

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251>

УДК 691.327

О стохастическом подходе к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций при карбонизации бетона

Докт. техн. наук, проф. С. Н. Осипов¹⁾, инж. В. М. Чик¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Существующие в настоящее время детерминированные модели определения долговечности конструкций не учитывают в полной мере разнообразие воздействующих на них факторов, а также стохастические характеристики используемых природных материалов и условия производства строительных изделий, возможные ошибки при проектировании и строительстве и т. п. Более достоверный подход, определяющий продолжительность и скорость развития деструкционных процессов в конструкциях в процессе эксплуатации, может быть получен при помощи статистических методов, учитывающих вероятностную сущность процесса. В статье приведен возможный подход вероятностного анализа долговечности железобетонных конструкций путем оценки коэффициентов вариации роста глубины карбонизации защитного слоя бетона на основании существующих опытных и расчетных данных об изменении этого показателя в железобетонных конструкциях разного типа. Показана вариабельность существующих подходов по определению долговечности конструкций в целом, в первую очередь за счет используемых в расчетах различных базисных переменных. Проведена стохастическая обработка имеющихся данных о параметрах глубин карбонизации защитного слоя бетона, на основании которой определены значения коэффициентов вариации, позволяющие оценить предполагаемую долговечность железобетонных конструкций, имеющих схожие характеристики и эксплуатируемых в одинаковых условиях. Установлена определенная неоднородность статистических показателей, что свидетельствует о необходимости увеличения сбора информации об исследуемых характеристиках, а также о более тщательной ее обработке. На основании статистической оценки существующих данных установлена целесообразность использования показателя водонепроницаемости бетона в качестве основного фактора, определяющего его долговечность.

Ключевые слова: долговечность, железобетонные конструкции, глубина карбонизации бетона, коэффициент вариации

Для цитирования: Осипов, С. Н. О стохастическом подходе к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций при карбонизации бетона / С. Н. Осипов, В. М. Чик // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 3. С. 241–251. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251>

On Stochastic Approach to Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Constructional Elements and Structures during Concrete Carbonization

S. N. Osipov¹⁾, V. M. Chik¹⁾

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

Abstract. The currently existing deterministic models for determination of structure service life do not take into account to the full extent variety of factors that have an effect on them and also stochastic characteristics of the used natural materials and conditions for manufacturing construction products, possible errors during the process of designing and construction etc. More trustworthy approach determining longevity and growth rate of destruction processes for structures in future periods can be obtained with the help of statistic methods that take into account a probabilistic essence of the process. The paper presents

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 156,
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

a possible approach of the probabilistic analysis on reinforced concrete structure service life while assessing rates of variation in depth growth of carbonization in a concrete protective layer on the basis of the existing experimental and calculated data pertaining to changes of the given index in reinforced concrete structures of various types. Variability of the existing approaches for determination of structure longevity as a whole has been shown firstly due to various number of basic variables used in calculations. Stochastic processing of the data on parameters of carbonization depth in the concrete protective layer has been carried out and this processing has made it possible to determine variation rates which allow to assess the pre-supposed service life of reinforced concrete structures having similar characteristics and being operated under analogous conditions. A definitive non-uniformity in statistic indices has been established that testifies about the necessity to increase accumulation of data on the investigated characteristics and to execute its processing more thoroughly. An expedience in usage of a concrete impermeability as a main factor determining its longevity has been established on the basis of statistical assessment of the existing data.

Keywords: service life, reinforced concrete structures, concrete carbonization depth, variation rate

For citation: Osipov S. N., Chik V. M. (2020) On Stochastic Approach to Evaluation of Service Life for Reinforced Concrete Constructional Elements and Structures during Concrete Carbonization. *Science and Technique*. 19 (3), 241–251. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-3-241-251> (in Russian)

Стохастический подход к оценке долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций позволяет на научной основе оценить этот параметр. В таком случае важным и наиболее сложным действием является правильный выбор вида распределения плотности вероятности случайных значений долговечности.

Применяемые в настоящее время детерминированные модели расчета глубины карбонизации бетона, которые до сих пор являются основой определения долговечности железобетона при обычном воздействии воздуха, влаги и нагрузок, в должной степени не учитывают возможного разнообразия природы разрушения твердых тел вследствие изменения условий эксплуатации, а также стохастические характеристики используемых природных материалов и условия производства строительных изделий, возможные ошибки при проектировании и строительстве, многие другие случайные воздействия.

С учетом аналогии определения срока службы конструкции с вероятностью депассивации арматуры авторы [1] применили вероятностную модель, при которой толщина защитного слоя бетона $a = 20$ мм постоянна, а ее отклонение Δa от проектного значения подчиняется нормальному закону распределения со средней величиной $\mu_a = +6$ мм и среднеквадратическим отклонением $\sigma_a = 10$ мм. При этом многие авторы для статистического моделирования толщины защитного слоя бетона допускают применение нормального закона распределения, что в итоговых расчетах [1] исполь-

зуется при прогнозе глубины карбонизации бетона в среднем 27 мм с обеспеченностью 50 % и до 44 мм – с обеспеченностью 98 % после эксплуатации конструкции на открытом воздухе в течение $t = 100$ лет.

Исходя из этих данных, коэффициент вариации нормального распределения глубины карбонизации бетона x составляет $V_x \approx 0,31$ (31 %) в случае применения нормального распределения значения отклонения от постоянной толщины защитного слоя при $V_0 = \sigma_a/\mu_a = 10/(+6) \approx 1,67$ (167 %), что является большой величиной. Показатель $V_x \approx 0,31$ обеспечивает близкую к нулевой вероятность реализации глубины карбонизации бетона в начале ($t \rightarrow 0$) эксплуатации железобетонного элемента или конструкции, соответствует выражению [1, (7)] для расчета глубины карбонизации бетона $x \rightarrow 0$ при $\geq 3\sigma$ и свидетельствует о правильности полученных результатов сложных вероятностных расчетов [1]. Однако, исходя из начальных условий ($a = 20$ мм и $\mu = +6$ мм), предельное количество среднеквадратических отклонений σ_a до нулевой величины защитного слоя бетона составляет $\alpha_{\max} = (a + \mu_a)/\sigma_a = 2,6$, что соответствует остаточной вероятности реализации 0,0035 [2, с. 110], или 0,35 %, т. е. величине, близкой к нулю. Следовательно, исходные предпосылки использования в [1] нормального закона распределения значений толщины защитного слоя бетона в условиях практических расчетов вполне оправданы и соответствуют выражению [1, (7)], согласно которому $x_c(t) = 0$ (при $t = 0$).

Учитывая практическую важность этих вычислений [1], следует кратко остановиться

на анализе использованных стохастических закономерностей для различных расчетных факторов.

Правильная количественная долговременная оценка надежности строительных материалов, изделий, элементов и конструкций до сих пор является сложной проблемой, о чем свидетельствует [3]. Надежность оценки в первую очередь связана с наличием большого количества базисных переменных и с их трудно определяемыми видами плотности распределения. При этом необходимо учитывать возможность изменения как видов, так и параметров данных распределений в течение длительного периода эксплуатации зданий при различных внешних (температура, влажность, ветер и др.) и внутренних условиях (температура, влажность и др.).

В [3] приведены европейские рекомендации по типам и параметрам распределения базисных переменных расчетных моделей железобетонных конструкций. Так, в табл. 5 [3] для определения прочности бетона на сжатие рекомендуется использовать логнормальное распределение, что противоречит рекомендациям [4] и требованиям СТБ 1544–2005 [5] по применению нормального (Гауссового) распределения. Здесь же [3, табл. 5] для определения защитного слоя бетона предложено применять гамма-распределение, которое при параметре C (целое число) соответствует распределению Эрланга [6, с. 71, 79]. Однако глубина карбонизации бетона, сокращающая толщину его защитного слоя, определяется переменной частью x_m , которая при стандартном отклонении $\sigma_x = 5$ мм и коэффициенте вариации $V = 0,17$ составляет 24 мм, что совпадает с глубиной защитного слоя бетона во многих несущих железобетонных конструкциях современных зданий.

Из 10 базисных переменных [3, табл. 5] четыре соответствуют логнормальному закону распределения, две – постоянны, две – гамма-распределению и по одной – нормальному и экспоненциальному распределениям. При расчетах карбонизации железобетонных конструкций в [1, табл. 6] использовано 15 базисных переменных, для восьми из которых приняты постоянные значения, для пяти – логнормальные и для двух – нормальные распределения, в том числе для оценки отклонения толщины защит-

ного слоя бетона Δa от его проектного значения a с параметрами средней величины $\mu_a = +6$ мм и среднеквадратическим отклонением $\sigma_a = 10$ мм.

В [7, табл. 3] использовано уже 17 базисных переменных, из которых восемь приняты постоянными, пять – с логнормальным и две – с нормальным распределениями, в том числе для оценки отклонения толщины защитного слоя бетона Δa с параметрами средней величины $\mu_a = +5$ мм и $\sigma_a = 5$, одна – с бета-распределением. Постоянная толщина защитного слоя бетона принята $a = 50$ мм, что дает общую среднюю величину $a + \Delta a = 55$ мм.

При описании полной вероятностной модели карбонизации бетона в [8] рассмотрено более 10 базисных переменных со своими видами распределений. Для оценки уровня статистического определения толщины защитного слоя бетона при расчете долговечности предлагается использовать бета-распределение, также в [8, с. 31] для моделирования защитного слоя бетона рекомендуется применять нормальный закон распределения.

Вопросам долговечности бетонов и железобетонов посвящено много исследований, анализ некоторых из них представлен в [9]. Как указывают ученые, в настоящее время бетонные сооружения разрушаются гораздо быстрее, чем в прошлом. Они также обозначили 32 свойства бетонов, которые меняются после внесения в них добавок. При этом за период 1965–2000 гг. изучено только 19 % добавок, влияющих на долговечность бетонов, а на защитную их способность по отношению к арматуре – только 11,82 %. Среди методов оценки долговечности в [9] указаны следующие: по приведенному удлинению образцов, по водонасыщению и распределению влаги, по ключевому структурному фактору, по коэффициенту гидрофильности, по открытой и замкнутой пористости. Для прогнозирования долговечности железобетонных конструкций используются зависимости от температурно-влажностных деформаций в разных возрастах, определение проницаемости для ионов хлора, карбонизация и усадка. При анализе «жизненных циклов» (LCA) может производиться определение нормируемой долговечности, но не самой долговечности. Для нахождения остаточного ресурса зданий и потенциально опас-

ных объектов в [9] использовались: методы динамических испытаний и обследования в целях реконструкции; модели вероятностной динамики повреждений в сложных структурно неоднородных системах; нетрадиционные задачи распознавания образцов и анализ данных по реальному состоянию элементов зданий, выявление закономерности их изменения (старения). Из всего перечня вопросов, возникающих при оценке долговечности бетонов, видна сложность этой проблемы.

Особый интерес представляет сравнение расчетных значений глубины карбонизации бетона во времени, что определяет долговечность железобетона, с фактически наблюдаемыми. Анализ моделей расчета срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации и сравнение результатов расчетов с фактическими данными приведены в [10]. Здесь описаны периоды депассивации арматуры и разрушения конструкции в результате потери сцепления между арматурой и бетоном, выполнено сравнение результатов расчетов по моделям четырех западных исследователей с измеренными значениями глубины карбонизации бетона мостов Беларуси [10, рис. 2]. Как видно из рис. 1, разброс измеренных глубин карбонизации бетона, согласно [10], составляет примерно от двух (при $t \approx 5$ лет) до трех раз (при $t \approx 40-45$ лет). Также необходимо учесть, что представленные на рис. 1 глубины карбонизации бетона мостов являлись средними измеренными величинами без учета их реального вероятностного разброса.

При этом разброс расчетных величин глубины карбонизации бетона по моделям зарубежных исследователей за период 40–50 лет достигает двукратных значений. В случае использования системы MathCad [10] для расчета глубины карбонизации бетона берутся только 12 параметров, среди которых нет фактора особенностей нагрузки на среднюю балку моста, что может оказать существенное влияние [11].

Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов описаны в работах А. И. Васильева [12, 13]. В [12] предложены три модели вероятностной оценки остаточного срока службы железобетонных мостовых конструкций с использованием нор-

мального закона распределения. Рекомендуется при недостаточности статистических данных принимать коэффициент вариации $V \approx 0,20$. В приведенном примере, заимствованном из результатов обследования моста в Ярославской области, получено $V \approx 0,13$.

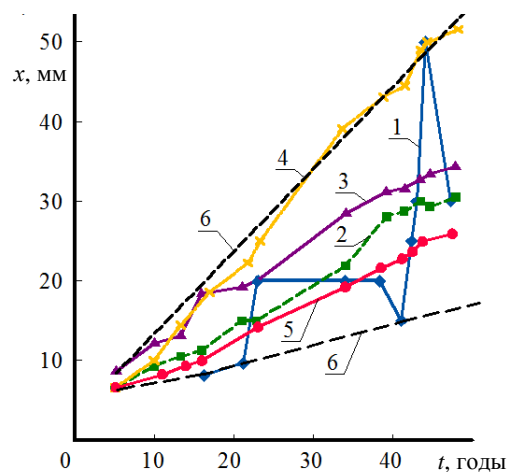


Рис. 1. Связь глубины карбонизации бетона мостов Беларуси с математическими моделями процесса карбонизации: 1 – измеренные значения; 2 – согласно модели De Sitter; 3 – согласно модели Bob; 4 – согласно модели Papadakis; 5 – согласно модели Schuessel; 6 – граница изменения глубины карбонизации бетона

Fig. 1. Relationship of concrete carbonization depth in bridges of Belarus with mathematical models of carbonization process: 1 – measured values; 2 – according to De Sitter model; 3 – according to Bob model; 4 – according to Papadakis model; 5 – according to Schuessel model; 6 – limits of variations in concrete carbonization depth

В [13] приведены методы Н. С. Стрелецкого и А. Р. Ржаницына вероятностной оценки надежности мостов. Для составления алгоритма вероятностной оценки износа конструкции автором [13, с. 30] принят ряд формализованных условий, среди которых «все деградиационные процессы в железобетоне (карбонизация бетона, диффузия хлоридов, коррозия арматуры) являются случайными марковскими процессами», что на современном этапе их изучения правильно. А вот постоянство во всем времени оценки сроков службы изучаемых объектов коэффициентов вариации вызывает большое сомнение. Единого мнения по формированию критериев долговечности пока нет, и имеющиеся оценки носят экспертный характер.

Особый интерес для рассматриваемой проблемы представляет серия статей [14–17], в которых учитывается более широкий круг факторов, влияющих на процесс карбонизации и долговечность железобетонных конструкций [14]. Важны, например, приведенные в [14, табл. 1] фактические глубины карбонизации бетона с небольшой разницей в расходе цемента в зависимости от водоцементного отношения (В/Ц) при $t = 50$ лет эксплуатации и с большой разницей в расходе цемента при эксплуатации в течение 1,5 года. Как показывают расчеты, коэффициент вариации отклонений расчетных глубин карбонизации бетона от фактических при изменении В/Ц от 0,4 до 0,6 для $t = 50$ лет (пять значений) составил $V \approx 0,17$, а при В/Ц = 0,3–0,7 для $t = 1,5$ года (восемь значений) $V \approx 0,19$. В последнем случае три раза фактическая карбонизация бетона отсутствовала ($K_c = 0$) при В/Ц = 0,30–0,35 и расходе цемента $m \geq 665$ кг. Такие относительно небольшие величины V могут являться следствием усреднения приведенных в [15, табл. 1] значений глубин карбонизации бетона, полученных в результате многократных измерений.

В [15, табл. 2, рис. 3] представлены результаты обследования 33 автодорожных мостов Республики Беларусь, построенных в период 1952–1989 гг., т. е. прослуживших от 15–20 до 50–55 лет. Для 17 случаев графически показаны фактические и расчетные (для цемента М400 и М500) глубины карбонизации бетона, причем их сравнительная обработка дала коэффициент вариации $V = 0,26$ [15, с. 16].

Особого анализа заслуживают графические данные, приведенные на рис. 2, заимствованном из [15, рис. 5]. Из рис. 2 видно, что процесс карбонизации бетона по предлагаемой схеме, номограмме Н. К. Розенталя (кривая 3) и расчету по формуле К. Кишитани (кривая 4), а также многим другим источникам начинается с нуля при $t = 0$, а не с определенной постоянной величины [12].

Однако расчеты по моделям Schiessel, Bob, De Sitter и Papadakis (рис. 2, заштрихованная об-

ласть 5), по-видимому, предусматривают наличие определенной величины карбонизации при $t = 0$ или ускоренную карбонизацию в первые пять лет. При $t = 50$ лет глубина карбонизации бетона, согласно рис. 1 и 2, составляет: максимум – около 51 мм и минимум – около 26 мм, что при вероятности 0,95 дает значения коэффициентов вариации, приведенные в табл. 1.

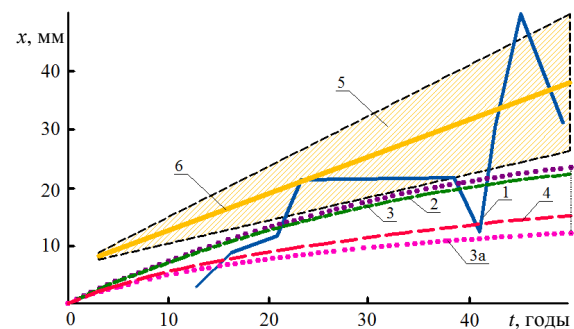


Рис. 2. Глубина карбонизации бетона x с водоцементным отношением 0,44 и расходом цемента 400 кг/м^3 в зависимости от времени эксплуатации t : 1 – фактическая глубина карбонизации бетона автодорожных мостов; 2 – расчет по предлагаемой схеме прогнозирования; 3, 3а – расчет по номограмме Н. К. Розенталя; 4 – расчет по формуле Кишитани; 5 – расчет по моделям Schiessel, Bob, De Sitter, Papadakis; 6 – средняя зависимость $x = f(t)$ для заштрихованной области

Fig. 2. Carbonization depth of concrete x with water cement ratio 0.44 and cement consumption 400 kg/m^3 depending on in-service time t : 1 – actual carbonization depth of concrete in highway bridges; 2 – calculation according to proposed predicting scheme; 3, 3a – calculation according to Rosental nomogram; 4 – calculation according to Kishitani formula; 5 – calculation according to Schiessel, Bob, De Sitter, Papadakis models; 6 – average dependence $x = f(t)$ for shaded region

Эти значения учитывают линейность границ заштрихованной области и примерную линейность расчетных зависимостей (рис. 1, зависимости 2–5) глубины карбонизации бетона x от времени t

$$x_i \approx a_i + b_i t, \quad (1)$$

где a_i , b_i – эмпирические постоянные, мм, мм/год, соответственно.

Таблица 1

Зависимость возможной величины коэффициента вариации V глубины карбонизации бетона от срока службы по расчетным моделям Schiessel, Bob, De Sitter и Papadakis (рис. 2, заштрихованная область 5)

Dependence of probable value for variation V coefficient of concrete carbonization depth on service life according to Schiessel, Bob, De Sitter and Papadakis models (Fig. 2, shaded region 5)

t , годы	5	10	20	30	40	50	100	120	150
V , %	8	12	16	18	19	20	22	22	23

В соответствии с расчетными зависимостями (рис. 1, кривые 2–5; рис. 2, заштрихованная область 5) коэффициенты вариации при $t = 10$ лет составляют $V \approx 0,12$, а при $t = 50$ лет $V \approx 0,20$, что определяется из выражения

$$V = \frac{\gamma - 1}{\alpha(\gamma + 1)}, \quad (2)$$

где $\gamma = x_1/x_2 = (a_1 + b_1t)/(a_2 + b_2t)$; a_1, b_1 – эмпирические постоянные для максимальных величин x_1 (верхняя граница заштрихованной области), равные 6,0 мм и 0,9 мм/год соответственно; a_2, b_2 – эмпирические постоянные для минимальных величин x_2 (нижняя граница заштрихованной области), равные 6,0 мм и 0,4 мм/год.

Как видно из табл. 1, при $t = 100$ лет $V \approx 0,22$, а при $t = 150$ лет $V = 0,23$, что является вполне реальной величиной.

Приведенные на рис. 2 расчетные зависимости $x = f(t)$, построенные по номограмме Н. К. Розенталя (линии 3, 3а), по формуле К. Кишитани (линия 4) и по предлагаемой схеме прогнозирования (линия 2), позволили авторам [15] сделать вывод, что «ни одна из моделей не дает возможности с высокой достоверностью рассчитать глубину карбонизации бетона на всем периоде эксплуатации», составляющем только 50 лет. При этом «для больших сроков эксплуатации фактические данные представляются несколько завышенными и не вписываются в классические представления о зависимости глубины карбонизации от корня квадратного из времени».

Следует отметить, что при $t = 50$ лет диапазон изменения результатов расчетов глубин карбонизации бетона составляет $x_{\min} \approx 12$ мм и $x_{\max} \approx 24$ мм по номограмме Н. К. Розенталя (рис. 2, линии 3, 3а). Это позволяет при надежности 0,95 определить вероятную величину коэффициента вариации $V \approx 0,20$, а отношение x_{\max}/x_{\min} может быть постоянным

$$x_{\max}/x_{\min} = A_1\sqrt{t}/A_2\sqrt{t} = A_1/A_2, \quad (3)$$

где A_1, A_2 – постоянные расчетные коэффициенты, соответствующие максимальной и минимальной величинам карбонизации бетона, мм/год^{0,5}.

Однако во всех рассмотренных случаях следует учесть возможное увеличение коэффициента вариации за счет вероятностного отклонения фактических результатов измерений значений x от расчетных.

В [16, табл. 3, 4] приведены результаты испытаний, выполненных различными организациями и исследователями (НИИЖБ и Харьковский ПромстройНИИПроект, Майера, Ниши и Л. А. Вандаловской), а также расчетов по формуле К. Кишитани. Стохастическая обработка этих данных представлена в табл. 2.

Необходимо отметить, что с учетом погрешностей определения величины коэффициента вариации его возможное значение при условии нормальной плотности распределения вероятности и $t > 0$ может достигать 0,4.

Как следует из табл. 2 (строка 1), по результатам измерений и расчетов только четырех источников [16, табл. 2], при постоянных величинах В/Ц отношения максимальных и минимальных значений глубин карбонизации составляют от 2,27 до 2,95, что для вероятности $P(x) = 0,95$ дает коэффициенты вариации в пределах $V = 0,24$ – $0,30$ при средней величине $\bar{V} \approx 0,28$. Если исходные значения определялись с вероятностью $P(x) = 0,90$, то коэффициенты вариации (табл. 2, строки 2, 3) составляли $V = 0,31$ – $0,39$ при $\bar{V} \approx 0,36$. При этом отношение измеренного верхнего предела глубин карбонизации бетона к расчету авторов [16] находится в пределах (табл. 2, строка 4) от 2,02 до 2,69 раза при среднем значении около 2,4 раза.

В случае использования результатов исследований и расчетов относительных глубин карбонизации бетона 11 источников из [16, табл. 4], значения которых приведены в табл. 2 (строка 5), коэффициенты вариации при вероятности $P(x) = 0,95$ составляют $V = 0,04$ – $0,23$, а при $P(x) = 0,90$ $V = 0,05$ – $0,30$. Однако эти результаты определения коэффициентов вариации (табл. 2) получены при условии принятия значений глубин карбонизации бетона для В/Ц = 0,5 за единицу сравнения. Вследствие этого коэффициенты вариации при постоянных величинах В/Ц, особенно при В/Ц = 0,55 и 0,60, оказались заниженными ($V = 0,04$ – $0,10$).

Если подсчитать построчные [16, табл. 4] величины отношений максимальных относительных глубин карбонизации бетона $x_{\max}^{\text{отн}}$ к минимальным $x_{\min}^{\text{отн}}$ (табл. 2, строка 8), то увидим, что они изменяются от 1,86 до 3,79. Это примерно соответствует $V_{\min} = 0,19$ и $V_{\max} = 0,36$ при среднем значении $\bar{V} \approx 0,28$ (табл. 2, строка 9, где нижними индексами от 1 до 11 обозначены различные источники [16]).

Таблица 2

Стохастические параметры глубин карбонизации бетона x для составов бетонной смеси марки П1, приведенных в [16, табл. 3, 4]

Stochastic parameters of concrete carbonization depth x for composition of concrete mixture grade П1, shown in [16, Tab. 3, 4]

Показатель	Значение показателя при В/Ц				
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Предел изменения глубины карбонизации бетона	$\frac{17,0}{7,5}$	$\frac{26,0}{8,8}$	$\frac{33,2}{12,0}$	$\frac{38,0}{14,2}$	$\frac{54,0}{19,2}$
Коэффициент вариации при $P(x)$: 0,95 0,90	0,24 0,31	0,30 0,39	0,29 0,37	0,28 0,36	0,29 0,38
	0,24	0,30	0,29	0,28	0,29
Отношение измеренного верхнего предела глубины карбонизации бетона к расчету	2,02	2,57	2,44	2,26	2,69
Предел изменения относительной глубины карбонизации бетона	$\frac{0,72}{0,33}$	$\frac{0,94}{0,68}$	1,0	$\frac{1,25}{1,12}$	$\frac{1,63}{1,25}$
Коэффициент вариации при $P(x)$: 0,95 0,90	0,23 0,30	0,17 0,22	– –	0,04 0,05	0,08 0,10
	0,23	0,17	–	0,04	0,08
Отношение $x_{\max}^{\text{отн}}$ при В/Ц = 0,6 к $x_{\min}^{\text{отн}}$ при В/Ц = 0,4 по данным различных исследований	$\frac{2,23_1}{2,70_6}$ $\frac{2,83_{11}}$	$\frac{2,11_2}{3,51_7}$	$\frac{2,39_3}{1,86_8}$	$\frac{2,14_4}{2,90_9}$	$\frac{3,79_5}{3,47_{10}}$
Коэффициент вариации при $P(x) = 0,95$	0,23 0,28 0,29	0,22 0,34	0,25 0,19	0,22 0,30	0,36 0,34
	0,23	0,22	0,25	0,22	0,36

При использовании только экспериментальных данных НИИЖБ (варианты 1, 2, табл. 2, строка 1) максимальная величина коэффициента вариации $V_{\max} \approx 0,40$, а при использовании относительных величин глубин карбонизации бетона по четырем вариантам НИИЖБ $V_{\max} \approx 0,38$. Учитывая возможные погрешности экспериментального определения глубин карбонизации бетона и стохастические в виде доверительного интервала для теоретического коэффициента вариации V_T [17, с. 125–126] при $n > 10$ –12, реальные величины V могут значительно отличаться от расчетных, что может увеличить V на 20–30 % при $n > 15$.

Анализируя приведенные величины коэффициентов вариации (табл. 2), необходимо отметить работу В. П. Чиркова [18], который показал, что «вопрос способности конструкции сопротивляться внешним воздействиям в течение срока ее службы с обеспечением требуемых эксплуатационных качеств может быть решен только на основе применения вероятностных подходов, лежащих в основе фундаментальных законов природы». Особенно интересны средние данные, приведенные в [18, с. 112, табл. 8], которые характеризуют величины коэффициентов ва-

риации конструкций (плит покрытия), эксплуатируемых в средах с различной степенью агрессивности (по признаку карбонизации бетона). Так, воздействие всех факторов на карбонизацию бетона оценивается $V = 0,1$ – $0,3$, а для толщины защитного слоя $V = 0,17$. Тогда с вероятностью 95 % предельные величины V_{\max} при влиянии всех факторов и слабой степени агрессивности могут составлять $V_{\max} \approx 1,96\bar{V} \approx 1,96 \cdot (0,1 - 0,25) \approx 0,20$ – $0,49$, а для защитного слоя $V_{\max} = 1,96 \cdot 0,17 = 0,33$. Как отмечено в [18, с. 93], фактические сроки службы железобетонных конструкций, эксплуатируемых примерно в одинаковых условиях, различаются в 3–6 раз, что соответствует $V = 0,30$ – $0,44$. Реальные средние значения могут составлять $\bar{V} \approx 0,35$ – $0,40$, но с помощью расчета состава бетона [14, 15] их можно снизить до $V = 0,25$ – $0,30$, т. е. примерно на 30 %, даже для конструкций при средней степени агрессивности окружающей среды.

Еще одно направление для определения величины коэффициента вариации приведено в [19, с. 48]. Для малых выборок ($n < 30$ – 50) верхний предел истинного значения дисперсии σ^2

при определенном уровне значимости определяется по формуле

$$\varphi = \frac{n_1}{\chi^2} \sigma^2, \quad (4)$$

где σ^2 – значение дисперсии, подсчитанное по выборке с n_1 степенями свободы при $n_1 = n - 1$; χ^2 – критерий хи-квадрат [19, с. 49].

Следовательно, коэффициент вариации с учетом (4)

$$V_1 = \frac{\sqrt{\varphi}}{x} = \frac{\sigma}{x} \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2}} = V \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2}}. \quad (5)$$

При $V = 0,26$ и $n = 17$ для $P(x) = 0,95$ и $\chi^2 = 7,96$ [19, с. 207, табл. II] получаем $V_{1\max} = 0,26 \cdot \sqrt{2,01} \approx 0,37$, что примерно в 1,4 раза больше V . Для $P(x) = 0,05$ и $\chi^2 = 26,3$ получаем $V_{1\min} \approx 0,20$.

Аналогичный подход использован для оценки надежности определения значений физических свойств строительных материалов и изделий [20] и необходимого количества измерений при их определении [21].

Следует отметить, что большинство описанных выше исследований проведено на базе данных о долговечности бетонных и железобетонных элементов автодорожных мостов, срок службы которых обратно пропорционален интенсивности воздействия подвижной нагрузки [18, с. 102]. Поэтому интенсивность коррозии и износа строительных элементов и конструкций жилых домов, а также величины скорости карбонизации бетона и коэффициентов вариации должны быть несколько меньше. По некоторым данным обследований 40–60-летних жилых домов в плитах балконов и лоджий, изготовленных из бетона классов С12/15–С16/20, величина карбонизированного слоя достигала 20–25 мм [22]. В железобетонных панелях, плитах и колоннах карбонизация не превышала 5–7 мм. Поэтому следует ожидать уменьшения коэффициента вариации отклонений расчетных данных от фактических для жилых зданий по сравнению с $V = 26\%$ для автодорожных мостов [15].

Опубликованная в 2016 г. статья В. В. Бабицкого [23] позволяет надеяться на существенное уменьшение V_{\max} при использовании показателя водонепроницаемости бетона в качестве основ-

ного фактора, определяющего долговечность бетона класса С20/25 при расходе цемента марок М400–М600 в пределах 250–650 кг/м³, водоцементном отношении В/Ц = 0,41–0,72, морозостойкости F50–F500 и водонепроницаемости от W2 до W12.

Стохастический анализ долговечности такого бетона при толщине его защитного слоя $a = 25$ мм и условиях эксплуатации ХС1, произведенный по графической зависимости и представленный в [23, рис. 5] в объеме более 100 точек, показал, что коэффициенты вариации V в каждой группе точек имеют различные значения (рис. 3). Зависимость $V = f(t)$ при $t = 19$ –104 года хорошо аппроксимируется выражением

$$V = \alpha_0 + \alpha_i \exp(-\beta_i t), \quad (6)$$

где α_0 , α_i , β_i – эмпирические константы, определяемые опытным путем.

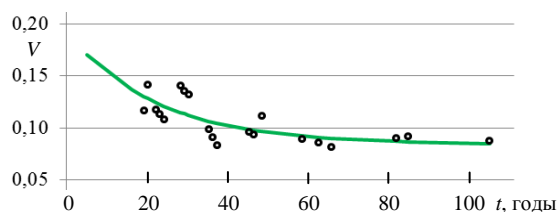


Рис. 3. Зависимость коэффициентов вариации расчетных значений долговечности железобетона по водонепроницаемости бетона по графическим данным [23]

Fig. 3. Dependence of variation coefficients for calculated values on longevity of reinforced concrete with reference to concrete water impermeability according to graphical data [23]

Полученные расчетным путем величины V (рис. 3) существенно меньше приведенных ранее и при $P(x) = 0,95$ предусматривают $t_{\min} = (1 - \alpha V)\bar{t}$, что для $V \approx 0,10$ –0,15 составляет около $(0,7 - 0,8)\bar{t}$. Но при этом погрешности определения среднего времени допустимой глубины карбонизации бетона \bar{t} остаются неизвестными. Для различных элементов жилых домов в условиях г. Минска, по некоторым ограниченному данным, глубины карбонизации бетона за 40–50 лет составляют: плит и стен лоджий и балконов 6–25 мм (при $P = 0,95$, $V \approx 0,37$); плит и колонн подвалов 2–7 мм ($P = 0,95$, $V \approx 0,34$); наружных и внутренних панельных стен и колонн

этажей 2–6 мм ($P = 0,95$, $V \approx 0,3$), что по величинам коэффициентов вариации V соответствует приведенным ранее. Как следует из этих данных, при толщине защитного слоя бетона в железобетонных конструкциях 25 мм в условиях Минска срок службы плит и стен лоджий (балконов) составляет до 50 лет, плит и колонн подвалов, а также наружных и внутренних панельных стен и колонн этажей – не менее 150 лет.

Как показал корреляционный анализ значений $V = f(t)$, приведенных на рис. 3 (сплошная линия по 20 точкам), значение индекса корреляции $\rho = 0,742$, а эмпирические константы составляют: $\alpha_0 \approx 0,084$, $\alpha_i \approx 0,108$ и $\beta_i \approx 0,045$ (1/год).

Необходимо отметить вероятностный подход к оценке глубины (толщины) нейтрализации защитного слоя бетона, рекомендуемый С. Н. Алексеевым [24, с. 283–285]. Здесь в табл. 10.10 представлены результаты измерений ($n \approx 100$) глубин карбонизации бетона в железобетонных плитах для животноводческих зданий, эксплуатируемых 8 и 18 лет. В соответствии с этими результатами коэффициенты вариации V глубин нейтрализации бетона составили примерно 0,17 и 0,16 при хорошем совпадении плотностей распределения значений с законом Гаусса [24, рис. 10.14].

В [25, с. 53, табл. 1.5, 1.6,] приведены некоторые обобщенные результаты исследований скоростей карбонизации (v , мм/год) защитных слоев бетона, по которым можно рассчитать 17 значений коэффициентов вариации V этого параметра. Возможный разброс значений V для различных бетонов и условий их применения располагается ориентировочно в пределах 0,1–0,4 и соответствует приведенному выше диапазону V для глубин карбонизации. При этом, по данным В. П. Чиркова, за срок службы от 10 до 50 лет величина V уменьшается с 0,20 до 0,13, т. е. примерно в 1,5 раза. По математической модели в умеренном климате V для скоростей карбонизации остается примерно постоянным. В остальных случаях наблюдается весьма существенный разброс значений V .

Следует отметить, что приведенный в статье анализ экспериментальных данных является достаточно приближенным вследствие отсутствия многих показателей точности и надежности использованных результатов исследований.

Как указывают Д. И. Бородай и А. А. Матюнин [26], по данным практики [24, 27], фактическое значение карбонизации бетона отклоняется от закона корня квадратного в меньшую сторону. Однако в соответствии с данными табл. 1 зависимость $V = f(t)$ может оказаться возрастающей, что свидетельствует о неоднородности влияния времени на карбонизацию приповерхностных слоев бетона. При оценке долговечности строительных элементов и конструкций необходимо учитывать стохастические характеристики [28].

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент вариации роста глубины карбонизации бетона является важнейшим показателем долговечности железобетонных строительных элементов и конструкций.

2. Величины коэффициентов вариации глубин карбонизации бетона от естественных вероятностных причин, по исследованиям различных авторов, при обеспеченности 95 % в обычных условиях могут достигать 25–35 %, что при нормальном распределении плотности вероятности может составлять около половины среднего расчетного времени сохранения защитного слоя бетона и долговечности железобетонного элемента.

3. В настоящее время наиболее перспективным направлением расчета долговечности железобетона является учет водонепроницаемости бетона.

4. Влияние времени на уменьшение защитного слоя бетона, не подверженного карбонизации, а следовательно, и долговечности железобетона, не ограничивается только корнем квадратным из времени, а следует и другим закономерностям.

5. В основе стохастической оценки долговечности строительных материалов, элементов, конструкций и сооружений, как и других физических характеристик, лежат три следующих основных показателя: необходимый уровень надежности в расчетный момент времени; значение уменьшения надежности во время эксплуатации (показатели износа); аналитическая характеристика распределения плотности вероятности случайных значений долговечности в заданный момент времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович, С. Н. Вероятностная модель карбонизации железобетонных конструкций / С. Н. Леонович, О. Ю. Чернякевич // Наука и техника. 2012. № 5. С. 57–64.
2. Янко, Я. Математико-статистические таблицы / Я. Янко; пер. с чешского А. Ф. Маслова; под ред. А. М. Длинна. М.: Госстатиздат, 1961. 243 с.
3. Тур, В. В. Зарубежный опыт нормирования в области оценки технического состояния существующих железобетонных конструкций зданий и сооружений / В. В. Тур, Т. М. Пецольд // Строительная наука и техника. 2006. № 2. С. 32–46.
4. Снежков, Д. Ю. Анализ методик неразрушающих испытаний бетона конструкций по действующим государственным стандартам и нормам Евросоюза / Д. Ю. Снежков, С. Н. Леонович, А. В. Вознищук // Наука и техника. 2013. № 2. С. 33–39.
5. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия: СТБ 1544–2005. Введ. 01.07.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2005. 20 с.
6. Хастингс, Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс; пер. с англ. А. К. Звонкина. М.: Статистика, 1980. 95 с.
7. Шалый, Е. Е. Вероятностный расчет глубины и распространения фронта карбонизации в бетоне гидротехнических сооружений Хабаровского края / Е. Е. Шалый, Л. В. Ким, С. Н. Леонович // Инновации в бетоне, строительстве, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, 9–10 июня 2016 г.: в 2 ч. Минск, 2016. Ч. 1. С. 243–247.
8. Леонович, С. Н. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при карбонизации / С. Н. Леонович, О. Ю. Чернякевич // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 28–31.
9. Анализ срока службы современных цементных бетонов / П. Б. Рапорт [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 92–100.
10. Чернякевич, О. Ю. Расчет срока службы железобетонных конструкций в условиях коррозии карбонизации / О. Ю. Чернякевич, С. Н. Леонович // Перспективы развития новых технологий в строительстве: сб. науч. статей. Гродно: ГрГУ, 2010. С. 369–375.
11. Пастушков, В. Г. Напряженно-деформированное состояние и долговечность конструкции проезжей части транспортных сооружений / В. Г. Пастушков. Минск, 2007. 21 с.
12. Васильев, А. И. Вероятностные оценки срока службы эксплуатируемых автодорожных мостов в условиях коррозии арматуры / А. И. Васильев // Бетон и железобетон. 2003. № 2. С. 17–20.
13. Васильев, А. И. Оценка грузоподъемности и долговечности мостов. Методическое пособие / А. И. Васильев. М.: МАДИ, 2016. 38 с.
14. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2005. № 2. С. 33–38.
15. 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.
16. Голшани, М. Влияние структурных особенностей бетона на глубину его карбонизации / М. Голшани, М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2011. № 6. С. 21–25.
17. Глушко, В. Т. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / В. Т. Глушко, С. П. Гавеля. М.: Недра, 1986. 222 с.
18. Чирков, В. А. Надежность и долговечность строительных конструкций / В. А. Чирков // Российская архитектурно-строительная энциклопедия (РАСЭ-В). М., 1999. Ч. V. С. 86–117.
19. 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., 1949. 228 с.
20. Осипов, С. Н. Об оценке надежности результатов испытаний физических свойств строительных материалов / С. Н. Осипов // Наука и техника. 2014. № 5. С. 18–24.
21. Способ определения минимального количества испытаний преимущественно строительных материалов и изделий: Евразийский пат. № 014390 / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко. Опубл. 29.10.2010.
22. Отчеты о результатах обследований технического состояния строительных конструкций жилых домов 60–80-х гг. постройки // ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.». Минск, 2014–2016 гг.
23. Бабицкий, В. В. Прочность бетона и глубина его карбонизации / В. В. Бабицкий // Инновации в бетоне, строительстве, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: сб. статей по материалам Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г.: в 2 ч. / БНТУ; редкол.: Э. И. Бятовский, В. В. Бабицкий. Минск, 2016. Ч. 1. С. 22–27.
24. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. М.: Стройиздат, 1990. 313 с.
25. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных коррозионных воздействиях: в 2 т. / С. Н. Леонович [и др.]. Минск: БНТУ, 2016. Т. 2. 203 с.
26. Бородай, О. И. Прогноз сроков карбонизации бетона защитного слоя железобетонных элементов автодорожных мостов / О. И. Бородай, А. А. Матюнин // Вестник Донецкой национальной академии строительства и архитектуры. 2009. Т. 75, № 1. С. 147–151.
27. Lay, S. Lifecon Deliverable D3.2 – Instructions on Methodology and Application of Models for the Prediction of the Residual Service Life for Classified Environmental Loads and Types of Structures in Europe / S. Lay, P. Scheiß, J. Cairns. European Community, 2003. 169 p.
28. 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>.

Поступила 11.05.2018

Подписана в печать 07.08.2018

Опубликована онлайн 29.05.2020

REFERENCES

1. Leonovich S. N., Cherniakov O. Yu. (2012) Probability Model for Carbonization of Reinforced Concrete Structures. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 57–64 (in Russian).
2. Yanko Ya. (1961) *Mathematical-Statistical Tables*. Moscow, Gosstatizdat Publ. 243 (in Russian).
3. Tur V. V., Petsold T. M. (2006) International Experience on Rate Setting in the Field of Assessment of Technical Condition of Existing Reinforced Concrete Structures, Buildings and Facilities. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 32–46 (in Russian).

4. Snezhkov D. Yu., Leonovich S. N., Voznishchik A. V. (2013) Analysis of Methodologies for Non-Destructive Tests of Concrete Structures in Accordance with Existing State Standards and Norms of European Union. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 33–39 (in Russian).
5. STB [Standards of the Republic of Belarus] 1544–2005. *Heavy-Duty Structural Concrete. Technical Specifications*. Minsk: Publishing House of Ministry of Architecture and Construction, 2005. 20 (in Russian).
6. Hastings N. A. J., Peacock J. B. (1975) *Statistical Distributions: a Handbook for Students and Practitioners*. Wiley. 130.
7. Shalyi E. E., Kim L. V., Leonovich S. N. (2016) Probability Calculation of Depth and Distribution of Carbonization Front in Concrete of Hydraulic Engineering Structures on the Khabarovsk Territory. *Innovatsii v Betonovedenii, Stroitel'nom Proizvodstve i Podgotovke Inzhenerykh Kadrov: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-Letiya so Dnya Rozhdeniya I. N. Akhverdova i S. S. Ataeva, 9–10 Iyunya 2016 g. Ch. 1* [Innovations in Concrete Knowledge, Construction Operations and Training of Engineering Personnel: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to 100th Anniversary of the Birthday of I. N. Akhverdov and S. S. Ataev, June 9–10, 2016. Part 1]. Minsk, 243–247 (in Russian).
8. Leonovich S. N., Chernyakevich O. Yu. (2013) Forecasting of Longevity for Reinforced Concrete Structures During Carbonization. *Stroitelnye Materialy = Construction Materials*, (2), 28–31 (in Russian).
9. Rapoport P. B., Rapoport N. V., Polyanskii V. G., Sokolova E. R., Garibov R. B., Kochetkov A. V., Yankovskii L. V. (2012) Analysis of Service Life for Modern Cement Concrete. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, (4), 92–100 (in Russian).
10. Chernyakevich O. Yu., Leonovich S. N. (2010) Calculation of Service Life for Reinforced Concrete Structures under Conditions of Carbonization Corrosion. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve: Sb. Nauch. Statei* [Prospects for Development of New Technologies in Construction: Collection of Scientific Articles]. Grodno, State University of Grodno, 369–375 (in Russian).
11. Pastushkov V. G. (2007) *Stress and Strain State and Longevity of Structures in Traffic Area of Transport Infrastructure Facilities*. Minsk. 21 (in Russian).
12. Vasiliev A. I. (2003) Probabilistic Assessment of Service Life for Operated Automobile Road Bridges under Conditions of Reinforcement Corrosion. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (2), 17–20 (in Russian).
13. Vasiliev A. I. (2016) *Assessment of Bridge Load Capacity and Longevity*. Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. 38 (in Russian).
14. Babitsky V. V. (2005) Structure and Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 33–38 (in Russian).
15. 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).
16. Golshani M., Bibik M. S., Babitsky V. V. (2011) Influence of Structural Concrete Peculiarities on Depth of its Carbonization. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (6), 21–25 (in Russian).
17. Glushko V. T., Gavelya S. P. (1986) *Assessment of Stress and Strain State of Rock Massives*. Moscow, Nedra Publ. 222 (in Russian).
18. Chirkov V. A. (1999) Reliability and Longevity of Construction Structures. *Russian Architectural and Construction Encyclopedia (RACE-V). Part V*. Moscow, 86–117 (in Russian).
19. Brownlee K. A. (1949) *Statistical Investigations in Industry*. Moscow, Inostrannaya Literatura. 228 (in Russian).
20. Osipov S. N. (2014) On Reliability Evaluation of Test Results for Physical Properties of Construction Materials. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (5), 18–24 (in Russian).
21. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2010) *Method for Preferably Construction Materials and Products*. Eurasian Patent No 014390 (in Russian).
22. State Enterprise “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S. (2014–2016) *Reports on Investigation Results of Technical State for Construction Structures of Residential Buildings Being Constructed in 60–80-ies*. Minsk (in Russian).
23. Babitsky V. V. (2016) Strength of Concrete and Depth of its Carbonization. *Innovatsii v Betonovedenii, Stroitel'nom Proizvodstve i Podgotovke Inzhenerykh Kadrov: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Posvyashch. 100-Letiya so Dnya Rozhdeniya I. N. Akhverdova i S. S. Ataeva, 9–10 Iyunya 2016 g. Ch. 1* [Innovations in Concrete Knowledge, Construction Operations and Training of Engineering Personnel: Proceedings of International Scientific and Technical Conference Dedicated to 100th Anniversary of the Birthday of I. N. Akhverdov and S. S. Ataev, June 9–10, 2016. Part 1]. Minsk, 22–27 (in Russian).
24. Alekseev S. N., Ivanov F. M., Modry S., Shissl' P. (1990) *Longevity of Reinforced Concrete in Aggressive Environment*. Moscow, Stroyizdat Publ. 313 (in Russian).
25. Leonovich S. N., Litvinovskii D. A., Chernyakevich O. Yu., Stepanova A. V. (2016) *Strength, Crack-Resistance and Longevity of Constructional Concrete at Temperature Corrosion Impacts. Vol. 2*. Minsk, Belarusian National Technical University Publishing House. 203 (in Russian).
26. Boroday O. I., Matyunin A. A. (2009) Forecasting of Terms for Carbonization of Concrete Protective Layer in Reinforced Concrete Elements of Automobile Road Bridges. *Vestnik Donetskoj Natsional'noi Akademii Stroitel'stva i Arkhitektury = Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 75 (1), 147–151 (in Russian).
27. LIFECON. *Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability*. State of the Art Report. Deliverable D3.2, Project G1RD-CT-2000-00378, 2003. Available at: <http://lifecon.vtt.fi/d32.pdf>.
28. Osipov S. N. (2017) Influence of Stochastic Characteristics for Properties of Materials, Products and Processes on Evaluation of Regulatory Parameters. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 16 (4), 304–314. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-4-304-314> (in Russian).

Received: 11.05.2018

Accepted: 07.08.2018

Published online: 29.05.2020