

УДК 691.32 : 624.012.45/46

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Ю. К. КАБЫШЕВА, В. А. ДОЛЯ, Н. А. ЛЕОНОВ, магистранты, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

Показана необходимость исследования граничных значений карбонизации бетона. Предложена характеристика предельной величины карбонизации бетона (показателя ПВК) и приведена методика ее определения для цементно-песчаной фракции бетона. Выполнены расчеты показателя ПВК и приведены математические зависимости показателя ПВК от количества использованного цемента для бетонов различных классов по прочности на сжатие, бездобавочных смесей марок по удобоукладываемости П1–П5 и Ж1–Ж4 для отпусковой прочности бетона на сжатие 70 %. Выполнен анализ зависимости показателя ПВК от состава бетона.

**В**ведение. Карбонизация бетона является основным видом коррозии бетона железобетонных элементов (ЖБЭ) и конструкций (ЖБК), эксплуатирующихся в различных воздушных средах [1–3]. Развиваясь во времени, она нейтрализует бетон, снижая (до полной потери) защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, что создает условия для возникновения и развития коррозии стальной арматуры. Интенсивность коррозии стальной арматуры обуславливает скорость снижения несущей способности ЖБЭ (ЖБК). Таким образом, карбонизация бетона определяет долговечность ЖБЭ и ЖБК, эксплуатирующихся в различных атмосферных условиях [3].

Карбонизацию бетона оценивают и прогнозируют на базе 1-го закона Фика, используя индикаторный (фенолфталеиновый) тест (ФФТ). Степень карбонизации определяется количеством поглощенного углекислого газа воздуха ( $\text{CO}_2$ ) [1].

По результатам многолетних исследований в работах [4–10] показано, что карбонизация бетона не развивается линейно, по всему фронту, и, соответственно, 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. При карбонизации бетона происходит образование карбонатов ( $\text{CaCO}_3$ ), поэтому 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 рН (водородного показателя водной вытяжки цементного камня) являющегося основной количественной характеристикой перерождения цементного камня в карбонаты либо другие продукты химического взаимодействия под воздействием внешней среды и являющегося универсальной характеристикой состояния бетона и его защитных свойств по отношению к стальной арматуре [1–3]. Для определения показателя КС разработан экспресс-метод [11].

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

Карбонизация бетона продолжается в течение всего времени эксплуатации железобетона, однако для различных составов бетона максимальные значения карбонатной составляющей будут отличаться. Граничные значения карбонизации будут зависеть от количества использованного цемента и степени гидратации цемента ( $\alpha$ ) [12].

Для определения карбонизируемости бетонов различных составов необходимо определять и сравнивать предельные величины карбонизации в зависимости от содержания цемента.

**Основная часть.** Максимальную карбонизируемость бетона предложено оценивать предельной величиной карбонизации (ПВК) [3]. ПВК характеризует содержание карбонатов в бетоне в массовых процентах при условии, что весь  $\text{CaO}$  цемента полностью перейдет в  $\text{CaCO}_3$  ( $\alpha = 1$ ). 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 методике [3]:

- рассчитывать массу  $\text{CaO}$  ( $m_{\text{CaO}}$ ) в цементе для приготовления  $1 \text{ м}^3$  бетона:

$$m_{\text{CaO}} = m_{\text{ц}} k, \quad (1)$$

где  $m_{\text{ц}}$  – масса цемента, используемая для приготовления  $1 \text{ м}^3$  бетона;  $k$  – коэффициент, определяющий процентное содержание  $\text{CaO}$  в цементе;

- определять массу  $\text{CaCO}_3$  ( $m$ ) при карбонизации  $m_{\text{CaO}}$  в  $1 \text{ м}^3$  бетона из пропорции

$$\begin{aligned} M_{\text{CaO}} - M_{\text{CaCO}_3}; \\ m_{\text{CaO}} - m_{\text{CaCO}_3}; \\ m_{\text{CaCO}_3} = \frac{m_{\text{CaO}} M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CaO}}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M_{\text{CaO}}$  – молекулярная масса  $\text{CaO}$  (56 г/моль, или 56 кг);  $M_{\text{CaCO}_3}$  – молекулярная масса  $\text{CaCO}_3$  (100 г/моль, или 100 кг);  $m_{\text{CaO}}$  – масса  $\text{CaO}$  в  $1 \text{ м}^3$  бетона;

- рассчитывать массу цементно-песчаной фракции  $m_{\text{цп}}$ , кг, в  $1 \text{ м}^3$  бетона с учетом привеса за счет полного превращения  $\text{CaO}$  в  $\text{CaCO}_3$ :

$$m_{\text{цп}} = 1,15\text{Ц} + \text{П} + (m_{\text{CaCO}_3} - m_{\text{CaO}}), \quad (3)$$

где  $\text{Ц}$  – масса цемента, кг, в  $1 \text{ м}^3$  бетона;  $\text{П}$  – масса песка, кг, в  $1 \text{ м}^3$  бетона;

- вычислять значение ПВК, %, из пропорции

$$m_{\text{цп}} - 100 \%,$$

$$m_{\text{CaCO}_3} - \text{ПВК},$$

$$\text{ПВК} = \frac{m_{\text{CaCO}_3} \cdot 100}{m_{\text{цп}}} \quad (4)$$

Для оценки состава бетона на его максимальную карбонизируемость определяли значения ПВК 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 ДО ОАО «Белорусский цементный завод» ( $k = 0,66$ ).

Для каждого класса бетона по прочности на сжатие исследовалось по 65 составов для отпускной прочности, равной 70 %. Таким образом, было исследовано 975 составов.

На рисунке 1 приведены области значений ПВК для состава на класс бетона по прочности на сжатие  $C^{40}/50$ , для смесей П1–П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1–Ж4 (5–40 с).

Результаты исследований и анализа областей значений ПВК и полученной зависимости представлены в таблицах 1 и 2.

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

$$\text{ПВК} = k_1 \text{Ц} + k_2, \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент, определяющий минимальное значение ПВК,  $\frac{\% \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$ ,  $k_2$  – коэффициент прироста значений ПВК, %.

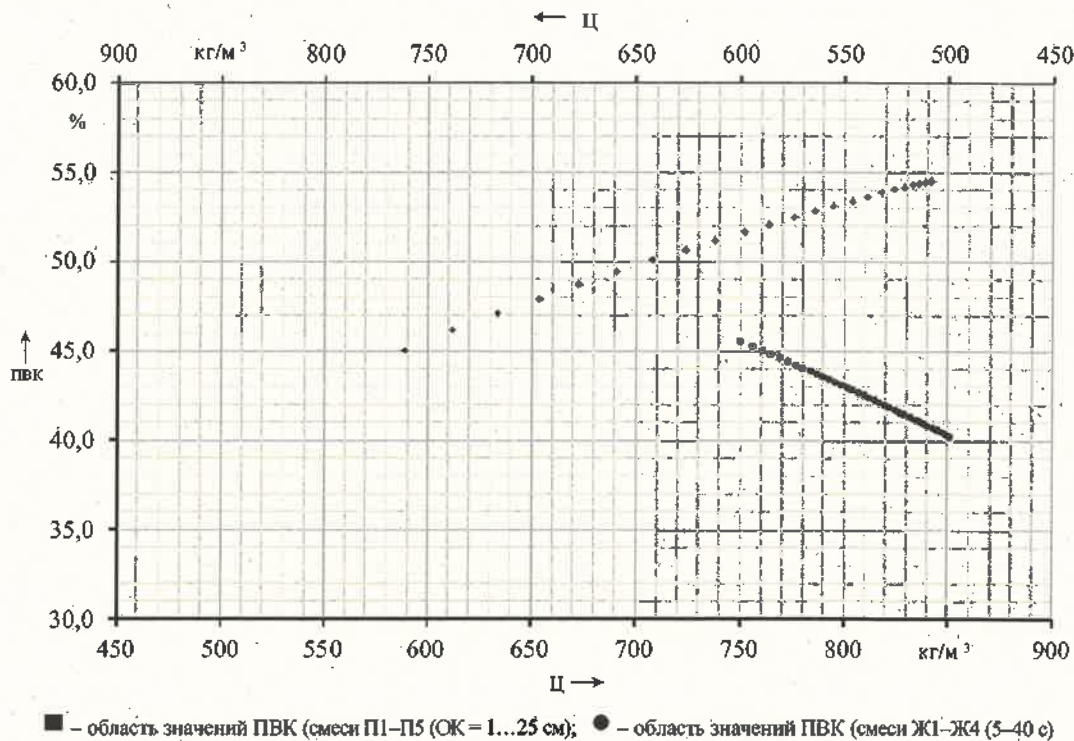


Рисунок 1 – Область значений ПВК для бездобавочного бетона класса по прочности на сжатие  $C^{40}/50$  (смеси П1–П5 (ОК = 1...25 см) и Ж1–Ж4 (5–40 с)) и отпускной прочности на сжатие 70 %

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 <sup>2</sup>	Предел значений Ц, кг/м <sup>3</sup>	Предел значений ПВК, %	Среднее значение ПВК, % для марки по удобоукладываемости				
					П1	П2	П3	П4	П5
$C^8/10$	0,0883 Ц + 2,791	0,9953	133–181	13,57–17,63	14,24	15,84	16,93	17,45	17,64
$C^{10}/12,5$	0,0781 Ц + 4,132	0,9960	165–224	16,76–21,47	17,52	19,39	20,66	21,30	21,49
$C^{12}/15$	0,0747 Ц + 5,324	0,9962	195–265	19,60–24,94	20,47	22,54	23,98	24,70	24,95
$C^{16}/20$	0,0683 Ц + 7,677	0,9973	252–343	24,60–30,92	25,59	28,03	29,76	30,61	30,91
$C^{18}/22,5$	0,0662 Ц + 8,549	0,9985	279–385	26,77–33,90	27,83	30,41	32,34	33,44	33,87
$C^{20}/25$	0,0644 Ц + 9,359	0,9987	306–428	28,79–36,76	29,89	32,73	35,08	36,26	36,72
$C^{22}/27,5$	0,0619 Ц + 10,39	0,9987	331–471	30,61–39,40	31,81	35,16	37,61	38,85	39,35
$C^{25}/30$	0,0592 Ц + 11,60	0,9987	357–513	32,40–41,81	33,84	37,40	39,95	41,24	41,77
$C^{28}/35$	0,0536 Ц + 14,22	0,9988	418–599	36,29–46,19	37,77	41,50	44,18	45,55	46,13
$C^{30}/37$	0,0509 Ц + 15,53	0,9981	441–632	37,64–47,55	39,14	42,91	45,62	46,94	47,48
$C^{32}/40$	0,0468 Ц + 17,75	0,9971	476–682	39,58–49,46	41,12	44,92	47,60	48,88	49,40
$C^{35}/45$	0,0410 Ц + 21,10	0,9964	533–763	42,49–52,22	44,02	47,83	50,40	51,64	52,16
$C^{40}/50$	0,0364 Ц + 24,09	0,9959	589–842	45,02–54,53	46,55	50,29	52,78	54,00	54,48
$C^{45}/55$	0,0326 Ц + 26,79	0,9958	644–919	47,27–56,55	48,75	52,39	54,84	56,01	56,49
$C^{50}/60$	0,0293 Ц + 29,32	0,9956	697–995	49,25–58,28	50,70	54,26	56,63	57,77	58,22

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

Класс бетона по прочности на сжатие	Зависимость ПВК = f(LD)	Коэффициент детерминации, R <sup>2</sup>	Предел значений Ц, кг/м <sup>3</sup>	Предел значений ПВК, %	Среднее значение ПВК, % для марки по удобоукладываемости			
					Ж1	Ж2	Ж3	Ж4
C <sup>8</sup> / <sub>10</sub>	0,1197 Ц – 2,345	0,9997	116–135	11,54–13,82	13,53	12,89	12,26	11,75
C <sup>10</sup> / <sub>12,5</sub>	0,1142 Ц – 2,067	0,9999	144–168	14,37–17,09	16,73	15,95	15,21	14,60
C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	0,1091 Ц – 1,660	0,9998	170–198	16,88–19,94	19,55	18,68	17,86	17,17
C <sup>15</sup> / <sub>20</sub>	0,0983 Ц – 0,178	0,9998	220–256	21,43–24,97	24,54	23,52	22,56	21,75
C <sup>18</sup> / <sub>22,5</sub>	0,0935 Ц + 0,683	0,9999	243–284	23,39–27,19	26,71	25,66	24,66	23,78
C <sup>20</sup> / <sub>25</sub>	0,0886 Ц + 1,713	0,9999	266–311	25,27–29,23	28,73	27,63	26,57	25,66
C <sup>22</sup> / <sub>27,5</sub>	0,0845 Ц + 2,620	0,9998	289–337	27,03–31,07	30,57	29,43	28,35	27,42
C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	0,0806 Ц + 3,620	0,9998	310–364	28,60–32,94	32,35	31,10	29,99	29,03
C <sup>28</sup> / <sub>35</sub>	0,0724 Ц + 6,079	0,9997	353–426	31,59–36,84	36,21	34,76	33,33	32,11
C <sup>30</sup> / <sub>37</sub>	0,0695 Ц + 7,030	0,9997	373–449	32,90–37,18	37,55	36,09	34,60	33,42
C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	0,0650 Ц + 8,665	0,9996	403–485	34,81–40,13	39,51	38,05	36,59	35,34
C <sup>35</sup> / <sub>45</sub>	0,0587 Ц + 11,22	0,9997	451–543	37,66–43,04	42,42	40,94	39,49	38,21
C <sup>40</sup> / <sub>50</sub>	0,0531 Ц + 13,78	0,9994	499–600	40,21–45,56	44,96	43,49	42,05	40,76
C <sup>45</sup> / <sub>55</sub>	0,0484 Ц + 16,18	0,9993	545–656	42,47–47,80	47,18	45,74	44,30	43,03
C <sup>50</sup> / <sub>60</sub>	0,0441 Ц + 18,52	0,9993	591–711	44,53–49,78	49,17	47,74	46,33	45,09

Анализ полученных данных показывает, что для одного класса бетона по прочности на сжатие для малопрочных бетонов, бездобавочных составов с подвижностью смеси П1–П5 значения ПВК отличаются на 4–6 %, с подвижностью смеси Ж1–Ж4 – на 2–4 %; для среднепрочных – соответственно на 8–10 и 4–5 %.

**Заключение.** Результаты исследований показывают, что для составов бетона одного класса по прочности на сжатие предельная карбонизируемость значительно отличается, соответственно, будет отличаться и долговечность как бетона, так и ЖБЭ (ЖБК). Это обязательно нужно учитывать при проектировании ЖБЭ и ЖБК. Необходимо, применяя рекомендуемые марки по подвижности, учитывать состав бетона и использовать как минимум средние значения ПВК для каждой марки смеси по удобоукладываемости.

#### 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. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 69–82.
- 5 Васильев, А. А. Совершенствование методов оценки технического состояния железобетонных элементов, эксплуатиру-

ющихся в условиях атмосферной агрессии / А. А. Васильев // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2 (41). – С. 21–28.

- 6 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.

- 7 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.

- 8 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.

- 9 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. – Минск : БНТУ, 2013. – С. 40–54.

- 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 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.

- 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 : Наука и просвещение, 2021. – С. 22–25.

Получено 07.04.2022

A. A. Vasilyev, Yu. K. Kabysheva, V. A. Dolya, N. A. Leonov. Analysis of the limit value of concrete carbonation for different classes of concrete by compressive strength.

The necessity of examination of boundary values of concrete carbonation is shown. The characteristic of the limit value of concrete carbonisation (PVC index) is proposed and the method of its determination for cement-sand fraction of concrete on is presented. Calculations of PVC index were made and mathematical dependencies of PVC index on quantity of used cement for concretes of various classes on compression strength, non-addition mixtures of grades on ease of laying P1–P5 and G1–G4 for tempering strength of concrete 70 % are given. Analysis of PVC index dependence on concrete composition was performed.