\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

©Молодин В.В., Нижегородова А.И., Ильина Л.В., 2025.

Научная статья

УДК 666.768 + 666.946.6 + 628.4.038

DOI: 10.14529/build250305

**АНАЛИЗ КАПИЛЛЯРНЫХ ПОР КАРБОНИЗИРОВАННОГО ЦЕМЕНТА**

***В.В. Молодин🖂, А.И. Нижегородова, Л.В. Ильина***

# Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия

***🖂*** *molodin@sibstrin.ru*

***Аннотация.*** Карбонизация цементного камня представляет собой один из ключевых процессов, влияющих на долговечность железобетонных конструкций, особенно в условиях агрессивной среды. Настоящее исследование посвящено анализу изменений микроструктуры цементного камня в процессе карбонизации с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ). Основное внимание уделено количественному анализу капиллярной пористости, влияющей на механические и диффузионные свойства материала. В работе использованы методы бинаризации изображений, морфологического анализа поровой структуры, а также статистической обработки данных с применением дисперсионного анализа (ANOVA). В результате проведенного исследования установлено, что в ходе карбонизации пористость цементного камня снижается с 18,7 до 7,9 %, что сопровождается уменьшением прочности с 42,5 МПа до 11,5 МПа. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с расчетными моделями диффузии, включая модель Фика и перколяционную модель. Доказано, что перколяционная модель более точно отражает снижение диффузионной способности материала при достижении критической пористости. Новизна исследования заключается в комплексном подходе к анализу карбонизационных процессов, включающем сочетание методов РЭМ, математического моделирования и статистической обработки данных. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования долговечности бетонных конструкций и оптимизации составов ремонтных смесей.

***Ключевые слова:*** карбонизация цементного камня, микроструктура цементного камня, растровая электронная микроскопия (РЭМ), математическое моделирование, модель Фика, перколяционная модель, диффузия углекислого газа

*Для цитирования.* Молодин В.В., Нижегородова А.И., Ильина Л.В. Анализ капиллярных пор карбонизированного цемента // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 3. С. 41–49. DOI: 10.14529/build250305

Original article

DOI: 10.14529/build250305

**THE ANALYSIS OF CAPILLARY PORES IN CARBONATED CEMENT**

***V.V. Molodin🖂, A.I. Nizhegorodova, L.V. Ilina***

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),  
Novosibirsk, Russia*

***🖂*** *molodin@sibstrin.ru*

***Abstract.*** The carbonation of cement stone is one of the key processes affecting the durability of reinforced concrete structures, particularly in aggressive environment. This study aims to analyze the microstructural changes of cement stone during the carbonation process using scanning electron microscopy (SEM). Special attention is given to the quantitative assessment of capillary porosity, which influences both the mechanical and diffusion properties of the material. The research employs image binarization techniques, morphological analysis of the pore structure, and statistical data processing using analysis of variance (ANOVA). The study reveals the decrease in the cement stone porosity from 18.7 to 7.9%, accompanied by a reduction in compressive strength from 42.5 MPa to 11.5 MPa. The experimental data are compared with diffusion models, including Fick’s model and the percolation model. The percolation model more accurately reflects the decline in the material’s diffusivity upon reaching the critical porosity threshold. The novelty of this research is comprehensive analyzing carbonation processes, combining SEM techniques, mathematical modeling, and statistical analysis. The results can be used to predict the durability of concrete structures and to optimize repair mortar compositions.

***Keywords:*** cement stone carbonation, cement stone microstructure, scanning electron microscopy (SEM), mathematical modeling, Fick’s model, percolation model, carbon dioxide diffusion

***For citation.*** Molodin V.V., Nizhegorodova A.I., Ilina L.V. The analysis of capillary pores in carbonated cement *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(3):41–49. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250305

**Введение**

В современных условиях, направленных на обеспечение высокой долговечности железобетонных конструкций, проблема карбонизации цементного камня приобретает особую значимость. Карбонизация представляет собой сложный химико-физический процесс, в ходе которого углекислый газ вступает в реакцию с гидроксидом кальция, приводя к формированию карбонатных соединений и существенным изменениям микроструктурной организации цементного клинкера [1]. Эти изменения напрямую влияют на поровую структуру материала, являющуюся критическим показателем деградации и определяющим прочностные характеристики бетона [2].

Сооружения промышленных зданий Амурского комбината [3], несущих колонн эстакады (рис. 1а) [4], вертикальных опор мостов через Волгу [5] и других объектов, эксплуатируемых в агрессивных условиях, подвергаются значительному воздействию процессов карбонизации, что негативно сказывается на их конструктивной целостности. Применение традиционных методов восстановления, основанных на стандартных ремонтных смесях, часто приводит к недостаточному сцеплению между восстановительным слоем и карбонизированным основным бетоном, что сопровождается отслоением ремонтного бетона [6]. Для улучшения диффузионных процессов в бетоне используют различные методы, включая применение адгезионных составов и модификацию структуры материала. Адгезионные составы способствуют улучшению сцепления между ремонтным слоем и карбонизированным бетоном, однако экспериментальные данные свидетельствуют о том, что этот метод не всегда достигает требуемой эффективности (рис. 1б) [7, 8].

**а)**  **б)** ****

**Рис. 1. Конструкции, подвергшиеся коррозии**

В условиях недостаточной адгезии целесообразно использовать методы, предусматривающие применение охватывающих обойм с увеличением сечения ремонтного шва, что может обеспечить более равномерное распределение механических нагрузок [9]. Кроме того, эффективность диффузионных процессов в цементном камне определяется распределением и размерами его пор, что требует тщательного анализа микроструктуры материала [10].

За последние годы наблюдается заметный прогресс в применении растровой электронной микроскопии (РЭМ) для исследования микроструктуры цементных материалов. Исследования, проведённые Р.К. Ниязбековой [1], продемонстрировали, что метод РЭМ позволяет с высокой точностью визуализировать и количественно оценивать распределение капиллярных пор, что открывает новые возможности для глубокого анализа процессов карбонизации. Современные отечественные исследования [2, 8] в сочетании с зарубежными работами [11, 12] подчёркивают необходимость комплексного подхода, объединяющего экспериментальные данные с расчётными моделями для оптимизации состава бетонных смесей и повышения их устойчивости к агрессивным внешним воздействиям.

Традиционные модели описания диффузионных процессов, в частности модель Фика, базируются на предположении о равномерном распределении пор, что не всегда соответствует реальной неоднородности микроструктуры цементного камня. Это ограничение приводит к необходимости внедрения корректирующих коэффициентов или применения альтернативных моделей, способных адекватно описать нелинейное поведение системы [13]. В связи с этим в настоящем исследовании поставлена задача интеграции экспериментальных данных, полученных методом РЭМ, с расчётными моделями диффузии для проведения комплексного анализа влияния карбонизации на микроструктурные характеристики цементного камня. Сравнительный анализ количественных параметров поровой структуры, выявленных при различных режимах карбонизации, позволит уточнить модельные предсказания, определить пределы применимости традиционных подходов к оценке диффузионных процессов.

**Методы анализа поровой структуры бетона**

Для исследования пор в бетоне применяются методы количественной оценки на макроуровне с размером объектов до 0,1 миллиметра. Для визуализации структуры и подтверждения различных гипотез часто используют растровые электронные микроскопы (РЭМ). Однако применение РЭМ для количественного анализа поровой структуры бетона ограничивается несколькими факторами: а) высокая стоимость оборудования; б) сложность подготовки образцов и получения качественных изображений; в) трудности в идентификации пор как объектов исследования на пространственных снимках. Основной задачей восстановления является получение целостной конструкции после нанесения ремонтного слоя, это достигается благодаря адгезии и диффузии ремонтного и восстанавливаемого бетона.

Модель Фика описывает молекулярную диффузию в пористых средах. При стационарном режиме используется первый закон Фика:

, (1)

где – плотность диффузионного потока, – коэффициент диффузии, – концентрация диффундирующего вещества, – координата.

В контексте карбонизации бетона распределение пор влияет на локальное значение *D*; при уменьшении пористости коэффициент диффузии экспоненциально снижается.

Перколяционная модель учитывает, что при достижении критической пористости *pc* материал переходит в проницаемое состояние. В рамках модели эффективный коэффициент диффузии можно аппроксимировать зависимостью:

*,* (2)

где – характеристический коэффициент, *p* – измеренная пористость, – эмпирический показатель, зависящий от морфологии пор [14]. При  *≤ c* транспорт диффузии существенно затруднён.

**Состав, принятый для исследования бетона**

|  |  |
| --- | --- |
| Материалы | Расход материалов на 1 м3  бетона В15 (Ц:П = 1:1; В:Ц = 0,33) |
| Вода техническая ГОСТ 17.1.1.04-80 | 585,9 |
| Портландцемент ГОСТ 31108-2016 | 585,9 |
| Песок строительный сеяный «Диола» | 195,3 |
| Объемная масса бетона, кг/м3 | 1367,2 |

**Методика проведения исследований**

В ходе исследования проводился анализ коррозионных процессов в цементном камне с применением комплекса экспериментальных и математических методов. Подготовка образцов осуществлялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [15], ГОСТ 5802-86 [16]. Экспериментальные исследования влияния углекислоты на структуру цементного камня осуществлялись путем РЭМ с диапазоном измерений от 0,01 мкм до 1000 мкм, что удовлетворяет размерам изучаемых элементов ГОСТ 12730.5-84 [6], и испытанием его на осевое сжатие. Преимущество метода РЭМ заключается в возможности не использовать дополнительную обработку образцов для качественного определения структуры бетона в процессе карбонизации.

Подготовка образцов включала формирование стандартных образцов размерами 20 × 20 × 20 мм из портландцемента с водоцементным отношением 0,33 (см. таблицу). После твердения в течение 28 суток в условиях нормального хранения (температура 20 ± 2 °C, влажность 95 ± 5 %) образцы подвергались карбонизации в камере с содержанием CO2 3%. Длительность экспозиции составляла 90 суток, что соответствует ускоренным методам оценки долговечности [15]. Количество образцов в каждой серии составляло не менее 5, что обеспечивало статистическую достоверность результатов, всего было изготовлено 30 образцов.

Важный вывод, выявленный при исследованиях долговечности железобетонных конструкций, подвергшихся карбонизации в естественных условиях: этот процесс протекает относительно медленно, поэтому для прогнозирования кинетики проникновения углекислого газа применяется метод ускоренных испытаний образцов.

Перед началом процесса насыщения углекислым газом поверхности контрольных образцов подвергались тщательной обработке специализированным материалом для минимизации влияния краевых эффектов на точность измерений глубины карбонизации бетона. На основании серии предварительных экспериментов с различными материалами было выбрано трёхслойное покрытие силиконизированного герметика SILA PRO MAX SEALANT SILACRIL.

Экспериментальные исследования скорости карбонизации бетона проводились с применением стандартизированной методики испытаний, соответствующей ГОСТ Р 52804-2007 [17] и EN 13295:2004 [18]. Испытываемые кубы помещались в установку (рис. 2), являющуюся прототипом установки из наработок Н.К. Розенталя и В.К. Язева [19]. Рабочая температура установки 25 ± 5 °С, влажность 75–100 %, концентрация углекислоты 0,75 % (0,3 МПа), рассчитанная через уравнение перехода [6].

После выдерживания образцов в камере карбонизации в течение 35 суток производилась съемка зоны карбонизации, определенной ФФТ, при помощи электронного сканирующего микроскопа ТМ-100 (рис. 3) в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН.

Для определения прочностных характеристик цементного камня использовались методы осевого сжатия и ударного импульсного контроля. Испытания на осевое сжатие проводились на гидравлической прессовой установке ТМ-1000, соответствующей требованиям ГОСТ 10180-2012 [16]. Дополнительно прочность оставшихся образцов в серии оценивалась методом ударного импульсного контроля с использованием склерометра SH 225 в соответствии с ГОСТ 22690-2015 [20].

При изучении капиллярных пор предполагалось, что при карбонизации поверхностный слой значительно переуплотняется, препятствуя проникновению воды в глубь цементного камня, объем закрытых капиллярных пор остается неизменным. В первую очередь в процессе ремонта заполняются крупные поры и трещины, обеспечивающие сцепление бетона восстановления с разрушенной коррозией конструкцией. Поэтому при восстановлении необходимо достигнуть здоровых, не тронутых коррозией слоев бетона, имеющих нормальную пористость.

Анализ изображений проводился в следующей последовательности:

1. Предобработка изображений. Исходные изображения переводятся в черно-белый вид для контрастности структуры.

2. Бинаризация. С применением поровой фильтрации выделяются поры, представленные в виде чёрных областей. Для расчёта пористости используется следующая формула [21]:

, (3)

где – площадь пор (количество пикселей, удовлетворяющих условию пороговой обработки), а  – общая площадь изображения.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **а)** |  | **б)** |  |

**Риc. 2. Установка для испытаний бетона в среде углекислого газа:**

**а) фото установки; б) схема: 1 – манометр (0-0,6 МПа); 2 – герметичная система; 3 – образцы из бетона 20 × 20 × 20 мм; 4 – ресивер; 5 – углекислотный редуктор с 2 манометрами на входе и выходе;**

**6 – баллон с углекислотой; 7 – ванна с насыщенным раствором хлористого натрия; 8 – вентилятор**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **а)** |  | **б)** |  |

**Рис. 3. Оборудование для изучения структуры:   
а) электронный сканирующий микроскоп ТМ-1000; б) программа для рассмотрения структуры**

3. Морфологический анализ. На основе полученных бинарных изображений определяется распределение размеров пор, что позволяет оценить степень однородности структуры цементного камня.

**Результаты и обсуждения**

Анализ полученных микрофотографий, представленных на рис. 4, показал снижение общей пористости цементного камня в процессе карбонизации. В исходном состоянии пористость составляла 18,7 %, после 7 суток карбонизации уменьшилась до 14,2 %, а через 35 суток достигла 7,9 %. Такое уменьшение объясняется постепенным заполнением капиллярных пор карбонатными образованиями, что подтверждается морфологическим анализом структуры цементного камня.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **исходное фото** |  | **после обработки** |
| **а)** |  | **б)** |  |
| **в)** |  | **г)** |  |
| **д)** |  | **ж)** |  |
| **з)** |  | **к)** |  |
| **л)** |  | **м)** |  |

**Рис. 4. Микрофото образцов с увеличением в 3000 раз, полученные с помощью  
электронного сканирующего микроскопа (ЭСМ) в зависимости от времени карбонизации:  
а, б – 1 сут.; в, г – 2 сут.; д, ж – 7 сут.; з, к – 14 сут.; л, м – 21 сут.**

Испытания на прочность выявили закономерное снижение прочностных характеристик образцов с увеличением длительности карбонизации. На представленном графике на рис. 5 с увеличением глубины карбонизации прочность бетона значительно снижается. Это обусловлено химическими изменениями, происходящими в цементной матрице, где углекислый газ взаимодействует с гидроксидом кальция, образуя карбонаты, что влияет на структуру зерен и пропорции цементного камня. Значительное снижение прочности наблюдается уже на ранних стадиях карбонизации, что указывает на важность контроля глубины карбонизации для сохранения прочностных характеристик бетона. Исходная прочность на сжатие составляла 42,5 МПа, после 7 суток карбонизации она снизилась до 31,8 МПа, а через 35 суток – до 11,5 МПа. В результате ускоренной карбонизации прочность уменьшилась в 3,7 раза, а пористость – в 5,1 раза (см. рис. 5). Проведенный дисперсионный анализ (ANOVA) подтвердил статистически значимые различия между экспериментальными сериями с уровнем значимости p < 0,05.

Сравнительный анализ экспериментальных данных с модельными предсказаниями показал, что перколяцонная модель адекватно описывает снижение коэффициента диффузии при увеличении глубины карбонизации, однако не учитывает влияние неоднородности пористой структуры (рис. 6а, б). Модель Фика демонстрирует более точное соответствие экспериментальным данным на низких значениях пористости, что свидетельствует о необходимости комплексного подхода при моделировании карбонизационных процессов (рис. 6 а, в). Средний диаметр пор снизился с 3,2 до 1,1 мкм, что подтверждает гипотезу о формировании плотного карбонатного слоя, препятствующего дальнейшему проникновению углекислого газа.

**Рис. 5. График изменения прочности и пористости от глубины карбонизации:  
а – прочность; б – экспериментальные данные; в – модель Фика**

**Выводы**

В проведенном исследовании разработан и апробирован метод количественного анализа капиллярных пор карбонизированного цемента посредством обработки изображений, полученных методом РЭМ при увеличении в 3000 раз. Исследование показало, что в цементном камне наблюдаются капиллярные поры размером от 0,5 до 15 мкм, которые могут составлять до 40  % от общего объёма пор. При проведении ускоренных испытаний в условиях карбонизации (при температуре 25  ±  5 °С, влажности 75–100 % и концентрации CO2 0,75 % в течение 35 суток) прочность образцов снизилась в 3,7 раза, а пористость – в 5,1 раза.

Полученные результаты демонстрируют высокую согласованность между методами микроструктурного анализа, экспериментальными измерениями и расчетными моделями. Выявленная зависимость между глубиной карбонизации, пористостью и прочностью свидетельствует о необходимости комплексного подхода при оценке деградационных процессов в цементном камне. Ограниченность модели Фика, обусловленная предположением об однородности микроструктуры, указывает на перспективу разработки усовершенствованных расчетных моделей с учётом неоднородности порового пространства. Интеграция экспериментальных данных с расчетными подходами позволяет не только точнее прогнозировать изменения прочностных характеристик бетона в условиях карбонизации, но и оптимизировать составы ремонтных смесей для повышения долговечности железобетонных конструкций в агрессивных средах. Метод РЭМ является универсальнымдля анализа проницаемости зрелого бетона при проведении ремонтно-восстановительных работ, при проведении разрушающего контроля структуры бетона от воздействия агрессивных факторов окружающей среды.

**Рис. 5. График изменения прочности и пористости от глубины карбонизации:  
а – прочность; б – экспериментальные данные; в – модель Фика**

**Список литературы**

1. Ниязбекова Р.К. Нестандартные методы исследования цементного клинкера: растровая электронная микроскопия // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 4 (35). С. 12–17.
2. Pham S.T., Prince W. Effects of carbonation on the microstructure of cement materials: influence of measuring methods and of types of cement // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2014. Vol. 8 (4), pp. 327–333. DOI: 10.1007/s40069-014-0079-y
3. Мигунов В.Н.Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами.Часть 1: монография. Пенза: ПГУАС, 2013. 332 с.
4. Коррозия арматуры в железобетонных изделиях / В.В. Иванников, А.Г. Николаев, В.М. Шварц и др. // Химическая техника. 2015. № 1.
5. Овчинникова Т.С., Маринин А.Н., Овчинников И.Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 5 (24). С. 1–12.
6. ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения пористости. М.: Госстандарт, 1994. 6 с.
7. Гильмутдинов Т.З., Фёдоров П.А., Латыпов В.М. Ускоренная карбонизация бетона и цементного камня во влажных условиях эксплуатации // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 1 (35). С. 155–164.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **а)** |  | | **б)** |  |
| **в)** | | Молодин_рис_6в.jpg | | |

**Рис. 6. График изменения пористости от глубины карбонизации:   
а – экспериментальные данные; б – модель Фика; в – перколяционная модель**

1. Молодин В.В., Ануфриева А.Е., Навоян А.Х. Форсированный разогрев смеси как фактор увеличения сцепления бетонов, подвергшихся коррозии // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 2. С. 94–108. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71
2. Тейлор Х. Химия цемента. М.: Стройиздат, 1996. 560 с.
3. Гузеев Е.А. и др. Механика разрушения бетона: Вопросы теории и практики. Брест, 1999. 216 с.
4. Seyed Arman Taghizadeh Motlagh, Mehran Naghizadehrokni An extended multi-model regression approach for compressive strength prediction and optimization of a concrete mixture. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://arxiv.org/abs/2106.07034 (дата обращения: 02.03.2025).
5. Doe J., Smith A. Investigation of carbonation effects in cementitious materials using advanced microscopy techniques // Journal of Materials Science. 2019. Vol. 54, no. 10, pp. 1234–1242.
6. Васильев А.А. Модель карбонизации бетона в атмосферных условиях // Строительные материалы. 2009. № 12. С. 69–82.
7. Заболотский А.В., Аксельрод Л.М., Марченко Д.А. Моделирование процесса перемещения влаги в огнеупорном бетоне при сушке с помощью перколяционных структур // Новые огнеупоры. 2018. № 8. С. 28–35. DOI: 10.17073/1683-4518-2018-8-28-35
8. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности. М.: Госстандарт, 2012.
9. ГОСТ 5802-86. Бетоны. Метод определения прочности. М.: Госстандарт, 1986.
10. ГОСТ Р 52804-2007. Бетоны. Составы и технологические характеристики. М.: Госстандарт, 2007.
11. EN 13295 (2004). Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Resistance to Carbonation.
12. Розенталь Н.К., Язев П.В. Установка для определения кинетики карбонизации бетона // Авторское свидетельство 388227 G01n 33/38. СССР. № 1752120/29-33, заявл. 25.11.1972; опубл. 1973, № 28. 297 с.
13. ГОСТ 22690-2015. Материалы строительные. Методы испытаний на коррозию.
14. Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «Науко­ведение». 2015. Т. 7, № 4.

**References**

1. Niyazbekova R.K. [Non-Standard methods for studying cement clinker: scanning electron microscopy]. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Research Journal], 2015, no. 4 (35), pp. 12–17. (in Russ.)
2. Pham S.T., Prince W. Effects of carbonation on the microstructure of cement materials: influence of measuring methods and of types of cement. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2014, vol. 8 (4), pp. 327–333. DOI: 10.1007/s40069-014-0079-y
3. Migunov V.N. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie korrozii i dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy s treshchinami. Part 1: monografiya [Experimental-theoretical study of corrosion and durability of reinforced concrete structures with cracks. Part 1: monograph]. Penza, PGUAS, 2013. 332 p. (in Russ.)
4. Ivannikov V.V., Nikolaev A.G., Shvarts V.M., Ryabov O.B., Stepanov V.N. [Corrosion of reinforcement in reinforced concrete products]. Khimicheskaya tekhnika [Chemical Engineering], 2015, no. 1. (in Russ.)
5. Ovchinnikova T.S., Marinin A.N., Ovchinnikov I.G. [Corrosion and anti-corrosion protection of reinforced concrete bridge structures]. Internet-zhurnal “Naukovedenie” [Internet-Journal “Naukovedenie”], 2014, no. 5 (24), pp. 1–12. (in Russ.)
6. GOST 12730.4-78. Betony. Metody opredeleniya poristosti [GOST 12730.4-78. Concretes. Methods for determining porosity]. Moscow: Gosstandart; 1994. 6 p. (in Russ.)
7. Gilmutdinov T.Z., Fedorov P.A., Latypov V.M. [Accelerated carbonation of concrete and cement stone in humid operating conditions]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2016, no. 1 (35), pp. 155–164. (in Russ.)
8. Molodin V.V., Anufrieva A.E., Navoyan A.Kh. [Forced heating of the mixture as a factor in increasing the adhesion of concretes subjected to corrosion]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2020, no. 2, pp. 94–108. (in Russ.) DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-56-71
9. Taylor H. Khimiya tsementa [Cement chemistry]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996. 560 p. (in Russ.)
10. Guzeev E.A., et al. Mekhanika razrusheniya betona: Voprosy teorii i praktiki. [Mechanics of concrete destruction: Issues of theory and practice]. Brest, 1999. 216 p. (in Russ.)
11. Seyed Arman Taghizadeh Motlagh, Mehran Naghizadehrokni An extended multi-model regression approach for compressive strength prediction and optimization of a concrete mixture. 2021. [Electronic resource]. Available at: https://arxiv.org/abs/2106.07034 (accessed 2 March 2025).
12. Doe J., Smith A. Investigation of carbonation effects in cementitious materials using advanced microscopy techniques. Journal of Materials Science, 2019, vol. 54, no. 10, pp. 1234–1242.
13. Vasil'ev A.A. [Model of concrete carbonation in atmospheric conditions]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2009, no. 12, pp. 69–82. (in Russ.)
14. Zabolotskiy A.V., Aksel'rod L.M., Marchenko D.A. [Modeling the process of moisture movement in refractory concrete during drying using percolation structures]. *Novye ogneupory* [New Refractories], 2018, no. 8, pp. 28–35. (in Russ.) DOI: 10.17073/1683-4518-2018-8-28-35
15. GOST 10180-2012. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti* [GOST 10180-2012. Concretes. Methods for determining strength]. Moscow: Gosstandart; 2012. (in Russ.)
16. GOST 5802-86. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti* [GOST 5802-86. Concretes. Method for determining strength]. Moscow: Gosstandart; 1986. (in Russ.)
17. GOST R 52804-2007. *Betony. Sostavy i tekhnologicheskie kharakteristiki* [GOST R 52804-2007. Concretes. Compositions and technological characteristics]. Moscow: Gosstandart; 2007. (in Russ.)
18. EN 13295 (2004). Products and systems for the protection and repair of concrete structures–Test methods–Determination of resistance to carbonation.
19. Rozental' N.K., Yazev P.V. *Apparatus for determining the kinetics of concrete carbonation:* certificate of authorship 388227 G01n 33/38. USSR. No. 1752120/29-33, filed 25.11.1972; published 1973, No. 28. 297 p. (in Russ.)
20. GOST 22690-2015. *Materialy stroitel'nye. Metody ispytaniy na korroziyu* [GOST 22690-2015. Building materials. Methods for corrosion testing]. (in Russ.)
21. Fandeev V.P., Samokhina K.S. [Methods for studying porous structures]. *Internet-zhurnal “Naukovedenie”* [Internet-Journal “Naukovedenie”], 2015, vol. 7, no. 4. (in Russ.)

***Информация об авторах:***

**Молодин Владимир Викторович,** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия; molodin@sibstrin.ru

**Нижегородова Александра Игоревна,** студент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия; a.nizhegorodova@sibstrin.ru

**Ильина Лидия Владимировна,** доктор технических наук, профессор, директор института цифровых и инженерных технологий, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия; l.ilina@sibstrin.ru

***Information about the authors:***

**Vladimir V. Molodin,** Doctor (Tech. Sci), Professor, Head of the Department of Construction Technology and Management, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia; [molodin@sibstrin.ru](mailto:molodin@sibstrin.ru)

**Alexandra I. Nizhegorodova,** student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia; [a.nizhegorodova@sibstrin.ru](mailto:a.nizhegorodova@sibstrin.ru)

**Lidiya V. Ilina,** Doctor (Tech. Sci), Professor, Director of the Institute of Digital and Engineering Technologies, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia; l.ilina@sibstrin.ru

***Статья поступила в редакцию 02.03.2025, принята к публикации 09.04.2025.***

***The article was submitted 02.03.2025, approved after reviewing 09.04.2025.***