

УДК 624.011.2:692.46(476.2)

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

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 полученной экспериментальной регрессионной зависимости начальной карбонизации бетонов классов по прочности на сжатие  $C^{12/15}$ –  $C^{30/37}$  составов марки по удобоукладываемости П1 выведена зависимость изменения по сечению бетона карбонатной составляющей (показателя КС) от количества использованного цемента. Получены коэффициенты для зависимости начальной карбонизации для марок смеси по удобоукладываемости П1, Ж1 и Ж2 бетонов классов по прочности на сжатие  $C^{12/15}$ –  $C^{50/60}$ .

**Ключевые слова:** цемент, бетон, карбонатная составляющая, начальная карбонизация.

## PREDICTION OF INITIAL CONCRETE CARBONIZATION DIFFERENT COMPRESSIVE STRENGTH CLASSES

Vasiljev Alexander Anatoljevich,  
Kabysheva Uliya Konstantinovna,  
Leonov Nikolaj Aleksandrovich

**Abstract:** Based on the obtained experimental regression dependence of the initial carbonization of concretes of compressive strength classes  $C^{12/15}$ –  $C^{30/37}$  compositions of the grade by workability, the dependence of the change in the section of concrete of the carbonate component (CC indicator) on the amount of cement used M1 derived. Coefficients are obtained for dependence of initial carbonization for grades of mixture by M1, H1 and H2 concrete of compressive strength classes  $C^{12/15}$ –  $C^{50/60}$ .

**Keywords:** cement, concrete, carbonate component, initial carbonization.

Карбонизация бетона, в первую очередь, определяет коррозионное состояние, техническое состояние, долговечность и остаточный ресурс железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных атмосферных средах [1-3].

С учетом того, что существующие методы исследования карбонизации бетона, основанные на фенолфталеиновом тесте (ФФТ) не позволяют оценивать и прогнозировать карбонизацию и ее влияние на состояние защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре, в [4] предложено исследовать и оценивать карбонизацию бетона по величине карбонатной составляющей (показателя КС), позволяющей количественно оценивать карбонизацию и ее влияние на изменение защитных свойств бетона по отношению к стальной арматуре.

На основе исследования по сечению бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов марок по удобоукладываемости П1 (ОК = 1 и 4 см)) сразу после изготовления с применением ТВО методами регрессионного и корреляционного анализа была получена зависимость начальной карбонизации [5].

Регрессионная зависимость изменения показателя  $KC_0$  (начальной карбонизации) 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:  $\beta_0$  – наименьшее значение  $KC(l)$ , % [обычно,  $\beta_0 = KC(l > 100 \text{ мм})$ ];  $\beta_1$  – разность минимального и максимального значений  $KC(l)$ , %;  $\beta_2$  – минимальное значение глубины  $l$ , мм, (обычно,  $\beta_2 = 0$ );  $\beta_3$  – форму кривой и координаты точек перегиба, мм,  $\beta_3 > 0$ ;  $\beta_4$  – форму кривой и координаты точек перегиба, д. ед.,  $\beta_4 > 0$ ;  $l$  – расчетное значение глубины бетона, мм.

Необходимо отметить, что при разработке математической модели начальной карбонизации пользовались следующими допущениями: после глубины 50 мм скорость развития карбонизации постоянна для любого класса бетона по прочности на сжатие (состава бетонной смеси); граничное значение начальной карбонизации – 100 мм.

Полученные коэффициенты  $\beta_0 - \beta_4$  для различных классов бетона по прочности на сжатие, для различных составов, в зависимости от количества использованного цемента приведены в таблице 1.

Путем математической обработки полученных коэффициентов  $\beta_0$  и  $\beta_1$  получены зависимости их значений от количества использованного цемента:

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

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

где  $Ц$  – содержание цемента, кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1

Значения коэффициентов  $\beta_0 - \beta_4$  регрессионных зависимостей  $l-KC_0$  для различных классов бетона по прочности на сжатие составов с ОК = 1 и 4 см

Класс бетона по прочности на сжатие	Содержание цемента, кг/м <sup>3</sup>	$\beta_0$	$\beta_1$	Содержание цемента, кг/м <sup>3</sup>	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	194	2,33	740742	212	2,44	777985	-100	5,05	0,85
C <sup>16</sup> / <sub>20</sub>	250	2,64	863755	273	2,89	885691			
C <sup>18</sup> / <sub>22,5</sub>	277	2,94	914926	302	3,14	960355			
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	303	3,09	938093	331	3,34	1005577			
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	328	3,29	983110	349	3,48	1028144			
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	353	3,42	1028144	392	3,82	1090045			
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	411	3,92	1130050	457	4,32	1220032			
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	434	4,12	1174605	482	4,52	1266807			

В общем виде, зависимость начальной карбонизации бетона от количества использованного цемента

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

Для возможности прогнозирования значений  $KC_0$  для бетонов различных классов по прочности на сжатие, с учетом того, что 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 %, логично было бы в зависимостях (2) и (3) использо-

вать средние значения количества цемента ( $C_{cp}$ ). Логично, но не корректно, поскольку для изготовления ЖБЭ и ЖБК используются составы не всех марок по подвижности. Базовые зависимости для средних значений показателя КС (для бездобавочных бетонов) для наиболее часто выпускаемых сборных железобетонных изделий целесообразно получить для подвижных смесей марки по удобоукладываемости П1, для жестких – Ж1 и Ж2. Причем, для марки П1, с учетом массовости применяемых составов с ОК = 3 (4) см, целесообразно принимать не среднее значение количества цемента, а соответствующее верхней границе (ОК = 4 см).

Полученные на основе использования зависимостей 2 и 3 коэффициенты  $\beta_0$  и  $\beta_1$  для бетонов различных классов по прочности на сжатие, для ЖБЭ, производимых по различным технологиям приведены в таблицах 2–4.

Таблица 2

**Значения коэффициентов  $\beta_0$  и  $\beta_1$  для различных классов бетона по прочности на сжатие, подвижных смесей**

Класс бетона по прочности на сжатие	Содержание цемента, для смесей П1...П5, Ц, кг/м <sup>3</sup>	Содержание цемента, ЦП1, кг/м <sup>3</sup> , для смесей П1 с ОК = 1...4 см	Расчетное содержание цемента, Цр П1, кг/м <sup>3</sup>	$\beta_0$	$\beta_1$
C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	195...265	195...213	213	2,43	785959
C <sup>16</sup> / <sub>20</sub>	252...343	252...275	275	2,91	895662
C <sup>18</sup> / <sub>22,5</sub>	279...385	279...305	305	3,14	948744
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	306...448	306...334	334	3,37	1000057
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	331...471	331...364	364	3,60	1053139
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	357...513	357...397	397	3,85	1111529
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	418...599	418...464	464	4,37	1230079
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	441...490	441...490	490	4,57	1276083
C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	476...682	476...529	529	4,87	1345090
C <sup>35</sup> / <sub>45</sub>	533...763	533...592	592	5,35	1456562
C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>	589...842	589...654	654	5,83	1566265
C <sup>45</sup> / <sub>55</sub>	644...919	644...714	714	6,29	1672429
C <sup>50</sup> / <sub>60</sub>	697...995	697...774	774	6,75	1778593

Таблица 3

**Значения коэффициентов  $\beta_0$  и  $\beta_1$  для различных классов бетона по прочности на сжатие, жестких смесей**

Класс бетона по прочности на сжатие	Содержание цемента, кг/м <sup>3</sup> , для смесей Ж1...Ж4 (5...40 с)	Содержание цемента, ЦЖ1, кг/м <sup>3</sup> , для смесей Ж1 (5...10 с)	Среднее содержание цемента, Цср ж1, кг/м <sup>3</sup>	$\beta_0$	$\beta_1$
C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	198...170	198...191	195	2,30	754110
C <sup>16</sup> / <sub>20</sub>	256...220	256...248	252	2,73	854966
C <sup>18</sup> / <sub>22,5</sub>	284...243	284...274	279	2,94	902740
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	311...266	311...300	306	3,15	950513
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	337...289	337...326	332	3,35	996518
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	364...310	364...350	357	3,54	1040753
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	426...353	426...409	418	4,01	1148686
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	449...373	449...431	440	4,18	1187613
C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	485...403	485...466	476	4,46	1251311
C <sup>35</sup> / <sub>45</sub>	543...451	543...522	533	4,90	1352167
C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>	600...499	600...577	589	5,33	1451254
C <sup>45</sup> / <sub>55</sub>	656...545	656...630	643	5,74	1546801
C <sup>50</sup> / <sub>60</sub>	711...591	711...683	697	6,16	1642349

Таблица 4

**Значения коэффициентов  $\beta_0$  и  $\beta_1$  для различных классов бетона по прочности на сжатие, жестких смесей**

Класс бетона по прочности на сжатие	Содержание цемента, кг/м <sup>3</sup> , для смесей Ж1...Ж5 (5...40 с)	Содержание цемента, ЦЖ2, кг/м <sup>3</sup> , для смесей Ж2 (11...20 с)	Среднее содержание цемента, Ц <sub>ср ж2</sub> , кг/м <sup>3</sup>	$\beta_0$	$\beta_1$
C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	198...170	190...183	187	2,23	739955
C <sup>16</sup> / <sub>20</sub>	256...220	246...236	241	2,65	835502
C <sup>18</sup> / <sub>22,5</sub>	284...243	273...262	268	2,86	883276
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	311...266	299...287	293	3,05	927511
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	337...289	324...311	318	3,24	971746
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	364...310	348...334	341	3,42	1012442
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	426...353	406...387	397	3,85	1111529
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	449...373	429...408	419	4,02	1150456
C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	485...403	463...441	452	4,27	1208846
C <sup>35</sup> / <sub>45</sub>	543...451	519...494	507	4,70	1306163
C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>	600...499	573...546	560	5,11	1399941
C <sup>45</sup> / <sub>55</sub>	656...545	626...596	611	5,50	1490180
C <sup>50</sup> / <sub>60</sub>	711...591	679...646	663	5,90	1582189

**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. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) : [монография] / А. А. Васильев; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 303 с.
3. 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.
4. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций на основе методов рН- и карбометрии / А. А. Васильев, В. П. Богданов // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т. 11. – № 1. – С. 110–116.
5. А. А. Васильев, Д. Н. Шевченко Математическая расчетно-экспериментальная модель начальной карбонизации бетона // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – Гомель: БелГУТ, 2016. – №2 (33). – С. 176–179.