



17. SP 8.13130.2020. Sistemy protivopozharnoj zashhity. Naruzhnoe protivopozharnoe vodosnabzhenie. Trebovaniya pozharnoj bezopasnosti. Moscow: MChS Rossii, 2020. 48 p.
18. SP 31.13330.2021. Vodospobzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Moscow: Ministroy Rossii, 2021. 180 p.
19. STOKS : programma dlja gidravlicheskogo raschjota truboprovodov [Electronic resource]. URL: <https://pipecalc.ru/ru>.
20. Shevelev F.A., Shevelev A.F. Tablicy dlja gidravlicheskogo raschjota vodoprovodnyh trub : spravochnoe posobie. 8th ed. Moscow: BASTET, 2007. 336 p.
21. Aleksandar B., Zoran M., Viktor I. Methodology of Simulation, Modeling and Examination of Ring-Type Water Supply Networks // Mechanical Engineering Scientific Journal. 2022. Vol. 40, No. 2. P. 111–116. DOI: 10.55302/MESJ22402657111b.
22. Carneiro J., Loureiro D., Cabral M., Covas D. Integrating Uncertainty in Performance Assessment of Water Distribution Networks by Scenario Building // Water. 2024. Vol. 16, No. 7. P. 977. DOI: 10.3390/w16070977.
23. EPANET: software for hydraulic modeling of water supply networks [Electronic resource]. US EPA. URL: <https://www.epa.gov/water-research/epanet> (accessed: 01.05.2026).
24. Marlim M.S., Kang D. Hydraulic Connectiveness Metric for the Analysis of Criticality in Water Distribution Networks // Water. 2024. Vol. 16, No. 11. P. 1498. DOI: 10.3390/w16111498.
25. ZuluHydro: official website [Electronic resource]. URL: <https://www.politerm.com/products/hydro/zuluhydro>.

© С. В. Окладникова, Г. Б. Абуова

**Ссылка для цитирования:**

Окладникова С. В., Абуова Г. Б. Интеллектуальная информационная система поддержки принятия решений при проектировании водопроводных кольцевых сетей // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 32–38.

УДК 691.32

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-38-43

## ВЛИЯНИЕ МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ И ПРИРОДНОГО УВЛАЖНЕНИЯ НА КАРБОНИЗАЦИЮ БЕТОНА

*С. А. Логинова, Е. А. Корсакова, А. Д. Нерубенко*

**Логинова Светлана Андреевна**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Строительство зданий и сооружений», Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (906) 617-12-27; e-mail: sl79066171227@yandex.ru;

**Корсакова Елизавета Антоновна**, магистрант, Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация, тел.: + 7 (920) 122-16-10; e-mail: korsakova.ea.20@edu.ystu.ru;

**Нерубенко Артем Дмитриевич**, студент, Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Российская Федерация; тел.: + 7 (910) 815-78-45; e-mail: nerubenkoad.23@edu.ystu.ru

В статье рассматривается комплексное влияние климатических факторов – морозной деструкции и природного увлажнения — на процессы карбонизации бетона в условиях Ярославской области. Проведен анализ механизмов воздействия циклов замораживания–оттаивания и естественной влажности на структуру и проницаемость бетона, что определяет скорость проникновения в него углекислого газа. На основе выполненных расчетов и экспериментальных данных выявлены особенности изменения свойств бетона под влиянием указанных факторов. Установлено, что морозная деструкция, разрушая структуру материала, способствует ускорению карбонизации, тогда как природное увлажнение, напротив, замедляет этот процесс за счет изменения проницаемости и влажности поверхностных слоев. Полученные результаты позволяют уточнить прогноз долговечности железобетонных конструкций в регионе и разработать рекомендации по повышению их устойчивости к климатическим воздействиям. Особое внимание уделено необходимости учета совместного действия природных факторов при проектировании и эксплуатации объектов.

**Ключевые слова:** бетон, карбонизация бетона, природная влажность, морозная деструкция, долговечность.

## THE EFFECT OF FROST DESTRUCTION AND NATURAL MOISTURE ON CONCRETE CARBONATION

*S. A. Loginova, Ye. A. Korsakova, A. D. Nerubenko*

**Loginova Svetlana Andreyevna**, Candidate of Technical Sciences, Head of Construction of Buildings and Structures Department, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation, phone: + 7 (906) 617-12-27; e-mail: sl79066171227@yandex.ru;

**Korsakova Yelizaveta Antonovna**, undergraduate student, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation, phone: + 7 (920) 122-16-10; e-mail: korsakova.ea.20@edu.ystu.ru;

**Nerubenko Artem Dmitriyevich**, student, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation, phone: + 7 (910) 815-78-45; e-mail: nerubenkoad.23@edu.ystu.ru

This article examines the combined effects of climatic factors - frost degradation and natural moisture - on concrete carbonation in the Yaroslavl region. An analysis is provided of the mechanisms by which freeze-thaw cycles and natural moisture influence the structure and permeability of concrete, which determines the rate of carbon dioxide penetration. Calculations and experimental data are used to identify changes in concrete properties under the influence of these factors. It is established that frost degradation, by disrupting the structure of the material, accelerates carbonation, while natural moisture, conversely, slows this process by altering the permeability and moisture content of the surface layers. The obtained results make it possible to refine the durability forecast for reinforced concrete structures in the region and develop recommendations for improving their resilience to climatic influences. Particular attention is paid to the need to consider the combined effects of natural factors during the design and operation of structures.

**Keywords:** concrete, concrete carbonation, natural moisture, frost destruction, durability.

### Введение

В условиях открытой атмосферы при отрицательных температурах химическое взаимодействие диоксида углерода с активными компонентами, присутствующими в поровой жидкости бетона, практически полностью прекращается [12, 2]. Это связано с тем, что вода в порах бетона кристаллизуется, что делает невозможным протекание реакции карбонизации.

Однако в этот же период бетон подвергается разрушительному воздействию циклов замораживания и оттаивания. Под действием знакопеременных температур в структуре материала возникают микротрещины [1, 3]. Этот процесс, известный как морозная деструкция, приводит к постепенному разупрочнению бетона и значительному увеличению его общей проницаемости [13, 6]. Повышенная проницаемость, в свою очередь, создает благоприятные условия для ускоренной диффузии диоксида углерода вглубь конструкции после воздействия положительных температур. Таким образом, морозная деструкция косвенно способствует интенсификации процесса карбонизации на последующих этапах эксплуатации бетонных конструкций.

Для учета влияния морозной деструкции на карбонизацию в работах ученых [1–3, 6–8] предлагается коэффициент  $k_F$ , зависящий от числа циклов замораживания-оттаивания и марки бетона по морозостойкости:

$$k_F = \frac{1}{(1-P)^{N_F t}}, \quad (1)$$

где  $N_F$  – число циклов «замораживания – оттаивания» в год;  $t$  – срок эксплуатации, лет;  $P$  – вероятность повреждения бетона в цикле замораживания-оттаивания, которая связана с маркой бетона по морозостойкости следующим выражением:

$$P = \frac{0,1}{F}, \quad (2)$$

где  $F$  – марка бетона по морозостойкости.

Учет влияния морозной деструкции на процесс карбонизации является критически важным аспектом при проектировании, строительстве и оценке остаточного ресурса бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в климатических условиях с сезонным промерзанием. Игнорирование этого фактора приводит к существенным ошибкам в прогнозировании долговечности и может стать причиной преждевременного разрушения зданий и сооружений.

Эксплуатация железобетонных конструкций в условиях открытой атмосферы сопряжена и с постоянным воздействием климатических факторов, ключевым из которых является увлажнение атмосферными осадками (дождями, талым снегом). Влажностное состояние бетона оказывает неоднозначное влияние на скорость карбонизации, что обусловлено физико-химическими особенностями процесса [4, 5, 9]. С одной стороны, для протекания реакции карбонизации необходима поровая влага, так как она обеспечивает растворение гидроксида кальция. Однако при полном водонасыщении бетона диффузия углекислого газа резко замедляется. Это связано с тем, что коэффициент диффузии газа в воде значительно ниже, чем в воздухе. Таким образом, в полностью насыщенном состоянии поры

бетона заполнены водой, что блокирует доступ газа, в связи с этим процесс практически останавливается. С другой стороны, после прекращения воздействия природной влаги механизм карбонизации меняется. Природное увлажнение способствует растворению и вымыванию продуктов карбонизации с поверхности вглубь материала [10–13]. Это приводит к формированию на поверхности пористого слоя, который обладает значительно более высокой проницаемостью для газов по сравнению с исходной структурой. В результате, когда бетон высыхает, диффузия диоксида углерода через этот слой происходит гораздо интенсивнее, что ускоряет продвижение фронта карбонизации [14–16, 22]. Для учета влияния природного увлажнения на карбонизацию бетона в работах ученых [2–4, 17, 23] предлагается коэффициент  $k_w$ , учитывающий влияние климатических параметров:

$$k_w = \left(\frac{t_0}{t}\right)^w, \quad (3)$$

где  $t_0$  – эталонное время, лет ( $t_0 = 1$  год);  $t$  – время эксплуатации конструкции, лет;  $w$  – параметр, определяемый по формуле:

$$w = 0,5 * T_{0w}^{0,466}, \quad (4)$$

где  $T_{0w}$  – время увлажнения, определяемое по формуле:

$$T_{0w} = \frac{z}{365}, \quad (5)$$

где  $z$  – количество дней в году с осадками  $\geq 2,5$  мм.

### Постановка задачи

Целью настоящего исследования является комплексная оценка влияния двух ключевых климатических факторов – морозной деструкции и природного увлажнения – на процессы карбонизации бетона в условиях Ярославской области.

В рамках работы проводится анализ того, как циклическое замораживание и оттаивание, а также естественная влажность воздуха и осадки, воздействуют на скорость и глубину карбонизации бетона. Особое внимание уделяется установлению взаимосвязи между этими процессами и долговечностью железобетонных конструкций.

### Обсуждение результатов

В рамках настоящего исследования в качестве критерия для оценки воздействия климатических факторов на бетонные конструкции было принято среднее число дней с переходом температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$ , что соответствует количеству циклов замораживания-оттаивания за год. Для Ярославля этот параметр равен 144 сут., для Переславль-Залесского – 141 сут. На основании приведенных климатических данных и с использованием расчетных формул (1, 2) была выполнена оценка изменения коэффициента  $k_F$  во времени для различных марок бетона по морозостойкости. Такой подход позволил проанализировать, как марка бетона по морозостойкости влияет на скорость карбонизации железобетонных конструкций в процессе их эксплуатации в Ярославской области. В расчетах рассматривались конструкции, эксплуатируемые в открытой атмосфере. Согласно нормативным документам для изготовления таких конструкций рекомендуются марки бетона по морозостойкости в диапазоне от F100 до F250 [9–11, 18].

Анализ полученных данных позволил оценить, насколько существенно морозное разрушение

влияет на глубину карбонизации бетона в условиях различных городов региона (рис. 1).

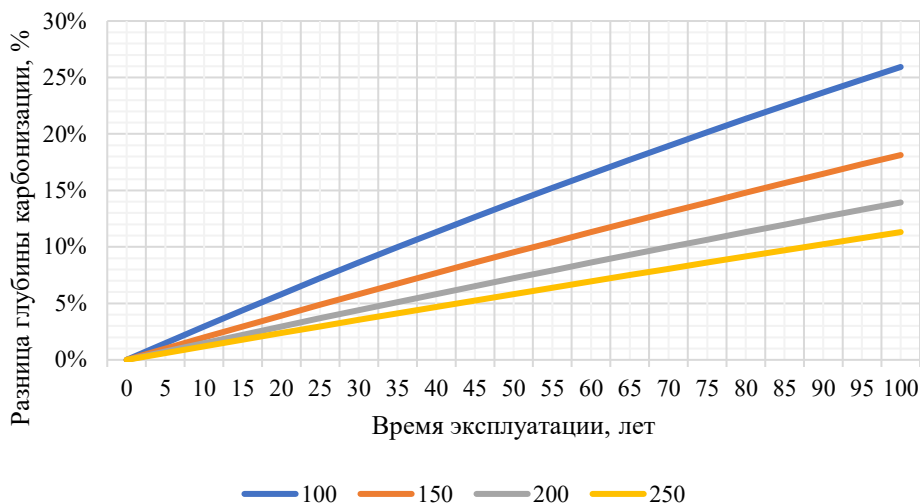


Рис. 1. Относительная разница глубин карбонизации на территории Ярославской области за счет влияния морозной деструкции для различных марок по морозостойкости: 1 – F100; 2 – F150; 3 – F200; 4 – F250 (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Relative differences in carbonation depths in the Yaroslavl region due to the influence of frost destruction for various frost resistance grades: 1 – F100; 2 – F150; 3 – F200; 4 – F250 (illustration by the authors)

Полученные результаты показывают, что за счет влияния морозной деструкции глубина карбонизации бетона на территории Ярославской области при расчетном сроке эксплуатации в 100 лет может отличаться следующим образом для марки бетона по морозостойкости F100 – до 26 %, для F150 – до 18 %, для F200 – до 14 %, для F250 – до 11 %. Эти результаты наглядно демонстрируют эффективность использования бетонов повышенной морозостойкости для повышения долговечности железобетонных конструкций в суровых климатических условиях.

Влияние природного увлажнения на карбонизацию бетона анализировалось относительно значений коэффициента  $k_w$ . Поскольку коэффициент  $k_w$  зависит

от числа дней в году с осадками, то для оценки влияния этого числа были выполнены расчеты коэффициента  $k_w$  по формулам (3–5). Расчеты выполнялись для сроков эксплуатации конструкции равных 10, 20, 30, 40, 50 лет. Число дней в году с осадками  $\geq 2,5$  мм для Ярославля составило 223,4 дн., для Переславль-Залеского – 195,6 дн.

Выполненные расчеты представлены на рисунке 2.

Расчеты изменения коэффициента  $k_w$  были выполнены для вертикальных и горизонтальных конструктивных элементов. Результаты расчетов представлены в таблице.

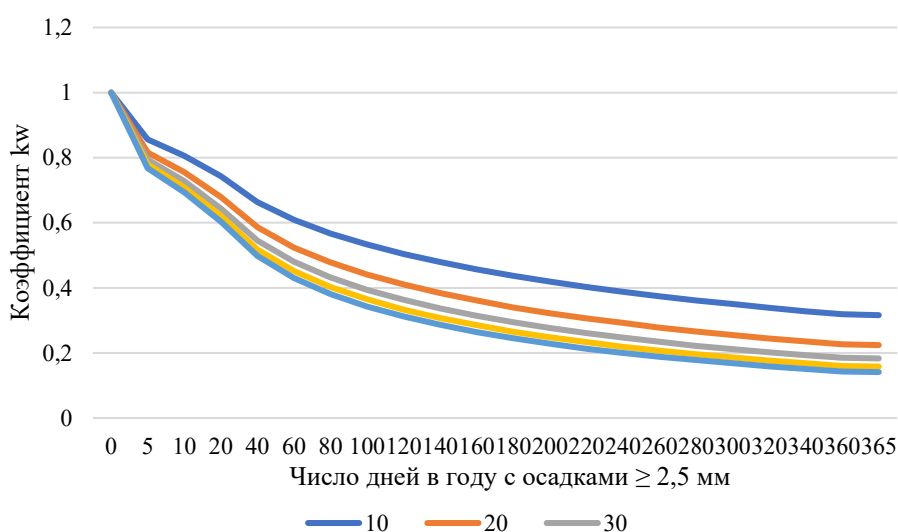


Рис. 2. Зависимости коэффициента  $k_w$  от числа дней с осадками  $\geq 2,5$  мм для сроков эксплуатации: 10 лет; 20 лет; 30 лет; 40 лет; 50 лет (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Dependence of the  $k_w$  coefficient on the number of days with precipitation  $\geq 2.5$  mm for service life: 10 years; 20 years; 30 years; 40 years; 50 years (illustration by the authors)

Изменение коэффициента  $k_w$  во времени для Ярославской области

№ п/п	Время эксплуатации, лет	$k_w$ (для горизонтальных элементов)		$k_w$ (для вертикальных элементов)	
		Ярославль	Переславль-Залесский	Ярославль	Переславль-Залесский
	1	2	3	4	5
1	0	1,000	1,000	1,000	1,000
2	5	0,527	0,548	0,942	0,935
3	10	0,400	0,423	0,918	0,908
4	15	0,340	0,363	0,905	0,892
5	20	0,304	0,326	0,895	0,882
6	25	0,278	0,300	0,888	0,874
7	30	0,258	0,280	0,882	0,867
8	35	0,243	0,265	0,877	0,861
9	40	0,230	0,252	0,872	0,856
10	45	0,220	0,241	0,869	0,852
11	50	0,211	0,232	0,865	0,848
12	55	0,203	0,223	0,862	0,845
13	60	0,196	0,216	0,859	0,842
14	65	0,190	0,210	0,857	0,839
15	70	0,184	0,204	0,855	0,837
16	75	0,179	0,199	0,852	0,834
17	80	0,175	0,194	0,850	0,832
18	85	0,171	0,190	0,848	0,830
19	90	0,167	0,186	0,847	0,828
20	95	0,163	0,182	0,845	0,826
21	100	0,160	0,179	0,843	0,824

Полученные результаты показывают, что природное увлажнение оказывает существенное влияние на глубину карбонизации бетона на территории Ярославской области, причем разница между глубиной карбонизации со временем нарастает.

Природное увлажнение и морозная деструкция оказывают на процесс карбонизации бетона противоположное влияние: регулярное увлажнение способствует замедлению карбонизации, тогда как разрушение структуры бетона под действием циклов замораживания и оттаивания, наоборот, ускоряет этот процесс. В реальных условиях эксплуатации, когда конструкции подвергаются одновременному воздействию влаги и перепадов температур, важно учитывать совместный эффект этих факторов. В связи с этим стоит учитывать коэффициент влияния климатических факторов  $k_{cl}$  [2, 19–21].

$$k_{cl} = k_w \cdot k_f, \quad (6)$$

где  $k_w$  – коэффициент влияния природного увлажнения бетона;  $k_f$  – коэффициент влияния морозного разрушения.

Расчет по формуле (8) был выполнен расчет для горизонтальных и вертикальных элементов

марок по морозостойкости F100–F250. Полученные результаты позволили сделать вывод, что влияние на карбонизацию морозной деструкции сильнее влияния природного увлажнения, следовательно карбонизация в условиях открытой атмосферы ускоряется.

#### Вывод

Ускоряющее влияние климатических факторов на процесс карбонизации бетона проявляется в разные сроки в зависимости от типа конструкции и марки бетона по морозостойкости. Анализ полученных данных показывает, что климатические условия Ярославской области оказывают существенное влияние на глубину карбонизации, причем расхождения между различными зонами со временем только увеличиваются. К концу расчетного срока эксплуатации (100 лет) разница в глубине карбонизации может быть весьма значительной. Для горизонтальных конструкций она достигает 17 % для F100, 9 % для F150, 4 % для F200 и 5 % для F250. Для вертикальных элементов эти расхождения еще более выражены и составляют до 28 % для F100, до 20 % для F150, до 16 % для F200 и до 13 % для F250.

#### Список литературы

1. Андрианов, А.Е. Воздействие климатических условий ленинградской области на железобетонные конструкции // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2023. – № 1 (21). – С. 72–80.
2. Батяновский, Э.И. Структура, непроницаемость и долговечность цементного бетона / Э.И. Батяновский, Н.С. Гуриченко, А.М. Корсун // Наука и техника. – 2022. – Т. 21. – № 1. – С. 19–27. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27
3. Батяновский, Э. И. Оценка эксплуатационной долговечности тяжелого бетона по критерию «остаточной» морозостойкости / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович // Автомобильные дороги и мосты. – 2010. – Т. 6. – № 2. – С. 49–59.
4. Васильев, А.А. К вопросу объективности современной оценки и прогнозирования карбонизации бетона на основе индикаторного метода // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – № 1 (119). – С. 77–80. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-77-80
5. Васильев, А. А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций: [монография] / А. А. Васильев. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.



6. Доломанюк, Р.Ю. Функция изменения физико-механических свойств бетона во времени в зависимости от периодов увлажнения на территории республики Беларусь // *Современные научные исследования и разработки*. – 2019. – № 1 (30). – С. 359-364.
7. Иванов, И.М. Механизм морозного разрушения бетонов с особо низкой проницаемостью / И.М. Иванов, Л.Я. Крамар, К.В. Шульдяков // *Цемент и его применение*. – 2022. – № 4. – С. 57-66.
8. Кабалин, М.Д. Пути повышения морозостойкости бетонов / М.Д. Кабалин, В.А. Токарев, М.А. Высоцкая // *Вестник ВСУТУ*. – 2025. – № 4 (99). – С. 73-86. DOI: 10.53980/24131997\_2025\_4\_73
9. Каприелов, С.С. Свойства высокопрочного бетона, подвергнутого периодическому воздействию температуры / С.С. Каприелов, А.Л. Гольденберг // *Строительные материалы*. – 2013. – № 3. – С. 60-66.
10. Логинова, С.А. Исследование устойчивости наномодифицированного бетона к коррозии в условиях повышенной биологической активности / С.А. Логинова, И.А. Воронов // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2025. – № 4 (54). – С. 35-39. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-54-4-35-39
11. Макаров, А.В. Влагозащита железобетонных мостов - важный фактор их долговечности / А.В. Макаров, Д.В. Ивасик, А.А. Васильченко // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. – 2025. – № 4 (54). – С. 12-17. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-54-4-12-17
12. Малюк, В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2020. – № 4 (45). – С. 105-115. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-11
13. Моргуц, А.Н. Морозостойкость бетона, способы ее повышения // *Наука, техника и образование*. – 2015. – № 7 (13). – С. 101-105.
14. Панталеенко, В.Н. Морозостойкость бетонов с добавлением пенополистирола / В.Н. Панталеенко, В.А. Оглоткин // *Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения*. – 2017. – № 2 (08). – С. 57-72.
15. Пинус, Б.И. Анализ вероятных последствий морозной деструкции цементных композитов // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2023. – Т. 13. – № 3 (46). – С. 538-544. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-3-538-544
16. Пинус, Б.И. Прогнозирование жизненного цикла железобетонных конструкций в суровых климатических условиях // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2024. – Т. 14. – № 2 (49). – С. 340-347. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-340-347
17. Фаликман, В.Р. О нормировании морозостойкости бетона в зарубежной и отечественной практике / В.Р. Фаликман, В.Ф. Степанова, Г.В. Чехний // *Бетон и железобетон*. – 2021. – № 1 (603). – С. 8-15.
18. Чернышов, Е.М. Морозная деструкция бетонов. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления // *Строительные материалы*. – 2017. – № 9. – С. 40-46.
19. Чугунова, А.С. Исследование изменения карбонизации по сечению бетона с учетом влияния морозной деструкции / А.С. Чугунова, А.А. Васильев // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт*. – 2020. – № 2 (41). – С. 105-107.
20. Шевцов, Е.И. Применение минеральных добавок в бетонах и их влияние на коррозионную стойкость / Е.И. Шевцов, Д.В. Петруновский // *Инженерный вестник Дона*. – 2026. – № 2 (134). – С. 38-44.
21. Ho V. Na. Bond strength of a steel bar in concrete reinforcing with shape memory alloy fibers / Ho V. Na., Ngo V. M., Vu V. T. // *Science Journal of Transportation*. – 2024. – No. 3(19). – Pp. 44-57.
22. Rimshin, V.I. Strengthening of reinforced concrete structures by composite materials taking into consideration the carbonization of concrete / V.I. Rimshin, P.S. Truntov // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. – 2023. – № 2(19). – Pp. 178-185. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-178-185
23. Tran, T.M. Effect of concrete damage on carbonation penetration in reinforced concrete structures / Tran T.M., Nguyen T.T., Tran T.T. // *Science Journal of Transportation*. – 2024. – № 4 (20). – Pp. 3-9.

#### References

1. Andrianov A.E. Vozdejstvie klimaticheskikh uslovij leningradskoj oblasti na zhelezobetonnye konstrukcii [Impact of climatic conditions of the Leningrad region on reinforced concrete structures]. *Vestnik mladogo uchenogo UGNTU* [Bulletin of the young scientist of Ufa State Petroleum Technical University]. 2023. No. 1 (21). Pp. 72-80.
2. Batyanovsky E.I., Gurinenko N.S., Korsun A.M. Struktura, nepronicajemost' i dolgovechnost' cementnogo betona [Structure, impermeability and durability of cement concrete]. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology]. 2022. Vol. 21. No. 1. Pp. 19-27. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-1-19-27
3. Batyanovsky E. I., Bondarovich A. I. Ocenka ekspluatacionnoj dolgovechnosti tyazhelogo betona po kriteriyu «ostatochnoj» morozostojkosti [Evaluation of the operational durability of heavy concrete based on the criterion of "residual" frost resistance]. *Avtomobil'nye dorogi i mosty* [Highways and bridges]. 2010. V. 6. No. 2. Pp. 49-59.
4. Vasiliev A.A. K voprosu ob'ektivnosti sovremennoj ocenki i prognozirovaniya karbonizacii betona na osnove indikatornogo metoda [On the issue of objectivity of modern assessment and forecasting of concrete carbonation based on the indicator method]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture]. 2020. No. 1 (119). Pp. 77-80. DOI: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-77-80
5. Vasiliev A. A. Karbonizacija i ocenka povrezhdennosti zhelezobetonnyh konstrukcij [Carbonization and damage assessment of reinforced concrete structures]: [monograph] / A. A. Vasiliev. - Gomel: BelGUT, 2012. - 263 p.
6. Dolomaniuk R.Yu. Funkcija izmeneniya fiziko-mekhanicheskikh svojstv betona vo vremeni v zavisimosti ot periodov uvlazhneniya na territorii respubliky Belarus [Function of changes in the physical and mechanical properties of concrete over time depending on periods of wetting in the Republic of Belarus]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki* [Modern scientific research and development]. 2019. No. 1 (30). Pp. 359-364.
7. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Shuldyakov K.V. Mechanism of frost destruction of concrete with particularly low permeability [Mechanism of frost destruction of concrete with particularly low permeability]. *Cement and its application* [Cement and its application]. 2022. No. 4. Pp. 57-66.
8. Kabalin M.D., Tokarev V.A., Vysotskaya M.A. Puti povysheniya morozostojkosti betonov [Ways to improve frost resistance of concrete]. *Vestnik VSGUTU* [Bulletin of VSGUTU]. 2025. No. 4 (99). Pp. 73-86. DOI: 10.53980/24131997\_2025\_4\_73

9. Kaprielov S.S., Goldenberg A.L. Svoystva vysokoprochnogo betona, podvergnutogo periodicheskomu vozdeystviyu temperatury [Properties of high-strength concrete subjected to periodic temperature exposure]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. 2013. No. 3. Pp. 60-66.
10. Loginova S.A., Voronov I.A. Issledovanie ustojchivosti nanomodifirovannogo betona k korrozii v usloviyah povyshennoj biologicheskoy aktivnosti [Study of the resistance of nanomodified concrete to corrosion under conditions of increased biological activity]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2025. No. 4 (54). Pp. 35-39. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-54-4-35-39
11. Makarov A.V., Ivasik D.V., Vasilchenko A.A. Vlagozashchita zhelezobetonnykh mostov - vazhnyy faktor ih dolgovechnosti [Moisture protection of reinforced concrete bridges is an important factor in their durability]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2025. No. 4 (54). Pp.12-17. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-54-4-12-17
12. Malyuk V.V. Koncepciya dolgovechnosti betona dlya prognoza sroka sluzhby konstrukcij v usloviyah moroznogo vozdeystviya [The concept of concrete durability for predicting the service life of structures under frost exposure]. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University]. 2020. No. 4 (45). Pp. 105-115. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-4-11
13. Morgun A.N. Morozostojkost' betona, sposoby ee povysheniya [Frost resistance of concrete, methods of its improvement]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie* [Science, technology and education]. 2015. No. 7 (13). Pp. 101-105.
14. Pantileenko V.N., Oglotkin V.A. Morozostojkost' betonov s dobavleniem penopolistirola [Frost resistance of concrete with the addition of expanded polystyrene]. *Resursy Evropejskogo Severa. Tekhnologii i ekonomika osvoeniya* [Resources of the European North. Technologies and economics of development]. 2017. No. 2 (08). Pp. 57-72.
15. Pinus, B.I. Analiz veroyatnykh posledstviy moroznoj destrukcii cementnykh kompozitov [Analysis of the probable consequences of frost destruction of cement composites]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* [News of universities. Investments. Construction. Real estate]. 2023. Vol. 13. No. 3 (46). Pp. 538-544. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-3-538-544
16. Pinus B.I. Prognozirovanie zhiznennogo cikla zhelezobetonnykh konstrukcij v surovyykh klimaticheskikh usloviyah [Forecasting the life cycle of reinforced concrete structures in harsh climatic conditions]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* [News of universities. Investments. Construction. Real estate]. 2024. Vol. 14. No. 2 (49). Pp. 340-347. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-340-347
17. Falikman V.R., Stepanova V.F., Chekhniy G.V. O normirovanii morozostojkosti betona v zarubezhnoj i otechestvennoj praktike [On the standardization of frost resistance of concrete in foreign and domestic practice]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2021. No. 1 (603). Pp. 8-15.
18. Chernyshov, E.M. Moroznaya destrukciya betonov. CHast' 1. Mekhanizm, kriterial'nye usloviya upravleniya [Frost destruction of concrete. Part 1. Mechanism, control criteria]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. 2017. No. 9. Pp. 40-46.
19. Chugunova A.S., Vasiliev A.A. Issledovanie izmeneniya karbonizatsii po secheniyu betona s uchedom vliyaniya moroznoj destrukcii [Study of changes in carbonation across a concrete cross-section taking into account the influence of frost destruction]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]. 2020. No. 2 (41). Pp. 105-107.
20. Shevtsov E.I., Petrunovsky D.V. Primenenie mineral'nykh dobavok v betonah i ih vliyanie na korroziionnuyu stojkost' [Use of mineral additives in concrete and their influence on corrosion resistance]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2026. No. 2 (134). Pp.38-44.
21. Ho V.Ha., Ngo V.M., Vu V.T. Bond strength of a steel bar in concrete reinforcing with shape memory alloy fibers. *Science Journal of Transportation*. 2024. No. 3(19). Pp. 44-57
22. Rimshin V.I., Truntov P.S. Strengthening of reinforced concrete structures by composite materials taking into consideration the carbonization of concrete / V.I. Rimshin, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023. No. 2(19). Pp. 178-185. DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-178-185
23. Tran T.M., Nguyen T.T., Tran T.T. Effect of concrete damage on carbonation penetration in reinforced concrete structures. *Science Journal of Transportation*. 2024. No. 4 (20). Pp. 3-9.

© С. А. Логинова, Е. А. Корсакова, А. Д. Нерубенко

**Ссылка для цитирования:**

Логинова С. А., Корсакова Е. А., Нерубенко А. Д. Влияние морозной деструкции и природного увлажнения на карбонизацию бетона // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 38–43.

УДК 624.04

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-43-49

**МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА КОМПЕНСИРУЮЩИХ НАГРУЗОК  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНСТРУКТИВНО-НЕЛИНЕЙНЫМ ЗАДАЧАМ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ**

**О. В. Душко, М. И. Бочков, Е. А. Максютова**

**Душко Олег Викторович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительная механика», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (8442) 97-48-72; e-mail: dushko@vgasu.ru;

**Бочков Максим Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (8442) 96-99-17; e-mail: bochkovmi@vgasu.ru;