УДК 621.313.333
DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-46-54

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ НАЧАЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА СРАЗУ ПОСЛЕ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

А. А. ВАСИЛЬЕВ, К. Э. АГЕЕВА
Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

В. В. ЛОГВИН, А. В. САВЕЛЬЕВА
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Показана значимость объективности оценки и прогнозирования карбонизации бетона как основного вида его коррозии, определяющего долговечность большинства эксплуатируемых и проектируемых железобетонных элементов и конструкций.

Приведена методика расчета граничной величины карбонатной составляющей (показателя $КС_{10}$) из условия образования после гидратации цемента 10 % $Ca(OH)_2$.

По результатам анализа полученных ранее зависимостей распределения карбонатной составляющей (показателя $КС_0$) по сечению свежеизготовленных бетонов классов по прочности на сжатие $С^{12}/_{15}$–$С^{50}/_{60}$ с использованием рассчитанных значений показателей $КС_{10}$ получены значения глубин полной карбонизации цементно-песчаной фракции бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов). Показано, что уже сразу после изготовления (с применением тепловлажностной обработки) защитный слой бетонов любых классов по прочности на сжатие карбонизируется на значительную глубину, что необходимо обязательно учитывать в прогнозных моделях карбонизации бетона.

Ключевые слова: бетон, цементно-песчаная фракция, карбонатная составляющая, начальная карбонизация, защитный слой.

Для цитирования. Оценка значимости начальной карбонизации бетона сразу после его изготовления / А. А. Васильев, К. Э. Агеева, В. В. Логвин, А. В. Савельева // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3 (102). – С. 46–54. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-46-54

ASSESSMENT OF THE IMPORTANCE OF INITIAL CARBONATION OF CONCRETE IMMEDIATELY AFTER ITS PRODUCTION

A. VASILIEV, K. E. AGEEVA
Belarusian State University of Transport, Gomel

V. V. LOGVIN, A. V. SAVELYEVA
Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article shows the importance of objective assessment and forecasting of concrete carbonation as the main type of its corrosion, determining the durability of most of the operated and designed reinforced concrete elements and structures.

A method for calculating the limiting value of the carbonate component (KC10 index) is given based on the condition of formation of 10 % Ca(OH)2 after cement hydration.

Based on the results of the analysis of previously obtained dependencies of the carbonate component distribution (KC0 index) over the cross-section of freshly made concrete of compressive strength classes C12/15–C50/60 using the calculated values of the KC10 index, the values of the depths of complete carbonation of the cement-sand fraction of concrete of various compressive strength classes (compositions) were obtained. It has been shown that immediately after production (using heat and moisture treatment), the protective layer of concrete of any class of compressive strength is carbonized to a significant depth, which must be taken into account in predictive models of concrete carbonization.

Keywords: concrete, cement-sand fraction, carbonate component, initial carbonation, protective layer.

For citation. Vasilyev A. A., Ageeva K. E., Logvin V. V., Savelyeva A. V. Assessment of the importance of initial carbonation of concrete immediately after its production. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3 (102), pp. 46–54 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-46-54

Введение

Карбонизация бетона – один из важнейших факторов, определяющих техническое состояние железобетонных элементов (ЖБЭ) и железобетонных конструкций (ЖБК) и его изменение во времени, соответственно, – долговечность и остаточный ресурс подавляющего большинства зданий и сооружений I–III групп капитальности [1–3].

Сегодня существует значительное количество моделей карбонизации бетона. Они учитывают различные параметры бетонной смеси (бетона) и эксплуатационной среды. Однако все модели не учитывают начальную карбонизацию бетона (образующуюся при приготовлении бетонной смеси и продолжающуюся при изготовлении ЖБЭ (ЖБК)). Это обусловлено тем, что все модели оценки и прогнозирования карбонизации основаны на фенолфталеиновом тесте (ФФТ) и первом законе Фика, которые, как уже давно показано и доказано по результатам многолетних исследований [4–10], дают возможность оценивать толщину бетонного слоя с величиной показателя водородной вытяжки цементного камня pH ≈ 10,3 [11], а не толщину прокарбонизированного бетона (в свежеприготовленном бетоне значения pH достигают 12,3; в длительно эксплуатируемых (в условиях неагрессивной либо слабоагрессивной среды) конструкциях значения показателя pH уменьшаются до 8,80) [1]. В свежеприготовленном бетоне (конструкциях) ФФТ вообще не показывает карбонизацию, за исключением малопрочных бетонов, либо изготовленных с нарушением технологии, в которых толщина карбонизированного бетона составляет до 1–3 мм.

Таким образом, существующие модели карбонизации не позволяют оценивать ни толщину прокарбонизированного бетона, ни состояние его защитных свойств по отношению к стальной арматуре [12, 13].

Целью данной работы является оценка глубины карбонизации бетонов различных классов по прочности на сжатие (составов) сразу после их изготовления с применением тепловлажностной обработки.

Материалы и методы исследования

Использовался математический анализ данных с применением программного комплекса «Microsoft Excel».

Результаты и обсуждение

Использование карбометрии [14, 15] на основе определения показателя КС (карбонатной составляющей) позволяет не только объективно оценивать и прогнозировать карбонизацию бетона при эксплуатации в различные сроки в атмосферных средах, но и учитывать карбонизацию бетона на этапе его приготовления либо изготовления конструкции.

По результатам исследований карбонизации бетонов различных классов по прочности на сжатие (разных составов) на стадии их изготовления в [16] была получена зависимость начальной карбонизации по сечению свежеизготовленного бетона с применением тепловлажностной обработки (ТВО). В общем виде:

$$\text{КС}_0\left(l/t=0\right)=\beta_0+\beta_1 e^{\left(-\left(\frac{l-\beta_2}{\beta_3}\right)^{\beta_4}\right)}, \qquad (1)$$

где β_0–β_4 – коэффициенты, определяющие соответственно: β_0 – наименьшее значение КС(l) [обычно $\beta_0 = \text{КС}(l > 100$ мм)]; β_1 – разность минимального и максимального значений КС(l); l – границу рассматриваемого сечения, мм; β_2 – минимальное значение глубины l (обычно $\beta_2 = 0$); β_3 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_3 > 0$; β_4 – форму кривой и координаты точек перегиба, $\beta_4 > 0$.

По результатам математической обработки зависимости (1) для различных составов образцов бетона получена зависимость начальной карбонизации бетона от количества использованного цемента $\text{КС}_0 = f(\text{Ц})$:

$$\text{КС}_0(l/t=0)=(0{,}0077\text{Ц}+0{,}7932)+(1769\text{Ц}+409077)e^{\left(-\left(\frac{l+100}{5{,}05}\right)^{0{,}85}\right)}, \qquad (2)$$

где Ц – количество цемента на 1 м^3 бетонной смеси; l – граница рассматриваемого сечения, мм.

С учетом того, что большинство ЖБЭ изготавливается из бетонов с применением подвижных бетонных смесей марки по удобоукладываемости П1, приняв бетонные смеси с ОК = 4 см, на основании исследования образцов бетонов различных составов, с определением показателя КС с шагом 2,5 мм в [17], получили зависимости начальной карбонизации для бетонов классов по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$–$C^{50}/_{60}$, представленные в графическом виде на рис. 1.

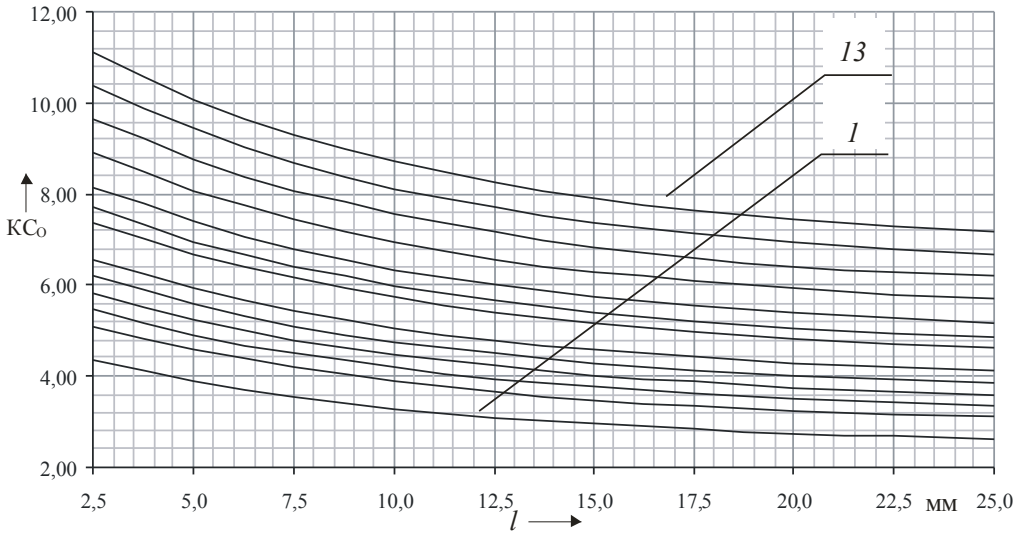

Рис. 1. Распределение карбонатной составляющей по сечению образцов бетона составов с ОК = 4 см сразу после ТВО для классов бетона по прочности на сжатие:
1 – $C^{12}/_{15}$; *2* – $C^{16}/_{20}$; *3* – $C^{18}/_{22,5}$; *4* – $C^{20}/_{25}$; *5* – $C^{22}/_{27,5}$; *6* – $C^{25}/_{30}$; *7* – $C^{28}/_{35}$; *8* – $C^{30}/_{37}$; *9* – $C^{32}/_{40}$; *10* – $C^{35}/_{45}$; *11* – $C^{40}/_{50}$; *12* – $C^{45}/_{55}$; *13* – $C^{50}/_{60}$

Полученные зависимости показывают, что уже после изготовления бетона любого класса по прочности на сжатие (состава) в поверхностных слоях значения карбонатной составляющей достигают 10 и более процентов, в глубине бетона карбонизация стремится к постоянной величине, полученной при приготовлении бетонной смеси [17].

Считается, что в обычном плотном бетоне, приготовленном на портландцементе, существует значительный запас $Ca(OH)_2$, ориентировочно составляющий 10–15 % от массы цемента [18]. Для оценки степени карбонизируемости бетона на стадии изготовления изделия (конструкции) рассчитаем значения карбонатной составляющей ($КС_{10}$) цементно-песчаной фракции (растворной части) бетона, из расчета, что после гидратации образуется 10 % $Ca(OH)_2$ от массы цемента по следующей методике:

– определяется масса $Ca(OH)_2$ $\left(m_{Ca(OH)_2}\right)$, кг, при приготовлении 1 м^3 бетона:

$$m_{Ca(OH)_2} = m_{ц} \cdot 0{,}10, \tag{3}$$

где $m_{ц}$ – масса цемента, используемая для приготовления 1 м^3 бетона;

– определяется масса $CaCO_3$, образовавшаяся из $Ca(OH)_2$:

$$m_{CaCO_3} = \frac{m_{Ca(OH)_2} M_{CaCO_3}}{M_{Ca(OH)_2}}, \tag{4}$$

где M_{CaCO_3} – молекулярная масса $CaCO_3$ (100 г/моль, или 100 кг); $M_{Ca(OH)_2}$ – молекулярная масса $Ca(OH)_2$ (74 г/моль, или 74 кг);

– вычисляется привес за счет образования $CaCO_3$:

$$\Delta CaCO_3 = m_{CaCO_3} - m_{Ca(OH)_2}; \tag{5}$$

– рассчитывается масса цементно-песчаной фракции (растворной части) 1 м^3 бетона:

$$m_{цп} = Ц + П + 0{,}3В + (m_{CaCO_3} - m_{Ca(OH)_2}), \tag{6}$$

где Ц, П, В – соответственно количество цемента, песка, воды, кг, используемые для приготовления 1 м^3 бетона;

– определяется значение $КС_{10}$ из пропорции:

$$m_{цп} - 100\ \%;$$

$$m_{CaCO_3} - КС_{10},\ \%;$$

$$КС_{10} = \frac{m_{CaCO_3} \cdot 100}{m_{цп}},\ \%. \tag{7}$$

Результаты расчета показателя $КС_{10}$ для бетонов классов по прочности на сжатие $С^{12}/_{15}$–$С^{50}/_{60}$ (составов для бетонной смеси марки по удобоукладываемости П1 (ОК = 4 см)), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета показателя $КС_{10}$

Класс бетона по прочности на сжатие	Ц, кг	$m_{Ca(OH)_2}$, кг	m_{CaCO_3}, кг	$\Delta CaCO_3$, кг	$m_{цп}$, кг	$КС_{10}$, %
$C^{12}/_{15}$	213	21,30	28,78	7,484	1103	2,610
$C^{16}/_{20}$	275	27,50	37,16	9,662	1106	3,361
$C^{18}/_{22,5}$	305	30,50	41,22	10,72	1112	3,708
$C^{20}/_{25}$	334	33,40	45,14	11,74	1118	4,036
$C^{22}/_{27,5}$	364	36,40	49,19	12,79	1127	4,366
$C^{25}/_{30}$	397	39,70	53,65	13,95	1137	4,721
$C^{28}/_{35}$	465	46,50	62,84	16,34	1162	5,406
$C^{30}/_{37}$	490	49,00	66,22	17,22	1173	5,646
$C^{32}/_{40}$	529	52,90	71,49	18,59	1190	6,008
$C^{35}/_{45}$	592	59,20	80,00	20,80	1220	6,556
$C^{40}/_{50}$	654	65,40	88,38	22,98	1254	7,046
$C^{45}/_{55}$	714	71,40	96,49	25,09	1289	7,488
$C^{50}/_{60}$	774	77,40	104,59	27,19	1326	7,890

Зависимость граничных значений карбонизации от количества цемента $КС_{10} = f(Ц)$ приведена на рис. 2.

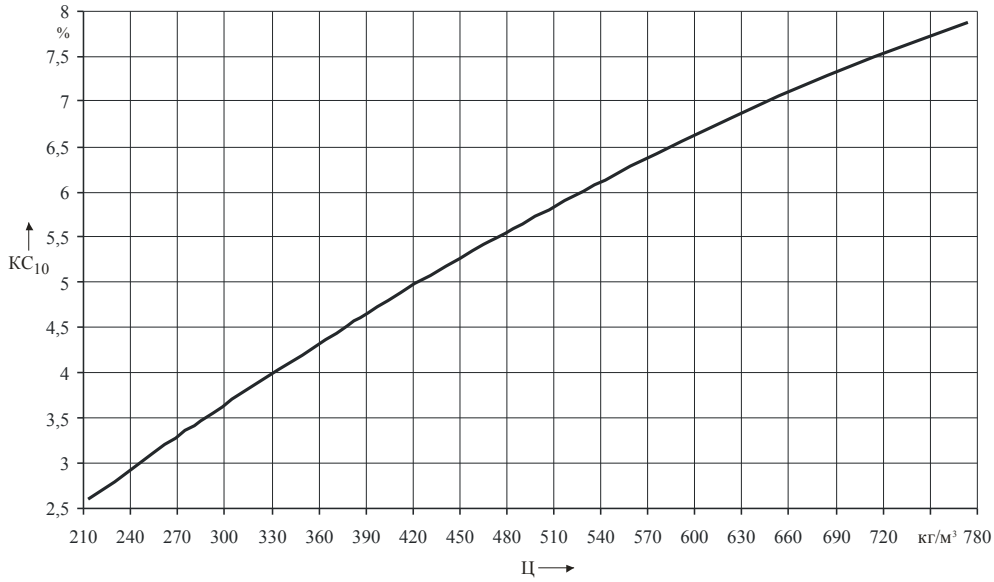

Рис. 2. Зависимость $КС_{10} = f(Ц)$

Зависимость $КС_{10} = f(Ц)$ математически представлена полиномиальной кривой 3-й степени:

$$КС_{10} = -2{,}0 \cdot 10^{-10} Ц^3 - 5{,}0 \cdot 10^{-6} Ц^2 + 0{,}0147 Ц - 0{,}2825 \quad (R^2 = 1). \tag{8}$$

Выполним (графически) анализ толщины карбонизированного бетона ($l_{гр}$) сразу после его изготовления с применением ТВО, для чего, откладывая на графических зависимостях $КС_{10} = f(С)$ для каждого класса бетона по прочности на сжатие (рис. 1) рассчитанные значения $КС_{10}$, проецируя их на ось абсцисс, получим соответствующие им значения $l_{гр}$.

Полученные значения $l_{гр}$ для бетонов классов по прочности на сжатие $С^{12}/_{15}$–$С^{50}/_{60}$ (П1, ОК = 4 см) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения $l_{гр}$

Класс бетона по прочности на сжатие	**$l_{гр}$, мм**
$С^{12}/_{15}$	29,10
$С^{16}/_{20}$	17,71
$С^{18}/_{22,5}$	15,62
$С^{20}/_{25}$	14,65
$С^{22}/_{27,5}$	13,93
$С^{25}/_{30}$	13,46
$С^{28}/_{35}$	12,52
$С^{30}/_{37}$	12,45
$С^{32}/_{40}$	12,50
$С^{35}/_{45}$	12,80
$С^{40}/_{50}$	13,35
$С^{45}/_{55}$	14,00
$С^{50}/_{60}$	14,85

Полученные значения $l_{гр}$ показывают, что уже сразу после изготовления бетонов с применением ТВО, в поверхностных слоях бетон (любых составов) карбонизирован и толщина прокарбонизированного бетона составляет от 15 до 29 мм.

Граничные значения прокарбонизированного бетона ($l_{гр}$) получены для бетонов различных составов, но для подвижных смесей (П1, ОК = 4 см). Аналогично, по предложенной методике, можно получить значения $l_{гр}$ для любых составов бетонной смеси (марок по удобоукладываемости) каждого класса бетона по прочности на сжатие.

Необходимо отметить, что, несмотря на то, что сразу после изготовления тяжелого бетона (с применением ТВО) он карбонизируется на значительную глубину защитного слоя, еще некоторый промежуток времени (величина которого зависит от следующих основных факторов: условий эксплуатации, состава бетона, качества приготовления бетонной смеси и изготовления ЖБЭ) в бетоне сохраняется на одном уровне или незначительно уменьшается (к поверхности бетона) величина показателя pH, что обеспечивает защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре.

Заключение

Выполненные исследования начальной карбонизации бетонов различных классов по прочности на сжатие показали:

– сразу после изготовления бетона (с применением ТВО) значительная часть защитного слоя полностью карбонизируется, при этом в бетонах класса по прочности на сжатие $C^{12}/_{15}$ и ниже полностью карбонизируется защитный слой;

– толщина карбонизированного слоя зависит от состава бетонной смеси (в первую очередь – от количества использованного цемента).

Результаты исследований возможно (и необходимо) использовать при подборе составов бетонной смеси при проектировании ЖБЭ и ЖБК для конкретных эксплуатационных условий.

Литература

1. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2012. – 263 с.
2. Васильев, А. А. Карбонизация бетона (оценка и прогнозирование) / А. А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 303 с.
3. Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона / А. А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.
4. Степанова, В. Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В. Ф. Степанова, В. Р. Фаликман // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : науч. тр. III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону, Москва, 12–16 мая 2014 г. В 7 т. Т. 7. Пленарные доклады. – М. : МГСУ, 2014. – С. 275–302.
5. Saetta, A. V. 2-D Model for carbonation and moisture heat flow in porous materials / A. V. Saetta, B. A. Schrefler, R. V. Vitaliani // Cem. Concr. Res. – 1995. – N 25 (8). – P. 1703–1712.
6. Czarnecki, L. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space / L. Czarnecki, P. Woyciechowski // Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences. – 2015. – Vol. 63. – N 1. – P. 43–54.
7. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона : дис. … д-ра техн. наук : 05.23.05 / Бабицкий Вячеслав Вацлавович ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2005. – 540 с.
8. Te Liang, M. Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications / M. Te Liang, W. Jun Qu, Ch.-H. Liang // J. Marine Science and Technology. – 2002. – N 10 (2). – P. 128–135.
9. Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and moisture transfer / Y. Kishitani, Sh. Hokoi, K. Harada, S. Takada // J. Structural and Construction Engineering Trans, AIJ 595, 2005. – P. 17–23.
10. Ishida, T. Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory / T. Ishida, K. Maekawa // Proceesings of JSCE. – 2000. – Vol. 47. – N 648. – P. 93–102.
11. Кудрявцев, И. А. Исследование равномерности глубины залегания карбонизированного слоя по глубине в балке пролетного строения / И. А. Кудрявцев, В. П. Богданов // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений, подготовки инженерных кадров для строительной отрасли : материалы VII Междунар. науч.-практ. семинара. – Минск : Стринко, 2001. – С. 227–229.
12. 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.

13. 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.
14. Неразрушающие методы оценки и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах : практ. пособие / Т. М. Пецольд, В. П. Богданоа, В. В. Бабицкий, С. В. Дзирко ; под ред. А. А. Васильева. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 146 с.
15. Васильев, А. А. Экспресс-метод определения карбонатной составляющей (показателя КС) цементно-песчаной фракции бетона / А. А. Васильев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 94–97.
16. Васильев, А. А. Расчетно-экспериментальная модель карбонизации бетона / А. А. Васильев ; Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 263 с.
17. Васильев, А. А. Прогнозирование фактической карбонизации с учетом технологических параметров бетона / А. А. Васильев, А. М. Нияковский ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 206 с.
18. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2002. – 499 с.

References

1. Vasil′ev A. A. *Carbonation and damage assessment of reinforced concrete structures.* Gomel′, Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2012. 263 p. (in Russian).
2. Vasil′ev A. A. *Carbonation of concrete (assessment and forecasting)*. Gomel′, Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2013. 303 p. (in Russian).
3. Vasil′ev A. A. *Assessment and forecasting of the technical condition of reinforced concrete structures taking into account the carbonation of concrete.* Gomel′, Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2019. 215 p. (in Russian).
4. Stepanova V. F., Falikman V. R. Modern problems of ensuring durability of reinforced concrete structures. *Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushchee : nauch. tr. III Vseros. (II Mezhdunar.) konf. po betonu i zhelezobetonu, Moscow, 12–16 maya 2014 g. T. 7* [Concrete and reinforced concrete – a look into the future: scientific proc. III All-Russian (II International) Conf. on Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, May 12–16, 2014. Vol. 7]. *Moscow*, Moskovskii gosudarstvennyi stroitel′nyi universitet, 2014, pp. 275–302 (in Russian).
5. Saetta A. V. 2-D Model for carbonation and moisture heat flow in porous materials. *Cem. Concr. Res.*, 1995, no. 25 (8), pp. 1703–1712.
6. Czarnecki L., Woyciechowski P. Modelling of concrete carbonation; is it a process unlimited in time and restricted in space. *Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences*, 2015, vol. 63, no. 1, pp. 43–54.
7. Babickij V. V. *Structure and corrosion resistance of concrete and reinforced concrete.* Minsk, 2005. 540 p. (in Russian).
8. Te Liang M., Jun Qu W., Liang Ch.-H. Mathematical modeling and prediction method of concrete carbonation and its applications. *J. Marine Science and Technology*, 2002, no. 10 (2), pp. 128–135.
9. Kishitani Y., Hokoi Sh., Harada K., Takada S. Prediction model for carbonation of concrete structure considering heat and mois-ture transfer. *J. Structural and Construc-tion Engineering Trans*, AIJ 595, 2005, pp. 17–23.
10. Ishida T., Maekawa K. Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory. *Proceesings of JSCE*, 2000, vol. 47, no. 648, pp. 93–102.
11. Kudryavcev I. A., Bogdanov V. P. Study of the expansion of the depth of occurrence of the carbonized layer according to the results of the study in the beam of the span develop-

ment. *Problemy tekhnologii proizvodstva stroitel'nykh materialov, izdelii i konstruktsii, stroitel'stva zdanii i sooruzhenii, podgotovki inzhenernykh kadrov dlya stroitel'noi otrasli : materialy VII Mezhdunar. nauch.-prakt. seminara* [Problems of technology of production of building materials, products and structures, construction of buildings and structures, training of engineering personnel for the construction industry: materials of the VII International scientific and practical seminar]. Minsk, Strinko, 2001, pp. 227–229 (in Russian).

12. Vasil′ev A. A. On the issue of the need to take into account the carbonation of concrete in t he regulatory documents of the Republic of Belarus on the assessment of the technical condition of reinforced concrete elements and structures. *Vestnik BelGUTa: Nauka i transport,* 2017, no. 1 (34), pp. 87–88 (in Russian).
13. Vasil′ev A. A. On the issue of objectivity of modern assessment and forecasting of concrete carbonation based on the indicator method. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2020, no. 1, pp. 77–80 (in Russian).
14. Pecol′d T. M., Bogdanoa V. P., Babickij V. V., Dzirko S. V. *Non-destructive methods of assessment and forecasting of technical condition of reinforced concrete structures operated in air environments.* Ed. Vasil′eva A. A. Gomel′, Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2007. 146 p. (in Russian).
15. Vasil′ev A. A. Express method for determining the carbonate component (KS index) of the cement-sand fraction of concrete. *Vestnik BelGUTa: Nauka i transport*, 2021, no. 1 (42), pp. 94–97 (in Russian).
16. Vasil′ev A. A. *Calculation and experimental model of concrete carbonation.* Gomel′, Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2016. 263 p. (in Russian).
17. Vasil′ev A. A., Niyakovskij A. M. *Prediction of actual carbonation taking into account the technological parameters of concrete*. Gomel′, Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta, 2014. 206 p. (in Russian).
18. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona*. Moscow, Izd-vo Associacii stroitel′nyh vuzov, 2002. 499 p. (in Russian).

Поступила 30.06.2025 г.