⁸ / ₃₅	397	3,85	0,700	0,127	3,85	0,710	0,661
C ³⁰ / ₃₇	419	4,02	0,730	0,105	4,02	0,740	0,635
C ³² / ₄₀	452	4,27	0,770	0,072	4,27	0,780	0,595
C ³⁵ / ₄₅	507	4,70	0,820	0,017	4,70	0,840	0,529
C ⁴⁰ / ₅₀	560	5,11	0,880	-0,036	5,11	0,900	0,466
C ⁴⁵ / ₅₅	611	5,50	0,940	-0,087	5,50	0,970	0,404
C ⁵⁰ / ₆₀	663	5,90	0,990	-0,139	5,90	1,03	0,342

Таблица 9

Значения коэффициентов γ_1 – γ_3 для различных классов бетона по прочности на сжатие и условий эксплуатации для жестких смесей марки по удобоукладываемости Ж2

Класс бетона по прочности на сжатие	Расчетное содержание цемента, Ц _{ср ж2} , кг/м ³	Условия эксплуатации					
		А О			А У		
		γ_1	γ_2	γ_3	γ_1	γ_2	γ_3
C ¹² / ₁₅	187	2,23	0,470	0,705	2,23	0,480	0,993
C ¹⁶ / ₂₀	241	2,65	0,530	0,656	2,65	0,540	0,934
C ¹⁸ / _{22,5}	268	2,86	0,560	0,632	2,86	0,560	0,904
C ²⁰ / ₂₅	293	3,05	0,590	0,609	3,05	0,590	0,877
C ²² / _{27,5}	318	3,24	0,620	0,587	3,24	0,620	0,849
C ²⁵ / ₃₀	341	3,42	0,650	0,566	3,42	0,650	0,824
C ²⁸ / ₃₅	397	3,85	0,720	0,516	3,85	0,710	0,762
C ³⁰ / ₃₇	419	4,02	0,740	0,496	4,02	0,730	0,738
C ³² / ₄₀	452	4,27	0,790	0,466	4,27	0,770	0,702
C ³⁵ / ₄₅	507	4,70	0,850	0,417	4,70	0,830	0,641
C ⁴⁰ / ₅₀	560	5,11	0,910	0,369	5,11	0,880	0,583
C ⁴⁵ / ₅₅	611	5,50	0,970	0,323	5,50	0,940	0,527
C ⁵⁰ / ₆₀	663	5,90	1,04	0,276	5,90	1,00	0,470

Список источников

1. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель: Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2019. – 215 с.
3. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 263 с.
4. 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.
5. Васильев, А. А. Прогнозирование во времени карбонизации бетона различных классов по прочности на сжатие / А. А. Васильев, Ю. К. Кабышева, Н.А. Леонов // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS : сб. статей LXXII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2023. – С. 34–39.