

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-127-136>

УДК 624.012.46/46

## Некоторые стохастические особенности карбонизации бетона и железобетона

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Осипов<sup>1)</sup>, асп. А. В. Захаренко<sup>1)</sup>, инж. В. М. Чик<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** Надежный расчет развития карбонизации бетона является основой прогноза коррозии стальной арматуры и долговечности железобетонных строительных конструкций. За последние 20 лет появились результаты исследований по стохастическим особенностям карбонизации защитного слоя бетона или его остаточной толщины в работающих в воздушном пространстве железобетонных конструкциях. При этом рекомендуется для моделирования защитного слоя бетона использовать нормальный закон распределения, а для его остаточной толщины – гистограмму, похожую на распределение экстремальных значений. Стохастическая оценка многочисленных (1211 результатов после отсеивания явно неудачных) измерений позволила установить достаточно большие величины коэффициентов вариации (максимум до 0,34 при средних около 0,19) показателей начальной карбонизации бетонов классов С12/15–С20/25. В то же время для бетонов классов С25/30 и С30/37 эти коэффициенты вариации уменьшились до 0,15 и 0,11 соответственно. Установлено, что плотность распределения случайных значений карбонизации бетонов классов С12/15–С18/22,5 при эксплуатации в условиях сельскохозяйственных помещений с повышенной агрессивностью среды после очистки выборки от явно посторонних значений, как правило, соответствует нормальному закону. При этом использование максимальных и минимальных величин карбонизации бетона в выборках для оценки коэффициентов вариации отличается от определения по всей выборке и нуждается в соответствующей корректировке. При эксплуатации бетонов классов С12/15–С18/22,5 в условиях сельскохозяйственных помещений в течение 10–40 лет средние величины коэффициентов вариации остаются примерно постоянными при колебании до  $\pm 0,01$  при среднем значении 0,11–0,12. Разброс отдельных коэффициентов вариации значений карбонизации бетона в течение этого периода времени уменьшается от 2 до 1,25 раза, а в дальнейшем, по-видимому, стабилизируется. В целом при определении срока карбонизации защитного слоя бетона следует учитывать стохастичность не только его толщины и скорости происходившего процесса, но и случайных значений карбонизации бетона при ее определенной скорости и глубине.

**Ключевые слова:** карбонизация бетона, стохастичность, коэффициент вариации, влияние времени, железобетонные конструкции

**Для цитирования:** Осипов, С. Н. Некоторые стохастические особенности карбонизации бетона и железобетона / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, В. М. Чик // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 2. С. 127–136. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-127-136>

## Some Stochastic Specific Features of Concrete and Reinforced Concrete Carbonization

S. N. Osipov<sup>1)</sup>, A. V. Zakharenko<sup>1)</sup>, V. M. Chik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Reliable calculation of concrete carbonization development is considered as a basis of forecasting corrosion of steel reinforcement and longevity of reinforced construction structures. Investigation results for stochastic specific features of carbonization in a protective concrete layer or its residual thickness in reinforced structures operating in airspace have been

### Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич  
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»  
ул. Ф. Скорины, 15б,  
220114, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 263-81-91  
up-niptis@rambler.ru

### Address for correspondence

Osipov Sergey N.  
UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.”  
15b F. Skoriny str.,  
220114, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 263-81-91  
up-niptis@rambler.ru

obtained for the last 20 years. In this case it is recommended for simulation of a protective concrete layer to use a normal law of distribution and a histogram which looks like distribution of extreme values is recommended for its residual thickness. Stochastic estimation for multiple measurements (1211 results excluding obviously unsuccessful ones) has made it possible to determine rather large values of variation coefficient (maximum values up to 0.34 with average index about 0.19) for indices of initial carbonization for C12/15–C20/25 concrete grades. At the same time these variation coefficients for C25/30 and C30/37 concrete grades have decreased up to 0.15 and 0.11, respectively. It has been established that density of distribution for random carbonization values of C12/15–C18/22.5 concrete grades being operated under conditions of agricultural premises with high aggressive environment corresponds, as a rule, to a normal law after excluding evidently unwanted values. In this connection use of maximum and minimum values of concrete carbonization in selections for estimation of variation coefficients differs from determination for the whole selection and it requires a corresponding correction. While operating C12/15–C18/22.5 concrete grades under conditions of agricultural premises in the period of 10–40 years average values of variation coefficients remain approximately constant with fluctuation up to  $\pm 0.01$  with average value of 0.11–0.12. Spread in some variation coefficient values for concrete carbonization is decreasing from two to 1.25-fold within this period of time and later on it likely becomes stabilized. As a whole while determining duration of concrete protective layer carbonization it is necessary to take into account not only stochasticity of concrete protective layer and carbonization rate but also random values of concrete carbonization at specific carbonization rate and depth.

**Keywords:** concrete carbonization, stochasticity, variation coefficient, time influence, reinforced structures.

**For citation:** Osipov S. N., Zakharenko A. V., Chik V. M. (2019) Some Stochastic Specific Features of Concrete and Reinforced Concrete Carbonization. *Science and Technique*. 18 (2), 127–136. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-127-136> (in Russian)

Исходя из практической простоты определения, карбонизация бетона – это процесс взаимодействия цементного камня с углекислым газом, приводящий к снижению щелочности жидкой фазы бетона [1, с. 202]. Ученые и производственники связывают процессы коррозии стальной арматуры с карбонизацией бетона. Относительно коррозии бетона при карбонизации у ведущих ученых существуют разные мнения. Так, автор известного учебника Ю. М. Баженов считает [2, с. 180], что до 2002 г. еще не были разработаны способы, которые позволяли бы надежно определять глубину разрушения бетона при коррозии на основе данных о его составе и об условиях агрессивного воздействия. Однако установлено, что для сохранения пассивности стали в бетоне необходим ее постоянный контакт с поровой жидкостью, щелочность которой должна иметь водородный показатель  $pH \geq 11,8$  без указания уровня карбонизации бетона [2, с. 183].

К началу XXI в. среди специалистов сложились различные мнения по вопросу скорости разрушения бетона и железобетона. Так, в [2, с. 169–181] описаны три основных механизма разрушения бетона: диффузионный, при котором глубина разрушения при прочих равных условиях зависит от  $\sqrt{t}$ , где  $t$  – время; диффузионно-кинетический, при котором глубина разрушения зависит от  $t$ ; кристаллизационный, когда разрушение структуры бетона происходит в результате кристаллизации мало-растворимых солей. При оценке коррозии ар-

матуры в бетоне отмечается [2, с. 182–188], что в плотном бетоне наиболее медленным процессом является диффузия  $CO_2$ , которая существенно увеличивается с ростом водоцементного отношения. Для описания процесса карбонизации бетона в нормальных влажностных условиях можно использовать уравнение диффузии Фика и получить зависимость роста глубины карбонизации в виде  $x = f(\sqrt{t})$ .

В монографии Е. П. Матвеева [3, с. 91] говорится, что интенсивность разрушения бетона при появлении первых признаков возрастает по зависимости, пропорциональной квадрату времени.

В работах А. А. Васильева [4, 5] отмечается, что основным видом коррозии бетона в железобетонных элементах и конструкциях, эксплуатируемых в различных воздушных средах, является карбонизация. Значительная толщина защитного слоя и щелочная среда самого бетона обеспечивают ему наличие защитных свойств по отношению к стальной арматуре [4, с. 9].

В коллективном труде ведущих белорусских ученых [6] рассмотрено взаимное влияние процессов карбонизации и изменения водородного показателя  $pH$  бетона на интенсивность коррозии стальной арматуры. При этом развитие процессов карбонизации и изменения показателя  $pH$  во времени  $t$  определяются на основе диффузионной кинетики в соответствии с первым законом Фика для молекулярной диффузии  $CO_2$  в порах бетона [6, с. 6], что ранее было предложено С. Н. Алексеевым и Н. К. Розента-

лем [7], и пропорционально  $\sqrt{t}$ . Однако, как показывают расчеты, количественные различия в величинах эффективных коэффициентов диффузии  $\text{CO}_2$  в бетонах по опубликованным данным [7], на которые ссылаются авторы [6, с. 11], достигают двух порядков. Определенные согласно [8] эффективные коэффициенты диффузии  $\text{CO}_2$  ( $D = 0,006\text{--}1,440 \text{ см}^2/\text{с}$ ) для одних и тех же бетонов в условиях периодического увлажнения осадками и без увлажнения также отличаются более чем на два порядка. Поэтому оценка влияния времени на практическую карбонизацию бетонов в реальных условиях эксплуатации, а не в лабораторных условиях, может существенно отличаться от используемых до настоящего времени расчетных зависимостей.

На основе обобщенного анализа известных закономерностей сделан вывод [9], что ни одна из моделей не дает возможности с высокой достоверностью рассчитывать глубину карбонизации бетона на всем периоде эксплуатации и легко объясняется множеством не учитываемых при прогнозе факторов. В то же время расчет по оригинальному программному продукту В. В. Бабицкого с учетом водонепроницаемости бетона [10] для средних значений достаточно достоверен.

Из опубликованных результатов испытаний процессов карбонизации бетона наибольший интерес представляют работы А. А. Васильева [4, 5], где частично приведены фактические результаты наблюдений, на основании которых для описания процесса карбонизации при определенной долговечности бетона ( $t$ , лет) используется выражение [4, (2.4)]:

$$K_c = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{t}, \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – показатель начальной карбонизации, %;  $\alpha_1$  – то же скорости карбонизации ( $\%/\sqrt{t}$ );  $t$  – величина прогнозного периода, лет.

Большой интерес представляет обоснование учета показателя начальной карбонизации бетона  $\alpha_0$ , приведенное в [4]. Для определения величин  $\alpha_0$  для каждого состава бетона на определенный класс по прочности исследовалось по четыре кубика для каждого из десяти сечений с шагом 2,5 мм. Был получен набор показателей карбонизации  $K_c$  (по 10 значений) с учетом отбраковки с погрешностью более 10 %.

Далее на многочисленных рисунках [4, рис. 2.2; 2.3; Б.1–Б.40] приведены гистограммы остатков с нанесенными функциями плотности нормального распределения, по которым можно достаточно надежно оценить величины относительных коэффициентов вариации  $V$ . Однако в пределах одного класса бетона (приведены данные по пяти классам бетона: C12/15; C16/20; C20/25; C25/30 и C30/37) различия в величинах  $V$  достигают двух- и трехкратных значений.

Для компенсации погрешностей определения значений  $V$  по рисункам использованы вероятности  $P_1(x) = 0,99$  и  $P_2(x) = 0,98$ . Средние по всей исследованной толщине (2,5–25,0 мм) бетона значения  $\bar{V}$  имеют тенденцию к резкому уменьшению при переходе к бетонам марок C25/30 и C30/37, что, по-видимому, частично связано с уменьшением водоцементного отношения до 0,45 и 0,39.

Необходимо отметить, что отношения полученных максимальных и минимальных значений  $V_i$  для бетонов классов C12/25–C20/25 составили  $V_{i,\max}/V_{i,\min} \approx 3,5$  при  $V_{i,\max} = 0,341\text{--}0,302$  и  $V_{i,\min} = 0,098\text{--}0,086$ , а для классов C25/30 и C30/37 снизились до 2,0 при уменьшении их средних значений с 0,213–0,175 ( $P_1(x)$ ) и 0,188–0,153 ( $P_2(x)$ ) до 0,110–0,107 ( $P_1(x)$ ) и 0,097–0,095 ( $P_2(x)$ ), что соответствует примерно 1,94–1,64 раза. Следовательно, процессы начальной карбонизации бетона достаточно высоких марок (C25/30 и C30/37) протекают стабильнее по сравнению с бетонами низких марок (C12/25–C20/25). Поэтому возможную очень сильную нестабильность определяемого параметра  $K_c$  (5-й класс по [11]) при оценке вероятности коррозии стальной арматуры в железобетонных строительных элементах для бетонов низких классов необходимо учитывать и при оценке расчетной долговечности.

Приведенные в [4, с. 147–169] результаты измерений показателей карбонизации  $K_c$  (%) для железобетонных элементов, изготовленных из бетонов классов C12/15, C18/22,5, C16/20 с осадками конусов 1 см (OK1) и 4 см (OK4) в количестве 1211 образцов, в условиях сельскохозяйственных помещений с повышенной агрессивностью среды при сроке службы примерно от 10 до 40 лет позволяют оценить вид и параметры плотности распределения  $K_c$  как случайной величины. Стохастический анализ этих экспериментальных данных [4, с. 147–169] произведен:

1) без учета оценки их однородности в рассматриваемом массиве (П1);

2) с учетом оценки их однородности (отклонение коэффициентов вариации  $V$  в каждой группе данных для определенной длительности эксплуатации не должно превышать 10 % средней величины  $0,1\bar{V}$  для всего периода) в рассматриваемом массиве (П2).

В каждом из этих подходов рассматривали по пять вариантов исследования:

1) распределений значений  $K_c$  по всему массиву данных с учетом первоначальной карбонатной составляющей  $\alpha_0$ ;

2) относительных величин  $K_c$  по средним значениям в каждой из временных групп с учетом  $\alpha_0$ ;

3) относительных величин  $K_c$  по среднему значению всей выборки с учетом  $\alpha_0$ ;

4) относительных величин  $K_c$  по средним значениям в каждой из временных групп без учета  $\alpha_0$ ;

5) относительных величин  $K_c$  по среднему значению всей выборки без учета  $\alpha_0$ .

Для оценки соответствия распределения экспериментальных значений  $K_c$  нормальному закону использовались методы:

1) косвенный – на основании проверки величин коэффициента асимметрии и выборочно-го эксцесса и их ошибок, которые не должны превышать стандартные значения более трех раз. Сюда можно отнести также оценку допустимой погрешности среднего значения (не более 3 %);

2) графический – путем анализа частотной гистограммы с нормально-вероятностным графиком;

3) расчетный – путем определения критерия Колмогорова – Смирнова ( $p > 0,2$ ).

Необходимо отметить, что для бетонов класса С12/15 в [4, с. 147–149 и 159–161] с ОК = 1 см и ОК = 4 см значения  $K_c$  аналогичны, поэтому они анализировались совместно (табл. 1).

Учитывая близость средних величин  $K_c$  для бетонов классов С12/15, С16/20 и С18/22,5 [6, рис. 7.2], которая при  $t = 10–40$  лет составляет  $\Delta K_c < 2\%$  при большом разбросе ( $\approx 10\%$ ) отдельных значений, анализ распределений можно производить как по отдельным, так и по всем классам совместно.

В результате расчетов и анализа всего массива информации (общее количество случаев  $\Sigma n_i = 1211$ ) установлено, что соответствие значений  $K_c$  нормальному закону распределения подтверждается по П1 и П2 в 160 и 164 случаях из 175, т. е. примерно в 92 % (табл. 1). При этом в некоторых выборках количество случаев  $n_i$  с отклонением величин коэффициентов вариации менее  $0,1V$  от среднего значения уменьшалось до  $n_i = 84$  из 207 (табл. 1), что приводило к худшим показателям соответствия нормальному закону распределения. Для иллюстрации лучшего и худшего соответствий анализируемых данных по  $K_c$  бетонов нормальному закону распределения случайных величин на рис. 1 приведены графики, построенные для бетонов класса С16/20 при ОК = 1 см и ОК = 4 см.

Таблица 1

Суммарное количество ( $N$ ) критериев соответствия значений  $K_c$  нормальному закону распределения для бетонов различных классов и использованной выборки ( $n_i$ ) (где  $i = 1...5$  по одному из пяти рассмотренных вариантов) в зависимости от выбранного подхода (П1 или П2)

Total number ( $N$ ) of criteria for compliance of  $K_c$  values with normal distribution law for concrete having various grades and used data selection ( $n_i$ ) (where  $i = 1...5$  – by one from five considered variants) according to selected approach (П1 or П2)

$N, n_i$	Количество критериев соответствия для бетонов классов									
	С12/15, ОК = 1 см, ОК = 4 см		С16/20, ОК = 1 см		С16/20, ОК = 4 см		С18/22,5, ОК = 1 см		С18/22,5, ОК = 4 см	
	П1	П2	П1	П2	П1	П2	П1	П2	П1	П2
$N$	33×2	35×2	35	34	33	33	30	32	29	30
$n_1-n_3$	200×2	160×2	207	112	204	146	200	160	200	160
$n_4-n_5$	200×2	120×2	207	84	204	146	200	160	200	160

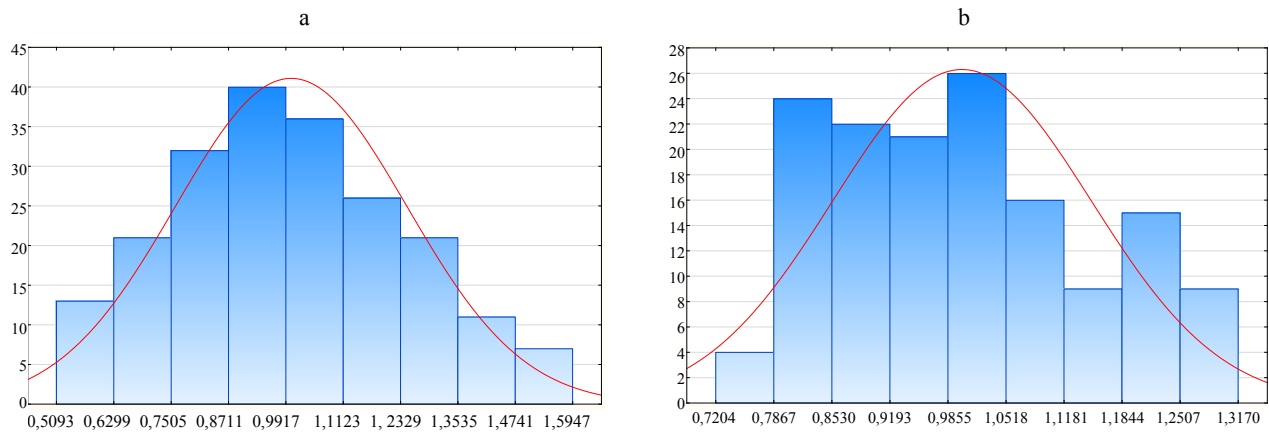


Рис. 1. Плотность распределения случайных значений показателя карбонизации бетона класса C16/20:  
а – наилучшая, ОК = 1 см; б – наихудшая, ОК = 4 см

Fig. 1. Density in distribution of random values for carbonization index of C16/20 grade-concrete:  
a – the best, ОК = 1 cm; b – the worst, ОК = 4 cm

Основываясь на приведенных результатах, можно считать, что распределение случайных значений показателя карбонизации бетона, по крайней мере классов C12/15–C18/22,5, за период 10–40 лет практически соответствует нормальному закону. Поэтому представляется достаточно обоснованным анализ вероятных величин коэффициентов вариации значений  $K_c$  для рассматриваемых классов бетона.

Как следует из нормального закона распределения случайной величины, ее значения можно определить из выражений:

$$x_{\max} = \bar{x}(1 + zV); \quad (2)$$

$$x_{\min} = \bar{x}(1 - zV), \quad (3)$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное значения случайной величины при заданной вероятности  $P(x)$ ;  $\bar{x}$  – среднее значение случайной величины по выборке;  $z$  – показатель достоверности в соответствии с вероятностью реализации;  $V$  – коэффициент вариации.

Из (1) и (2) следует:

$$V_1 = \frac{(x_{\max} / \bar{x}) - 1}{z}; \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{1 - (x_{\min} / \bar{x})}{z}; \quad (5)$$

$$V_3 = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{z(x_{\max} + x_{\min})}. \quad (6)$$

Величину коэффициента вариации, определенную обычным путем деления средне-

квадратического отклонения  $\sigma$  на  $\bar{x}$ , обозначим через  $V_4$ .

При нормальном законе распределения случайной величины  $x_i$  заданной вероятности  $P(x) = 0,8; 0,9; 0,95; 0,98$  и  $0,99$  соответствуют следующие величины показателей односторонней достоверности  $z$ :  $0,84; 1,29; 1,64; 2,05$  и  $2,32$ .

В случае существенной величины коэффициента вариации ( $V > 0,1$ ) необходимо учитывать возможную погрешность определения  $V$ , для чего можно использовать рекомендации К. А. Браунли [12, с. 48] по определению вероятного доверительного предела истинного значения дисперсии, на основании которого вероятное максимальное (минимальное) отношение  $V_{\max} / \bar{V}$  или  $V_{\min} / \bar{V}$  при  $n > 30-50$  определяется из выражения

$$\frac{V_{\max(\min)}}{\bar{V}} = 1 \pm \frac{t_c}{\sqrt{2n}}, \quad (7)$$

где  $t_c$  – критерий Стьюдента;  $n$  – количество используемых измерений.

Так, при  $n = 30$  и  $P(x) = 0,99; 0,98; 0,95$  и  $0,90$  отношения  $V_{\max} / \bar{V}$  соответственно составили  $1,35; 1,31; 1,26$  и  $1,22$ .

При  $n < 30-50$  с учетом критерия  $\chi^2$  (хи-квадрат) [11] при нормальном законе распределения измеряемых величин отношение  $\frac{V_{\max}}{\bar{V}}$  определяется формулой

$$\frac{V_{\max}}{\bar{V}} = \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2}} \quad (8)$$

Графические зависимости (8) приведены на рис. 2.

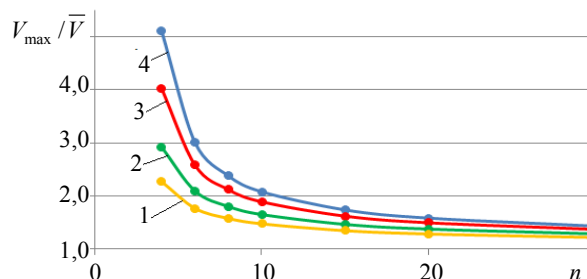


Рис. 2. Зависимость  $V_{\max}/\bar{V}$  от количества измерений  $n$  и критерия  $\chi^2$ : 1, 2, 3, 4 – при заданной вероятности  $P(V_i) = 0,90; 0,95; 0,98; 0,99$

Fig. 2. Dependence of  $V_{\max}/\bar{V}$  on number of measurements  $n$  and criterion  $\chi^2$ : 1, 2, 3, 4 – at specified probability  $P(V_i) = 0,90; 0,95; 0,98; 0,99$

Сравнение зависимостей (7) и (8) показывает, что при  $n = 30$  разница величин  $V_{\max}/\bar{V}$  незначительна и не превышает нескольких процентов. Однако если использовать (7) для расчета  $V_{\max}/\bar{V}$ , то при  $n = 4$  получаются следующие величины при соответствующих надежностьх: 3,05 (0,99); 2,59 (0,98); 2,13 (0,95) и 1,85 (0,90), что значительно отличается от полученных по (8). Однако вычисленные по (8) значения  $V_{\max}/\bar{V}$  при  $n < 10$  весьма велики, что свидетельствует о невысокой надежности стохастической оценки возможных величин определяемых параметров. Поэтому рекомендуемое в некоторых нормативных документах количество необходимых однократных измерений определяемых параметров  $n = 2-3$  может стать причиной появления небольшой надежности и долговечности таких изделий.

Практический интерес представляет оценка погрешностей при использовании выражений (4)–(6). Такая возможность возникает при применении массива информации [4, с. 147–169] в общем объеме 1211 случаев, что видно из табл. 2, где приведены расчетные значения для  $V_1/V_4$ ,  $V_2/V_4$  и  $V_3/V_4$  для всех шести выборок величин  $K_c$  при ОК = 1 см и ОК = 4 см (по трем классам бетона).

Таблица 2

Относительные отклонения коэффициентов вариации значений  $K_c$  по максимальным и минимальным величинам по сравнению с общепринятыми при  $P(x) = 0,95$

Relative deviation in coefficients for  $K_c$  value variations according to maximum and minimum rates in comparison with generally accepted ones at  $P(x) = 0,95$

Класс бетона	Осадка конуса, см	Относительное отклонение коэффициентов вариации значений $K_c$			
		$V_1/V_4$	$V_2/V_4$	$V_3/V_4$	Среднее
C12/15	1	1,025	0,954	0,983	0,987
	4	1,025	0,954	0,983	0,987
C16/20	1	1,109	0,944	1,010	1,021
	4	1,134	0,923	1,009	1,022
C18/22,5	1	1,027	0,886	0,946	0,953
	4	1,023	0,886	0,944	0,951
Среднее		1,057	0,924	0,979	0,987

Как видно из табл. 2, наибольшее отклонение  $V_i$  от  $V_4$  относится к определению по максимальным значениям  $V_1/V_4$  для бетона класса C16/20 с ОК = 4 см и составляет 13,4 % (1,134), а наименьшее отклонение для этого же бетона – при оценке по  $V_3$  (0,9 %). В среднем завышение и занижение средних  $V$ , определенных отдельно по максимальным и минимальным значениям  $K_c$ , составляют 5,7 % (1,057) и 7,6 % (0,924). Когда  $K_{c\max}$  и  $K_{c\min}$  используются совместно, отклонение от  $V_4$  составляет только 2,1 % (0,979). Следовательно, наиболее близкой (с возможной погрешностью примерно до 5 %) является оценка коэффициента вариации по  $V_3$ . В общем, среднее отклонение определения  $V$  по крайним значениям  $K_c$  может достигать 1,3 % (0,987), но в отдельных случаях – в среднем 4,9 % (0,951). Таким образом, даже для предварительно «очищенных» от резко отличающихся значений  $K_c$  [13, с. 16; 14, с. 41] в выборках возможные отклонения  $V_1$  могут отличаться от расчетных  $V_4$  на +(10–15) %,  $V_2$  на –(5–10) %, а при совместном использовании максимальных и минимальных значений – только примерно на (–5) %.

Существенный интерес представляет влияние времени на изменение коэффициентов вариации величин карбонизации бетонов. Как видно из рис. 3, на котором в виде точек различ-

ной конфигурации представлены величины  $V_i$  для 60 групп по 20 значений  $K_c$  [4, с. 147–169] при средних значениях  $K_c$  примерно от 11 до 12 %, в диапазоне срока службы от 10 до 40 лет в эксплуатационных условиях сельскохозяйственных помещений с повышенной агрессивностью среды, с ростом срока службы границы разброса  $V_i$  сужаются, а отношение  $V_{i,max}/V_{i,min}$  уменьшается примерно с 2,00 до 1,25.

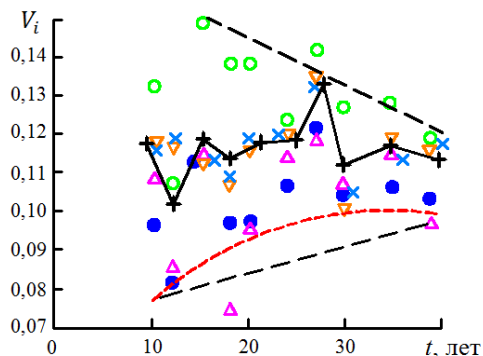


Рис. 3. Разброс значений коэффициентов вариации величин карбонизации бетонов классов C12/15–C18/22,5 при долговечности до 40 лет:

- – C12/15 (ОК = 1 см, ОК = 4 см); ▲ – C16/20 (ОК = 1 см);
- ▼ – C18/22,5 (ОК = 1 см); ● – C16/20 (ОК = 4 см);
- × – C18/22,5 (ОК = 4 см); + – среднее значение  $\overline{K_c}$ ;

— — — — граница разброса;

— — — — возможная нижняя граница разброса

Fig. 3. Spread of coefficient values in data variations for carbonization of C12/15–C18/22,5-grade concrete if operated for 40 years:

- – C12/15 (OK = 1 cm, OK = 4 cm); ▲ – C16/20 (OK = 1 cm);
- ▼ – C18/22,5 (OK = 1 cm); ● – C16/20 (OK = 4 cm);
- × – C18/22,5 (OK = 4 cm); + – average value  $\overline{K_c}$ ;

— — — — spread boundary;

— — — — possible bottom spread boundary

При этом нижняя граница разброса значений  $V_{i,min}$  заметно выполаживается до уровня примерно  $V_i \approx 0,1$ . Верхняя граница разброса величин  $V_{i,max}$  также значительно снижается, по-видимому, до уровня  $K_c \approx 0,11–0,12$ . Средние значения  $\overline{K_c}$  в каждый срок службы в восьми случаях из десяти (рис. 3) расположены в диапазоне  $K_c \approx 0,11–0,12$  и только в двух случаях выходят за эти границы. Так, при  $t = 12$  лет  $\overline{K_c} = 0,102 < 0,110$  и при  $t = 27$  лет  $\overline{K_c} = 0,133 > 0,120$ , что составляет только около 10 % отклонений от общего диапазона.

В последние годы появился ряд работ, в которых рассматриваются вопросы стохастичности распределения остаточной толщины защитного слоя бетона. Не имея возможности в статье рассмотреть труды этого направления, считаем необходимым упомянуть работу В. П. Чиркова [15] и две работы [13, 16], выполненные под руководством С. Н. Леоновича. Из [15] следует, что срок карбонизации бетона защитного слоя  $T_p$  с вероятностью  $P$  определяется из выражения

$$T_p = \beta \overline{a^2} / \overline{\alpha^2}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – параметр, характеризующий стохастичность карбонизации защитного слоя и зависящий от коэффициентов вариации  $V_a$  и  $V_\alpha$  соответственно толщины защитного слоя  $a$  и показателя скорости карбонизации  $\alpha$  при определенной вероятности реализации  $P$ ;  $\alpha$  – среднее математическое ожидание показателя скорости карбонизации бетона, мм/год;  $a$  – среднее математическое ожидание толщины защитного слоя, мм.

При этом распределение плотности вероятности срока карбонизации определяется выражением [15, (4), рис. 1], графическое изображение которого очень похоже на логнормальное распределение [12, с. 36; 14, с. 59]. Обозначенная погрешность расчетов сроков карбонизации бетона по сравнению с реальной существенно больше 1,2 %, приведенных в [15], в частности из-за отсутствия учета погрешности определения  $V_a$  и  $V_\alpha$ . В [13, с. 31] отмечено, что «для моделирования защитного слоя бетона следует применять нормальный закон распределения», а в [16, с. 68, 74, 75] приведены гистограммы распределения остаточной толщины защитного слоя бетона железобетонной конструкции при эксплуатации в различных условиях после 50 лет эксплуатации. Все эти гистограммы (12 шт.) отличаются от нормального закона распределения некоторой левосторонней асимметрией при условии совпадения вершинной (центральной) части распределения (рис. 4, кривая 1) [16, с. 68, рис. 1.29]. Приведенные в [16] гистограммы плотности вероятности распределения хорошо совпадают с распределением

экстремальных значений [14, с. 88, 89] в области  $-\infty < x < +\infty$ , имеющей функцию распределения в виде

$$F(x) = 1 - \exp\{-\exp[(x-a)/b]\}, \quad (10)$$

где  $a$  – мода;  $b > 0$  – параметр масштаба.

Кривая нормального закона распределения (рис. 4, кривая 1) хорошо аппроксимирующая вершинную часть гистограммы, характеризуется математическим ожиданием  $\bar{\mu} = (a - x_i) \approx 17$  мм при среднеквадратическом отклонении  $\sigma \approx 7,2$  мм, что дает коэффициент вариации  $V \approx 0,42$ . При этом площади, ограниченные гистограммой или кривой нормального закона распределения, отличаются совершенно незначительно ( $\approx 2\%$ ).

Однако при оценке начала процесса коррозии стальной арматуры с вероятностью, допустим,  $p = 0,05$  необходимо вать левый край гистограммы, уходящей в отрицательную область, означающей попадание стали в зону карбонизации при  $(a - x_c) < 0$ . Поэтому для адекватной оценки начала существенной коррозии стальной арматуры основной аппроксимации приведенной гистограммы кривой нормального закона распределения должно являться наилучшее совпадение левой зоны при  $(a - x_c) < 0$ , что обеспечивается кривой 2 на рис. 4, соответствующей нормальному закону при  $\bar{\mu} \approx 17$  мм,  $\sigma \approx 10$  мм и  $V \approx 0,59$ . При этом площади, ограниченные гистограммой или кривой нормального закона распределения, отличаются также совершенно незначительно ( $\approx 2\%$ ), а очень высокая величина коэффициента вариации свидетельствует о большой сложности проблемы оценки долговечности железобетонных конструкций.

Многие исследователи, получив одностороннюю гистограмму плотности распределения изучаемой случайной величины, стараются провести ее аппроксимацию нормальным законом распределения, который наиболее простой (характеристикой является лишь один параметр – «стандарт») и изученный.

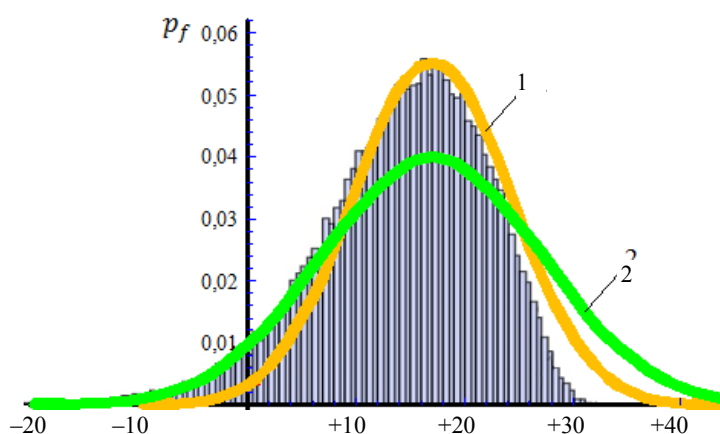


Рис. 4. Гистограмма распределения остаточной толщины защитного слоя бетона железобетонной конструкции при эксплуатации в наиболее неблагоприятном областном центре Беларуси после 50 лет эксплуатации (заштриховано):

- 1 – кривая нормального закона распределения при  $\bar{\mu} \approx 17$  мм и  $\sigma = 7,2$  мм;
- 2 – то же при  $\bar{\mu} \approx 17$  мм и  $\sigma = 10,0$  мм

Fig. 4. Histogram for distribution of residual thickness in concrete protective layer for reinforced concrete structure while being used in unfavourable administrative centre of Belarus after 50 years (this portion is shaded):

- 1 – curve for normal law of distribution at  $\bar{\mu} \approx 17$  mm and  $\sigma = 7.2$  mm;
- 2 – same at  $\bar{\mu} \approx 17$  mm and  $\sigma = 10.0$  mm

Для этого используются различные приемы, начиная от логарифмирования (логнормальное распределение), и многие другие, описанные даже известными учеными, в том числе Б. Л. Ван дер Варденом [17, с. 20–23, 86–93, 138–139, 263–267, 281–284, 380–382]. Поэтому описание гистограмм распределения, приведенных в [16], в рамках нормального закона можно считать допустимым.

## ВЫВОДЫ

1. Стохастичность показателей начальной карбонизации бетона ( $\alpha_0$ ) невысоких классов (C12/15–C20/25) характеризуется достаточно большими величинами коэффициентов вариации (до 0,34 при среднем около 0,19), которые с ростом прочности бетона (C25/30 и C30/37) значительно снижаются (до 0,15 при среднем около 0,11), что уменьшает возможный разброс значений долговечности железобетона.

2. Плотность распределения случайных значений карбонизации бетонов классов C12/15–C18/22,5 при эксплуатации в условиях сельскохозяйственных помещений с повышенной агрессивностью среды после очист-



ки выборки от явно посторонних значений, как правило, соответствует нормальному закону.

3. Использование максимальных и минимальных величин карбонизации бетона в выборках для оценки коэффициентов вариации отличается от определения по всей выборке и нуждается в соответствующей корректировке.

4. При эксплуатации бетонов марок С12/15–С18/22,5 в условиях сельскохозяйственных помещений в течение 10–40 лет средние величины коэффициентов вариации остаются примерно постоянными при колебании до  $\pm 0,01$  при среднем значении 0,11–0,12.

5. Разброс отдельных величин коэффициентов вариации значений карбонизации бетона в течение эксплуатации от 10 до 40 лет уменьшается от 2 до 1,25 раза, а в дальнейшем, по видимому, стабилизируется.

6. Плотности распределения толщины защитного слоя бетона и его остаточной глубины соответствуют или близки к нормальному закону. При этом важным условием аппроксимации полученной теоретической или экспериментальной гистограммы одновершинного распределения остаточной толщины защитного слоя бетона нормальным законом распределения является наилучшее соответствие левых частей расчетной кривой и гистограммы при глубине карбонизации, равной и более толщины защитного слоя.

7. При определении срока карбонизации защитного слоя бетона следует учитывать стохастичность не только толщины защитного слоя бетона и скорости карбонизации, но и случайных значений карбонизации бетона при определенной скорости карбонизации и глубине.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Большой строительный терминологический словарь-справочник: официальные и неофициальные термины и определения в строительстве, архитектуре, градостроительстве и строительной технике / В. Д. Наумов [и др.]; под ред. Ю. В. Феофилова. Минск: Минск-типпроект, 2008. 811 с.
2. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2002. 499 с.
3. Матвеев, Е. П. Реконструкция жилых зданий: в 2 ч. / Е. П. Матвеев. М.: ГУП ЦПП, 1999. Ч. 1: Теория, методы и технологии реконструкции жилых зданий. 367 с.
4. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона / А. А. Васильев. Гомель: БелГУТ, 2016. 264 с.
5. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций / А. А. Васильев. Гомель: БелГУТ, 2012. 263 с.
6. Неразрушающие методы оценки и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / Т. М. Пецольд [и др.] // Мин-во образ. Респ. Беларусь, БелГУТ, Ин-т повыш. квалиф. и переподг. руковод. и специал. транспортного комплекса Респ. Беларусь, Науч.-исслед. лабор. «Строит. констр., основания и фунда.» имени И. А. Кудрявцева. Гомель: БелГУТ, 2007. 145 с.
7. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь. М.: Стройиздат, 1976. 205 с.
8. Deutsche Ausschuss für Stahibeton, Hef 169, 1964, Hef 170, 1965, Hef 182, 1967.
9. Голшани, М. Прогнозирование глубины карбонизации бетона железобетонных мостовых конструкций / М. Голшани, В. В. Бабицкий, О. М. Вайтович // Строительная наука и техника. 2011. № 3. С. 13–16.
10. Бабицкий, В. В. Прочность бетона и глубина его карбонизации / В. В. Бабицкий // Инновации в бетоноведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: сб. ст. по материалам Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г.: в 2 ч. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: Э. И. Батыновский, В. В. Бабицкий. Минск, 2016. Ч. 1. С. 22–27.
11. Осипов, С. Н. Влияние стохастических характеристик свойств материалов, изделий и процессов на оценку нормативных параметров / С. Н. Осипов // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 4. С. 304–314. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-304-314>.
12. Браунли, К. А. Статистические исследования в производстве / К. А. Браунли; пер. с англ. В. А. Говоркова, под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Изд-во иностр. лит., тип. «Печат. двор» в Лгр., 1949. 228 с.
13. Леонович, С. Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при карбонизации / С. Н. Леонович, О. Ю. Чернякевич // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 28–31.
14. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. М.: Статистика, 1980. 96 с.
15. Чирков, В. П. Прогнозирование сроков карбонизации защитного слоя бетона / В. П. Чирков, А. Н. Кардангушев // Транспортное строительство. 1992. № 6. С. 30–33.
16. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях. В 2 ч. / С. Н. Леонович [и др.], под ред. С. Н. Леоновича. Минск: БНТУ, 2016. Ч. 2. 390 с.
17. Ван дер Варден, Б. В. Математическая статистика / Б. В. Ван дер Варден. М.: Иностран. лит.-ра, 1960. 435 с. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22137-2>.

Поступила 28.12.2017

Подписана в печать 01.03.2018

Опубликована онлайн 29.03.2019

## REFERENCES

1. Naumov V. D., Alyavdina T. I., Bedula N. V., Zholud' A. S., Zholud' T. V., Naumova L. V., Poslova T. G., Feofilova Yu. Yu., Frolova T. S., Lishai I. L., Feofilov Yu. V. (2008) *Unabridged Construction Terminology Reference-Dictionary: Official and Non-Official Terms and Definitions in Construction, Architecture, Urban Construction and Construction Equipment*. Minsk, Minsktipproekt Publ. 811 (in Russian).
2. Bazhenov Yu. M. (2002) *Technology of Concrete*. Moscow, Publishing House of Association of Educational Civil Engineering Institutions. 499 (in Russian).
3. Matveev E. P. (1999) *Reconstruction of Residential Buildings. Part 1. Theory, Methods and Technology for Reconstruction of Residential Buildings*. Moscow, GUP TsPP Publ. 367 (in Russian).
4. Vasiliev A. A. (2016) *Calculation and Experimental Model for Concrete Carbonization*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 264 (in Russian).
5. Vasiliev A. A. (2012) *Carbonization and Assessment of Reinforced Concrete Structure Damage*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 263 (in Russian).
6. Petso'd T. M., Bogdanov V. P., Babitskii V. V., Vasil'ev A. A. (2007) *Non-Destructive Methods for Evaluation and Prediction of Technical Conditions of Reinforced Concrete Structures Being Used in Air Environment*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 145 (in Russian).
7. Alexeev S. N., Rozenthal N. K. (1976) *Corrosive Resistance of Reinforced Concrete Structures in Aggressive Industrial Environment*. Moscow, Stroyizdat Publ., 205 (in Russian).
8. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Schriftenreihe*. W. Ernst, 1967. Vol. 182; 1964. Vol. 169; 1965. Vol. 170 (in German).
9. Golshani M., Babitsky V. V., Vaytovich O. M. (2011) Forecasting of Concrete Carbonization Depth in Reinforced Concrete Bridge Structures. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (3), 13–16 (in Russian).
10. Babitskii V. V. (2016) Strength of Concrete and its Carbonization Depth. *Innovations in Concrete Science, Construction Operations and Training of Engineering Personnel: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to 100<sup>th</sup> Anniversary of the Birthday of I. N. Akhverdov and S. S. Ataev, Minsk, June 9–10, 2016. Part 1*. Minsk, Belarusian National Technical University, 22–27 (in Russian).
11. Osipov S. N. (2017) Influence of Stochastic Characteristics of Properties in Materials, Products and Processes on Evaluation of Specified Parameters. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (4), 304–314 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-304-314>.
12. Brownlee K. A. (1949) *Statistical Investigations in Production*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature. 228 (in Russian).
13. Leonovich S. N., Tchemyakevich O. Yu. (2013) Prediction of Durability for Reinforced Concrete Structure while Using Carbonization. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials], (1), 28–31 (in Russian).
14. Hastings N., Peacock J. (1980) *Reference Book for Statistical Distribution*. Moscow, Statistika Publ. 96 (in Russian).
15. Tchirkov V. P., Kardangushev A. N. (1992) Prediction of Carbonization Period for Concrete Protection Layer. *Transportnoye Stroitel'stvo* [Transport Construction], (6), 30–33 (in Russian).
16. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack Resistance and Longevity of Constructional Concrete at Temperature and Corrosive Actions. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University. 390 (in Russian).
17. Waerden B. L. (1969) *Mathematical Statistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 371. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22137-2>.

Received: 28.12.2017

Accepted: 01.03.2018

Published online: 29.03.2019