

## Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами

Сергей Викторович Федосов, Борис Евгеньевич Нармания

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Воздействие микроорганизмов на цементный камень (ЦК) бетона ускоряет вывод «свободного гидроксида кальция» из поровой структуры и способствует разложению кальцийсодержащих фаз, в результате чего происходит снижение прочностных характеристик бетона и дальнейшее разрушение. Биоповреждение необходимо учитывать при определении долговечности бетона. Математическое моделирование позволяет на любом этапе жизненного цикла бетонного изделия спрогнозировать его состояние и установить остаточный срок службы.

**Материалы и методы.** Влияние параметров массопереноса на изменение концентраций гидроксида кальция в бетоне и на интенсивность его вымывания в жидкую среду показано графически по результатам численного моделирования. Разработана математическая модель для описания процессов массопереноса при биологической коррозии бетона, в которой влияние микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности объясняется внутренним источником поглощения или высвобождения массы, в частности «свободного гидроксида кальция», в бетонном ЦК. Условия достижения значений концентраций гидроксида кальция в ЦК, соответствующих началу разложения высокоосновных составляющих, описываются с помощью решения задачи массообмена.

**Результаты.** На основе математической модели, описывающей кинетику массопереноса, разработан математический аппарат для прогнозирования степени биодegradации цементных бетонов. Представлены графические зависимости, которые являются результатом имитационного численного эксперимента. Они описывают для широкого диапазона параметров системы влияние критериев подобия (Фурье, Био) и коэффициента, учитывающего фазовые характеристики, на динамику и кинетику процесса массопереноса при биокоррозии бетона. Наиболее интенсивное изменение кинетики и динамики массообмена наблюдается на начальных стадиях воздействия продуктов жизнедеятельности микроорганизмов при жидкостной коррозии бетона.

**Выводы.** Полученные графические зависимости дают понимание об условиях замедления и интенсификации процессов массопереноса в системе «бетон – биопленка – жидкая среда». Инженерная методика расчета параметров массообмена и срока службы бетона применима на любом этапе эксплуатации железобетонных изделий и конструкций и дает возможность экономически обоснованно назначать средства защиты и устанавливать сроки их использования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** биокоррозия бетона, долговечность бетона, процессы массопереноса, кинетика массопереноса, прогнозирование долговечности, уравнения массопроводности, математическое моделирование, графическое моделирование, параметры массопереноса, выщелачивание бетона

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Федосов С.В., Нармания Б.Е. Моделирование влияния параметров массопереноса на кинетику коррозионного взаимодействия бетона с биологическими средами // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 596–605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.596-605

Автор, ответственный за переписку: Борис Евгеньевич Нармания, borisfablee@gmail.com.

## Modelling the influence of mass transfer parameters on the kinetics of corrosion interaction of concrete and biological media

Sergey V. Fedosov, Boris E. Narmaniya

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The impact of microorganisms on the cement stone of concrete accelerates the removal of “free calcium hydroxide” from the pore structure and promotes the decomposition of calcium-containing phases, resulting in a decrease in the strength characteristics of concrete and further destruction. Biodegradation must be taken into account when determining the durability of concrete. Mathematical modelling makes it possible to predict its condition at any stage of the life cycle

of a concrete product and to establish its remaining service life.

**Materials and methods.** The effect of mass transfer parameters on changes in calcium hydroxide concentrations in concrete and on the intensity of its leaching into a liquid medium is shown graphically by the results of numerical modelling. The description of mass transfer processes in concrete biocorrosion was carried out using a developed mathematical model, which takes into account the influence of microorganisms and their waste products as an internal source of absorption or release of mass of “free calcium hydroxide” in concrete cement stone. The conditions for reaching the values of calcium hydroxide concentrations in cement stone corresponding to the beginning of decomposition of highly basic components are described by solving the mass transfer problem.

**Results.** Based on the mathematical model describing the kinetics of mass transfer, a mathematical apparatus for predicting the degree of biodegradation of cement concrete was developed. Graphical dependences are presented, which are the result of a simulated numerical experiment, describing the effect of similarity criteria (Fourier, Bio) and a coefficient taking into account phase characteristics on the dynamics and kinetics of the mass transfer process during concrete biodegradation in a wide range of system parameters. The most intense change in the kinetics and dynamics of mass transfer occurs at the initial stages of exposure to the products of microorganisms during liquid corrosion of concrete.

**Conclusions.** The obtained graphical dependences provide an understanding of the conditions for slowing down and intensifying mass transfer processes in the concrete – biofilm – liquid medium system. The engineering methodology of calculation of mass transfer parameters and service life of concrete is applicable at any stage of operation of reinforced concrete products and structures and makes it economically feasible to assign protective equipment and set the terms of their use.

**KEYWORDS:** concrete biocorrosion, concrete durability, mass transfer processes, mass transfer kinetics, durability prediction, mass transfer equations, mathematical modelling, graphical modelling, mass transfer parameters, concrete leaching

**FOR CITATION:** Fedosov S.V., Narmaniya B.E. Modelling the influence of mass transfer parameters on the kinetics of corrosion interaction of concrete and biological media. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):596-605. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.596-605 (rus.).

*Corresponding author:* Boris E. Narmaniya, borisfablee@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Моделирование повреждений бетона, вызванных коррозией, — сложная задача. Это требует не только реалистичного подхода к моделированию протекающих химических реакций и скорости образования продуктов коррозии, но и надлежащей оценки механических и диффузионных свойств продуктов коррозии. Кроме того, немеханические процессы должны быть связаны с механическим поведением бетона, чтобы правильно оценить влияние повреждения на кинетику реакций.

При исследовании биоповреждений возникают некоторые осложнения: затрудненность диагностики биодеструкции и идентификации микроорганизмов на ранних стадиях развития, что требует участия специалистов для распознавания; микроорганизмы в биоценозах оказывают взаимное влияние друг на друга, синергетически действуют на материалы, умеют адаптироваться к окружающей среде и различным субстратам, которые они колонизируют, что затрудняет моделирование и прогнозирование развития биоповреждений; сложность выделения степени повреждения материала в реальных условиях эксплуатации именно микроорганизмами, поскольку происходит усиление других видов коррозионных процессов в композитах и покрытиях и синергетическое действие с окружающей средой.

Вследствие широкого внедрения информационных технологий в науку и технику при разработке и изучении сложных систем обязательным этапом стало моделирование процессов, происходящих при их эксплуатации, для прогнозирования поведения материалов и компонентов системы при различных условиях, статистическая оценка параметров системы для управления ее свойствами и характери-

стиками. Многообразие методологий и подходов позволяет разрабатывать модели деструкции различных строительных материалов в разных условиях эксплуатации [1–6]. При внедрении новых материалов и технологических процессов в производство строительных изделий и конструкций неотъемлемым элементом стало прогнозирование характеристик и срока их службы с помощью моделей [7–11].

Математические модели для описания коррозии материалов должны учитывать специфические ситуации и основные особенности протекающих процессов. Эти модели наиболее естественно выражаются в форме дифференциальных уравнений [12–17].

Степень повреждения бетона и железобетона жидкими агрессивными средами обусловлена их физико-химическими свойствами и механизмом взаимодействия агрессивных компонентов с композиционным материалом. При постоянном контакте с агрессивной жидкостью активно протекают процессы ионного обмена с внешней средой. Накопление агрессивного агента в поровом пространстве бетона также может происходить в условиях капиллярного всасывания, когда бетонное или железобетонное изделие или конструкция частично погружены в агрессивный раствор.

Для описания скорости поступления агрессивных веществ (хлорид-ионы, углекислый газ) в поровую структуру бетона обычно используется первый закон Фика (1). Однако, поскольку при воздействии на бетон агрессивных компонентов среды происходит изменение его структуры, состава, пористости, реакционной способности и других параметров [18–21], выражение (1) является приблизительным. Изменение состава компонентов бетона и уровня относительной влажности в его глубине будет от-

клоняться от значений диффузии, определяемых законом Фика [22, 23]:

$$J = -D(\partial C)/\partial x, \quad (1)$$

где  $J$  — плотность диффузионного потока массы вещества, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\partial C/\partial x$  — градиент концентрации, кг/(м<sup>3</sup>·м).

Нестационарность диффузионных процессов в бетоне учитывается вторым законом Фика, в котором поток переносимого компонента зависит от времени [24, 25]:

$$\partial C/\partial t = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (2)$$

При интегрировании выражения (2) принимается постоянство во времени концентрации переносимого компонента на поверхности бетона, обозначаемой  $C_s$  ( $C = C_s$  при  $x = 0$  и для любых значений  $t$ ), и коэффициента диффузии  $D$ , а также однородность бетона и отсутствие в нем агрессивных веществ до начала эксплуатации ( $C = 0$  при  $x > 0$  и  $t = 0$ ) и, как следствие, неизменность коэффициента диффузии по толщине бетона.

Основным преимуществом наличия реалистичной модели для моделирования коррозии, вызванной действием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, является не только ее способность исследовать возможное возникновение и прогрессирование повреждений в старых железобетонных конструкциях с недостаточной толщиной бетонного покрытия, но и ее использование в качестве инженерного инструмента в процессе проектирования конструкций.

Моделирование процесса коррозии бетона способствует глубокому изучению закономерностей этого явления, на основе чего становится более точным прогнозирование ожидаемых повреждений и определение долговечности бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Цель исследования — численное моделирование влияния параметров массопереноса (критериев подобия Фурье и Био, коэффициента, учитывающего фазовые характеристики) на интенсивность процесса коррозионного взаимодействия цементного бетона с микробиологической средой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология исследования основана на графическом отображении результатов численного моделирования влияния параметров массопереноса на изменение содержания в бетоне «свободного гидроксида кальция», под которым понимается растворенный в поровой жидкости  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образующийся при твердении бетона в результате гидратации цементных составляющих. При воздействии жидких сред этот компонент вступает в реакцию с агрессивными веществами и выводится из поровой жидкости. Графические зависимости позволяют

наглядно оценить закономерности механизма протекания массообменных процессов.

Диффузионный критерий Фурье  $\text{Fo}_m$  характеризует изменение скорости переноса вещества в твердом теле с течением времени. Критерий Био  $\text{Bi}_m$  отображает соотношение скорости переноса вещества от поверхности раздела фаз в агрессивную среду и скорости массопроводности.

Для прогнозирования влияния биологических сред на срок службы железобетонных изделий и конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах, разработана математическая модель, описывающая процессы массопереноса при биологической коррозии бетона [14, 26, 27]:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \text{Fo}_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad \text{Fo}_m > 0; \quad (3)$$

$$Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)|_{\text{Fo}_m=0} = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0} \Big|_{\tau=0} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\text{Bi}_m} \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(\text{Fo}_m) - Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)] \Big|_{\bar{x}=1}; \quad (6)$$

$$-\frac{\partial Z_{\text{liq}}(\text{Fo}_m)}{\partial \text{Fo}_m} = K_m \cdot \frac{\partial Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1}; \quad (7)$$

$$K_m = \frac{m \cdot S \cdot \delta}{V_{\text{liq}}} \cdot \frac{\rho_{\text{con}}}{\rho_{\text{liq}}} = \frac{m \cdot G_{\text{con}}}{G_{\text{liq}}}, \quad (8)$$

где  $\text{Fo}_m = k\tau/\delta^2$  — массообменный критерий Фурье;  $k$  — коэффициент массопроводности в твердой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  — время, с;  $\delta$  — толщина стенки конструкции, м;  $x$  — координата, м;  $Z(\bar{x}, \text{Fo}_m)$  — безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;  $m$  — константа Генри, кг жидкости/кг бетона;  $C(x, \tau)$  — концентрация «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени  $t$  в произвольной точке с координатой  $x$ , кг  $\text{CaO}$ /кг бетона;  $Z_p(\text{Fo}_m) = (C_0 - C_p)/C_0$  — безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела;  $C_p(\tau)$  — равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг  $\text{CaO}$ /кг бетона;  $\text{Bi}_m = \beta^* \cdot \delta/k$  — массообменный критерий Био;  $\beta^*$  — модифицированный коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с;  $Z_{\text{liq}}(\text{Fo}_m) = (C_0 - mC_{\text{liq}})/C_0$  — безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе;  $K_m$  — коэффициент, учитывающий характеристики фаз;  $\rho_{\text{con}}, \rho_{\text{liq}}$  — плотность бетона и жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $G_{\text{con}}, G_{\text{liq}}$  — массы бетонного резервуара и жидкости, кг;  $C_{\text{liq}}(\tau)$  — концентрация гидроксида кальция в жидкости, кг  $\text{CaO}$ /кг жидкости.

Влияние микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности в этой модели учитывается внутренним источником поглощения или высвобождения массы  $q_v$ , в частности «свободного гидроксида кальция», в бетонном цементном камне (ЦК).

Система уравнений (3)–(7) решалась методом интегральных преобразований Лапласа с переводом в область комплексных чисел и обратно в область оригиналов. Общее решение описывает динамику концентрационных полей в цементном камне:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \times \\ \times Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x}) \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^2 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \times \\ \times \exp(-\mu_m^2 Fo_m);$$

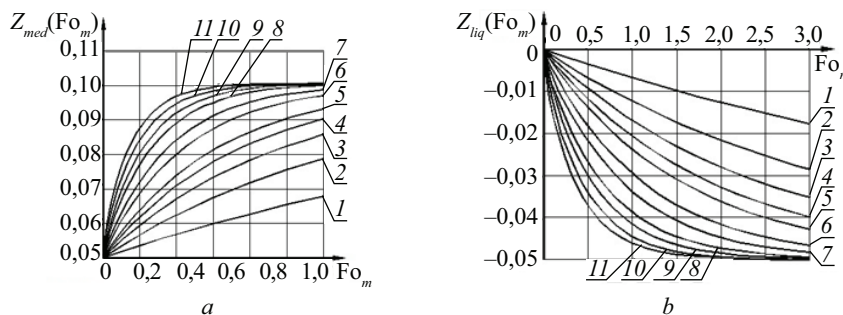
$$\varphi(Bi_m, K_m, \mu_m) = (\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m) \times \\ \times \sin \mu_m - \mu_m \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_m - 1);$$

$$\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m) = [\mu_m^2 (3 + Bi_m) - Bi_m \cdot K_m] \times \\ \times \sin \mu_m + \mu_m [\mu_m^2 - Bi_m (K_m + 2)] \cdot \cos \mu_m;$$

$$tg \mu_m = \frac{\mu_m \cdot Bi_m}{\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m} \text{ — характеристическое уравнение.}$$

Уравнение (13) описывает кинетику массопереноса в жидкой фазе:

$$Z_{liq}(Fo_m) = Z_{liq}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \times Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \times [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] - \\ - 2K_m \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^3 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \times [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1].$$



**Рис. 1.** Изменение средних безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция»  $Z_{med}$  (a) и концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе  $Z_{liq}$  (b) от числа Фурье при  $K_m = 0,5$ ,  $Z_p(0) = 0,15$ , и различных значениях числа Био  $Bi_m$ : 1) 0,1; 2) 0,2; 3) 0,3; 4) 0,4; 5) 0,5; 6) 0,75; 7) 1; 8) 1,5; 9) 2; 10) 3; 11) 5

**Fig. 1.** Change in the average dimensionless concentrations of “free calcium hydroxide”  $Z_{med}$  (a) and the concentration of calcium hydroxide in the liquid phase  $Z_{liq}$  (b) from the Fourier number at  $K_m = 0.5$ ,  $Z_p(0) = 0.15$ , with different values of the Bio number  $Bi_m$ : 1) 0.1; 2) 0.2; 3) 0.3; 4) 0.4; 5) 0.5; 6) 0.75; 7) 1; 8) 1.5; 9) 2; 10) 3; 11) 5

Полученные выражения (9) и (13) в совокупности позволяют рассчитать динамику массопереноса целевого компонента, в частности «свободного гидроксида кальция», из внутренних слоев бетона на границу раздела фаз «жидкая агрессивная среда – бетон», а также кинетику перехода этого компонента через границу раздела фаз и поступления в объем жидкости в железобетонном резервуаре.

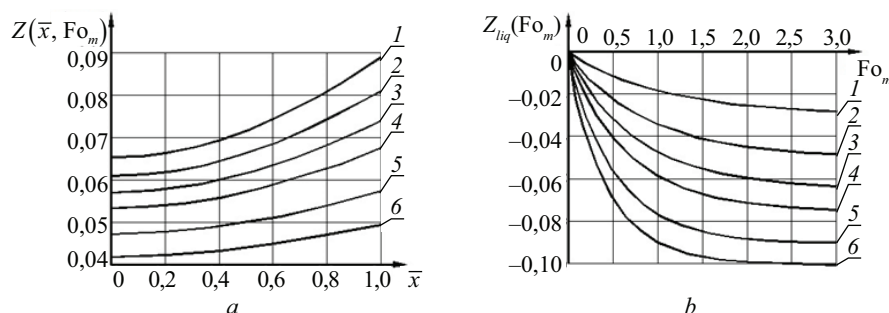
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Степень влияния параметров массопереноса на интенсивность протекания микробиологической коррозии бетона оценивалась с помощью численного моделирования динамики и кинетики массовых процессов в системе. При этом процесс рассматривался в широком диапазоне величин критериев подобия (Фурье и Био) и значений коэффициента, учитывающего характеристики фаз рассматриваемой системы.

На рис. 1 показана интенсивность влияния коэффициента массоотдачи на массообмен. С увеличением значения критерия Био с течением времени процессы массопереноса в системе замедляются интенсивнее, достигаются равновесные значения концентраций гидроксида кальция в поровой жидкости ЦК и агрессивной среде.

Изменение вида линий на рис. 1 с линейного на экспоненциальный с повышением величины критерия Био свидетельствует об изменении механизма и закономерности массопереноса в системе «бетон – биопленка – жидкость». Графические зависимости показывают, что поступление гидроксида кальция в поровую жидкость бетона происходит интенсивнее, чем вывод его в жидкую среду. Равновесные концен-





**Рис. 2.** Профиль безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» при  $Fo_m = 1$  (a); изменение безразмерной концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе  $Z_{liq}$  от числа Фурье при  $Z_p(0) = 0.15$ ,  $B_{im} = 1$  (b) с различными значениями коэффициента, учитывающего характеристики фаз,  $K_m$ : 1) 0,25; 2) 0,5; 3) 0,75; 4) 1; 5) 1,5; 6) 2

**Fig. 2.** The profile of dimensionless concentrations of “free calcium hydroxide” at  $Fo_m = 1$  (a); change in the dimensionless concentration of calcium hydroxide in the liquid phase  $Z_{liq}$  from the Fourier number at  $Z_p(0) = 0.15$ ,  $B_{im} = 1$  (b); with different values of the coefficient taking into account the characteristics of the phases  $K_m$ : 1) 0.25; 2) 0.5; 3) 0.75; 4) 1; 5) 1.5; 6) 2

трации в бетоне достигаются раньше, чем наступает равновесное состояние в жидкой фазе.

Из рис. 2 следует, что массообменные процессы протекают интенсивнее при увеличении значений коэффициента  $K_m$ , т.е. при больших значениях константы Генри или большей массе бетона, при меньшей массе жидкой среды. При значении числа Фурье, равном 1, с повышением величины коэффициента  $K_m$  в бетоне происходит снижение концентрации гидроксида кальция, о чем свидетельствует значительное уменьшение наклона линий на рис. 2, а. В жидкости при аналогичных параметрах наблюдается накопление выводимого компонента, а усиление прогиба кривых говорит о приведении системы к равновесному состоянию.

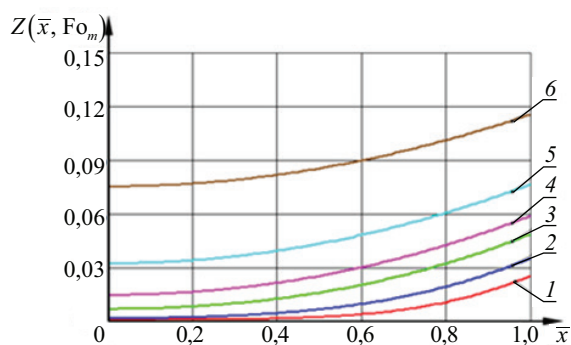
Отрицательные значения на шкале средней концентрации на рис. 1, b и рис. 2, b связаны с выводом гидроксида кальция из бетона в жидкость.

Результаты численного моделирования динамики массопереноса по толщине бетона представлены

на рис. 3–5. Определение различий в механизме массопереноса проводилось при трех значениях числа Био. Когда критерий Био равен 0,1 (рис. 3), внутренняя диффузия гидроксида кальция в бетоне лимитирует процессы переноса в рассматриваемой системе. На рис. 4 критерий Био равен 1, т.е. процесс ограничен внутренней диффузией и внешним массопереносом «свободного гидроксида кальция». Числу Био, равному 2, соответствует механизм внешнего массопереноса гидроксида кальция из бетона в жидкость (рис. 5).

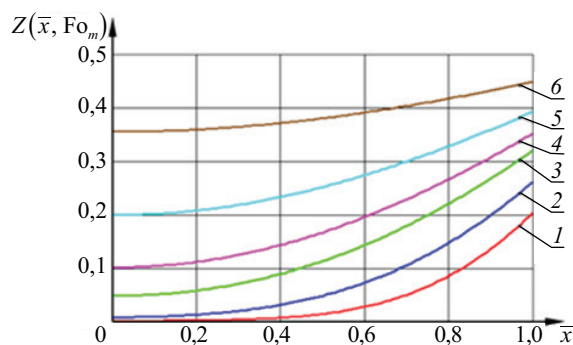
Из рис. 3 следует, что при малых значениях числа Био его влияние на интенсивность массопереноса в ЦК бетона незначительно, поскольку профили концентраций переносимого компонента сохраняют свой вид. С течением времени происходит накопление гидроксида кальция в поровой жидкости бетона, но без ускорения процесса.

С повышением значений числа Био (рис. 4, 5) наблюдается замедление массопереноса с течением времени, изгиб профилей концентраций уменьшает-



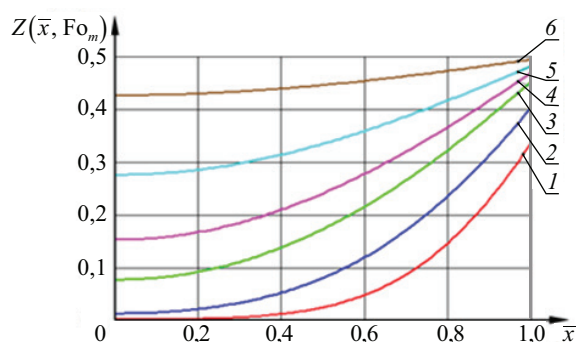
**Рис. 3.** Изменение безразмерных концентраций  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  по толщине бетонной конструкции при значении числа Био, равном 0,1, и числах Фурье: 1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,5; 6) 1;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

**Fig. 3.** Change in dimensionless concentrations  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  along the thickness of the concrete structure at the value of the Bio mass transfer number is 0.1 and Fourier numbers: 1) 0.05; 2) 0.1; 3) 0.2; 4) 0.3; 5) 0.5; 6) 1;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$



**Рис. 4.** Изменение безразмерных концентраций  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  по толщине бетонной конструкции при значении числа Био, равном 1, и числах Фурье: 1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,5; 6) 1;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

**Fig. 4.** Change in dimensionless concentrations  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  along the thickness of the concrete structure at the value of the Bio mass transfer number is 1 and Fourier numbers: 1) 0.05; 2) 0.1; 3) 0.2; 4) 0.3; 5) 0.5; 6) 1;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

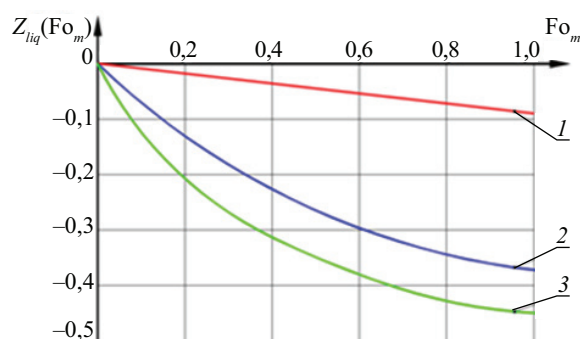


**Рис. 5.** Изменение безразмерных концентраций  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  по толщине бетонной конструкции при значении числа Био, равном 2, и числах Фурье: 1) 0,05; 2) 0,1; 3) 0,2; 4) 0,3; 5) 0,5; 6) 1;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

**Fig. 5.** Change in dimensionless concentrations  $Z(\bar{x}, Fo_m)$  along the thickness of the concrete structure at the value of the Bio mass transfer number is 2 and Fourier numbers: 1) 0.05; 2) 0.1; 3) 0.2; 4) 0.3; 5) 0.5; 6) 1;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

ся, линии постепенно принимают вид прямой (линия 6). Однако достигаемые значения концентраций повышаются, значит, в целом поступление гидроксида кальция из структуры ЦК в поровую жидкость происходит интенсивнее.

Рис. 6 иллюстрирует влияние значений критерия подобия на изменение безразмерной концентрации «свободного гидроксида кальция» в жидкой фазе. Из рис. 6 можно сделать вывод, что в диапазоне значений числа Фурье от 0 до 1 в системе происходят наиболее интенсивные изменения, затем изменение концентрации в жидкой фазе достигает плато. Повышение величины критерия Био хоть и приводит к интенсификации поступления гидроксида кальция из бетона в жидкую среду, обуславливает более быстрое установление равновесной концентрации. Это коррелирует с данными, представленными линиями 6 на рис. 4, 5.



**Рис. 6.** Изменение безразмерных концентраций гидроксида кальция в жидкой фазе при значении массообменного числа Био: 1) 0,1; 2) 1; 3) 2;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

**Fig. 6.** Change of dimensionless concentrations of calcium hydroxide in the liquid phase at a value of the mass transfer number of Bio: 1) 0.1; 2) 1; 3) 2;  $K_m = 1$ ;  $Z_p(0) = 1$

Уровень развития компьютерных технологий позволяет получать математические модели сложных физико-химических процессов, в том числе характеризующих разрушение объектов под воздействием факторов внешней среды. Изучение таких моделей дает возможность в полной мере отразить основные процессы, происходящие при разрушении реального объекта, лучше понять природу явлений.

Построенные графические зависимости (рис. 1) демонстрируют линеинное изменение средней концентрации гидроксида кальция по толщине бетона при значениях числа Био до 0,5. Увеличение в 2–3 раза критерия Био оказывает сильное влияние на изменение градиента концентраций переносимого компонента в области малых значений. В области больших значений аналогичное увеличение числа Био не имеет такого же влияния на величину концентрации гидроксида кальция.

Содержание гидроксида кальция в поровом пространстве определяет стабильность основных компонентов ЦК, а его недостаток в поровом пространстве приводит к развитию коррозионных процессов. В результате воздействия микробиологической среды на бетон вещества взаимодействуют со «свободным гидроксидом кальция» в поровой жидкости ЦК, в результате чего усиливается процесс подачи  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в зону контакта бетона с агрессивной средой.

Полученные зависимости (рис. 1, 2) могут быть использованы для определения содержания гидроксида кальция в бетоне из экспериментальных данных. Это позволяет прогнозировать долговечность и надежность строительных конструкций с минимальной погрешностью.

При малых значениях числа Фурье коэффициент массопереноса, а следовательно, и критерий Био, который им определяется, имеют значительное влияние на динамику массопереноса (рис. 3–5).

Очевидна корреляция полученных в ходе численного моделирования графических зависимостей с представлениями о механизмах массообменных процессов в бетоне при микробиологической коррозии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Математическое моделирование коррозии бетона является важным инструментом обеспечения и повышения долговечности изделий и сооружений. С помощью моделирования устанавливается вероятность возникновения повреждений бетона. Это позволяет своевременно назначать и применять средства защиты от коррозии бетонных изделий.

С помощью полученного решения задачи массопереноса возможно проводить расчет градиентов концентраций гидроксида кальция в бетоне в разные моменты срока службы изделия. Определяемые таким образом значения содержаний переносимого компонента дают возможность установить временные интервалы начала разложения высокоосновных

составляющих ЦК и определить сроки для выполнения мер по восстановлению и защите бетона.

Математическое описание интенсивности процессов коррозии бетона под воздействием микробиологической среды способствует более глубокому пониманию причин коррозии и служит основой для дальнейшей разработки единой количественной теории коррозии бетона и железобетона, позволяющей в соответствии с современными требованиями

прогнозировать долговечность изделий и конструкций, эксплуатируемых в средах различной степени агрессивности.

Рассмотрен простой и интересный случай биодegradации бетона, когда все изменения происходят в ограниченном объеме. Более сложные варианты массопереноса в бетоне при микробиологической коррозии будут исследованы в следующих работах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang C., Roy A., Silberschmidt V.V., Chen Z. Modelling of damage evolution in braided composites: recent developments // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017. Vol. 3. Issue 1. DOI: 10.1186/s40759-017-0030-4

2. Gawin D., Koniorczyk M., Pesavento F. Modeling of hydro-thermo-chemo-mechanical phenomena in building materials // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013. Vol. 61. Issue 1. Pp. 51–63. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0004

3. Варламов А.А., Теличенко В.И., Римишин В.И. Модели материалов по теории деградации // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 4 (382). С. 59–65. EDN TRYMNG.

4. Kayumov R., Sulejmanov A., Strakhov D. Model of degradation of composite materials of building structure's load-bearing elements // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Pp. 239–249. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8\_26

5. Zhao L., Qin T., Zhang J., Chen Y. 3D gradual material degradation model for progressive damage analyses of unidirectional composite materials // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–11. DOI: 10.1155/2015/145629

6. Kaźmierczak H. The dynamic characteristics of mechanical structures destruction // *Journal of Vibroengineering*. 2016. Vol. 18. Issue 8. Pp. 5230–5238. DOI: 10.21595/jve.2016.17717

7. Jia Y., Liu G., Gao Y., Pei J., Zhao Y., Zhang J. Degradation reliability modeling of stabilized base course materials based on a modulus decrement process // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 177. Pp. 303–313. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.129

8. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Обобщенные модели долговечности и их применение для решения задач прогнозирования определяющих характеристик композитов // *Механика композитных материалов*. 2022. Т. 58. № 3. С. 505–520. DOI: 10.22364/mkm.58.3.03. EDN BZFLLD.

9. Петров В.В., Мищенко Р.В., Пименов Д.А., Горбачева О.А. Математическое моделирование долговечности тонкостенных пространственных кон-

струкций, взаимодействующих с агрессивной средой // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 6 (9). С. 14–30. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10052. EDN ASQBRG.

10. Васильев А.А., Долomanюк Р.Ю., Дашкевич С.В. Модель прогнозирования долговечности железобетонных пролетных строений мостов // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт*. 2018. № 1 (36). С. 121–123. EDN YWIIICL.

11. Bastidas-Arteaga E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-018-0235-x

12. German M., Pamin J. Numerical simulation of non-uniformly distributed corrosion in reinforced concrete cross-section // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 14. P. 3975. DOI: 10.3390/ma14143975

13. Shodja H.M., Kiani K., Hashemian A. A model for the evolution of concrete deterioration due to reinforcement corrosion // *Mathematical and Computer Modelling*. 2010. Vol. 52. Issue 9–10. Pp. 1403–1422. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.05.023

14. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Особенности биодegradации гидротехнических бетонов // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. № 1. С. 45–55. EDN UPWQJY.

15. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В. Методы математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах : монография. М. : Изд-во АСВ, 2021. 244 с. EDN QRKKFL.

16. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Манохина Ю.В., Шестеркин М.Е. Особенности математического моделирования массопереноса при коррозии бетона второго вида. Решение для малых чисел Фурье // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 11–13. EDN OYDWYN.

17. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 7 (83). Pp. 198–207. DOI: 10.18720/MCE.83.18. EDN SIZQZP.



18. AL-Ameeri A.S., Rafiq M.I., Tsioulou O. Influence of carbonation on the resistance of concrete structures to chloride penetration and corrosion // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 289. P. 08001. DOI: 10.1051/mateconf/201928908001
19. Wan X., Wittmann F.H., Zhao T., Fan H. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation // Journal of Zhejiang University SCIENCE A. 2013. Vol. 14. Issue 1. Pp. 71–78. DOI: 10.1631/jzus.A1200187
20. Pu Q., Jiang L., Xu J., Chu H., Xu Y., Zhang Y. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 28. Issue 1. Pp. 519–524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.09.006
21. Баженов Ю.М. Технология бетона : учебник. М. : Изд-во АСВ, 2011. 524 с.
22. Makhlof A.S.H., Aliofkhaezrai M. Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2015. 470 p.
23. Nevares I., del Alamo-Sanza M. Characterization of the oxygen transmission rate of new-ancient natural

- materials for wine maturation containers // Foods. 2021. Vol. 10. Issue 1. P. 140. DOI: 10.3390/foods10010140
24. Степанова В.Ф. Долговечность бетона. Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 124 с. EDN FRCPMF.
25. Ali W., Urgessa G. Computational model for internal relative humidity distributions in Concrete // Journal of Computational Engineering. 2014. Vol. 2014. Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2014/539850
26. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A. Mathematical model of mass transfer processes in biological corrosion of cement concretes // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 5. P. 052059. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052059
27. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Математическое моделирование массопереноса в системе цементный бетон – жидкая среда, лимитируемого внутренней диффузией переносимого компонента при жидкостной коррозии первого вида // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 4–9. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-793-7-4-9. EDN LEJMD.

Поступила в редакцию 3 декабря 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 января 2024 г.

Одобрена для публикации 8 февраля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор кафедры технологий и организации строительного производства, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

**Борис Евгеньевич Нармания** — аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 932757, Scopus: 57215532142, ResearcherID: HKP-1695-2023, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Wang C., Roy A., Silberschmidt V.V., Chen Z. Modelling of damage evolution in braided composites: recent developments. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*. 2017; 3(1). DOI: 10.1186/s40759-017-0030-4
2. Gawin D., Koniorczyk M., Pesavento F. Modeling of hydro-thermo-chemo-mechanical phenomena in building materials. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2013; 61(1):51-63. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0004
3. Varlamov A.A., Telichenko V.I., Rimshin V.I. Models materials in the theory of degradation. *Textile Industry Technology (Series: "Proceedings of Higher*

- Educational Institutions")*. 2019; 4(382):59-65. EDN TRYMNG. (rus.).
4. Kayumov R., Sulejmanov A., Strakhov D. Model of degradation of composite materials of building structure's load-bearing elements. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 239-249. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8\_26
5. Zhao L., Qin T., Zhang J., Chen Y. 3D gradual material degradation model for progressive damage analyses of unidirectional composite materials. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015; 2015:1-11. DOI: 10.1155/2015/145629
6. Kaźmierczak H. The dynamic characteristics of mechanical structures destruction. *Journal of Vibro-*



engineering. 2016; 18(8):5230-5238. DOI: 10.21595/jve.2016.17717

7. Jia Y., Liu G., Gao Y., Pei J., Zhao Y., Zhang J. Degradation reliability modeling of stabilized base course materials based on a modulus decrement process. *Construction and Building Materials*. 2018; 177:303-313. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.129

8. Gusev E.L., Bakulin V.N. Generalized durability models and their application to solving problems on predicting the defining characteristics of composites. *Mechanics of Composite Materials*. 2022; 58(3):505-520. DOI: 10.22364/mkm.58.3.03. EDN BZFLLD. (rus.).

9. Petrov V.V., Mishchenko R.V., Pimenov D.A., Gorbacheva O.A. Mathematical modeling of longevity thin-walled spatial constructions interacting with the aggressive environment. *Expert: Theory and Practice*. 2020; 6(9):14-30. DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10052. EDN ASQBRG. (rus.).

10. Vasilyev A.A., Dolomanjuk R.Yu., Dashkevich S.V. Model of prediction of longevity of reinforce-concrete flight structures of bridges and overpasses. *Bulletin of BSUT: Science and Transport*. 2018; 1(36):121-123. EDN YWIICL. (rus.).

11. Bastidas-Arteaga E. Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018; 12(1). DOI: 10.1186/s40069-018-0235-x

12. German M., Pamin J. Numerical simulation of non-uniformly distributed corrosion in reinforced concrete cross-section. *Materials*. 2021; 14(14):3975. DOI: 10.3390/ma14143975

13. Shodja H.M., Kiani K., Hashemian A. A model for the evolution of concrete deterioration due to reinforcement corrosion. *Mathematical and Computer Modelling*. 2010; 52(9-10):1403-1422. DOI: 10.1016/j.mcm.2010.05.023

14. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Loginova S.A. Biodegradation of hydrotechnical concrete. *Smart Composites in Construction*. 2020; 1(1):45-55. EDN UPWQJY. (rus.).

15. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V. *Methods of mathematical physics in applications to the problems of concrete corrosion in liquid aggressive media : monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2021; 244. EDN QRKKFL. (rus.).

16. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Kasyanenko N.S., Manohina Yu.V., Shestorkin M.E. Features of mathematical modeling of mass transfer during corrosion of concrete of the second type. Solution for small

Fourier numbers. *Construction Materials*. 2012; 3:11-13. EDN OYDWYH. (rus.).

17. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 7(83):198-207. DOI: 10.18720/MCE.83.18. EDN SIZQZP.

18. AL-Ameeri A.S., Rafiq M.I., Tsioulou O. Influence of carbonation on the resistance of concrete structures to chloride penetration and corrosion. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 289:08001. DOI: 10.1051/mateconf/201928908001

19. Wan X., Wittmann F.H., Zhao T., Fan H. Chloride content and pH value in the pore solution of concrete under carbonation. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2013; 14(1):71-78. DOI: 10.1631/jzus.A1200187

20. Pu Q., Jiang L., Xu J., Chu H., Xu Y., Zhang Y. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. *Construction and Building Materials*. 2012; 28(1):519-524. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.09.006

21. Bazhenov Yu.M. *Technology of concrete : textbook*. Moscow, ASV Publ., 2011; 524. (rus.).

22. Makhlof A.S.H., Aliofkhazraei M. *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals, Concrete and Power Industries*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2015; 470.

23. Nevares I., del Alamo-Sanza M. Characterization of the oxygen transmission rate of new-ancient natural materials for wine maturation containers. *Foods*. 2021; 10(1):140. DOI: 10.3390/foods10010140

24. Stepanova V.F. *Durability of concrete*. Vologda, Infra-Inzheneriya, 2023; 124. EDN FRCPMF. (rus.).

25. Ali W., Urgessa G. Computational Model for internal relative humidity distributions in concrete. *Journal of Computational Engineering*. 2014; 2014:1-7. DOI: 10.1155/2014/539850

26. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Loginova S.A. Mathematical model of mass transfer processes in biological corrosion of cement concretes. *IOP Conference Series : materials Science and Engineering*. 2020; 869(5):052059. DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052059

27. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Mathematical modeling of mass transfer in the "cement concrete-liquid medium" system, limited by the internal diffusion of the transferred component at liquid corrosion of the first type. *Construction Materials*. 2021; 7:4-9. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-793-7-4-9. EDN LEJMD. (rus.).

Received December 3, 2023.

Adopted in revised form on January 20, 2024.

Approved for publication on February 8, 2024.

**B I O N O T E S:** **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Academician of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 105900, Scopus: 7005670404, Researcher ID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

**Boris E. Narmaniya** — postgraduate student of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 932757, Scopus: 57215532142, ResearcherID: HKP-1695-2023, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*