

Научная статья

УДК 66.021.3

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-3-102-4>

© Варвара Евгеньевна Румянцева¹, Светлана Андреевна Логинова^{2✉},
Наталья Евгеньевна Карцева³, 2021

^{1, 2, 3}Ивановский государственный политехнический университет,
Иваново, Россия,

¹varrym@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>

²sl79066171227@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>

³nata09031997@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8484-0204>

© Varvara E. Rumyantseva¹, Svetlana A. Loginova^{2✉},
Natalia E. Kartseva³, 2021

^{1, 2, 3}Ivanovo State Polytechnic University,
Ivanovo, Russia,

¹varrym@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>

²sl79066171227@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>

³nata09031997@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8484-0204>

Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах

Аннотация. В водной среде биокоррозия является важным фактором, влияющим на надежность и долговечность бетонных конструкций. Разрушение цементных бетонов при биологической коррозии определяется процессами массопереноса. В статье представлено построение расчетной математической модели жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом биогенного фактора. Впервые рассмотрена модель массопереноса в неограниченной двухслойной пластине в виде дифференциальных уравнений параболического типа в частных производных с граничными условиями второго рода на границе бетона с жидкостью и четвертого рода на границе бетона с биопленкой. Представлены результаты численного эксперимента с целью изучения влияния коэффициентов массопроводности и массоотдачи на кинетику и динамику процесса.

Ключевые слова: бетон, биокоррозия, математическая модель, массоперенос, гидроксид кальция, микроорганизмы, биоповреждение.

Mathematical modeling of concrete structure corrosion in biologically aggressive environments

Abstract. In the aquatic environment, biocorrosion is an important factor affecting the reliability and durability of concrete structures. The destruction of cement concretes during biological corrosion is determined by the processes of mass transfer. The article presents the development of a calculated mathematical model of liquid corrosion in cement concrete, taking into account the biogenic factor. For the first time, a model of mass transfer in an unbounded two-layer plate is considered in the form of differential equations of parabolic type in partial derivatives with boundary conditions of the second kind at the interface between concrete and liquid and of the fourth kind at the interface between concrete and biofilm. The results of a numerical experiment are presented to study the

influence of the coefficients of mass conductivity and mass transfer on the kinetics and dynamics of the process.

Keywords: concrete, biocorrosion, mathematical model, mass transfer, calcium hydroxide, microorganisms, biodeterioration.

Введение

Анализ литературных источников¹ показал, что на сегодняшний день уже сформирована обширная база научных данных о коррозионных процессах, протекающих в бетонах: исследованы основные закономерности химических реакций; предложено математическое описание некоторых процессов коррозии; создана система нормативных документов по антикоррозионной защите. Однако процесс биодegradации бетона остается малоизученной проблемой как в России, так и за рубежом². Математические модели для прогнозирования долговечности бетонных конструкций, подверженных биологической коррозии, отсутствуют³. Биоповреждению подвержены все подземные и наземные сооружения, оборудование нефтяной и авиационной промышленности, трубопроводы при контакте с почвой и водными средами и т. д.⁴ За-

¹ Степанова В. Ф. Долговечность бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. – 126 с.; Семенов С. А., Гумаргалиева К. З., Калинина И. Г., Заиков Г. Е. Био-разрушения материалов и изделий техники // Вестник МИТХТ. – 2007. – Т. 2. – № 6. – С. 3–26; Василенко М. И., Гончарова Е. Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4. – Ч. 4. – С. 886–891; Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1. – С. 61–66; Ерофеев В. Т., Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – Ч. 4. – С. 708–716.

² Семенов С. А., Гумаргалиева К. З., Калинина И. Г., Заиков Г. Е. Био-разрушения материалов и изделий техники // Вестник МИТХТ. – 2007. – Т. 2. – № 6. – С. 3–26; Ерофеев В. Т., Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – Ч. 4. – С. 708–716; Василенко М. И., Гончарова Е. Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4. – Ч. 4. – С. 886–891; Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1. – С. 61–66; Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 75–83.

³ Ерофеев В. Т., Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – Ч. 4. – С. 708–716; Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1. – С. 61–66.

⁴ Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1. – С. 61–66.

щита нефтяных и газовых платформ – одна из ключевых проблем, с которыми ежедневно сталкиваются все страны мира (см. рис. 1).



Рис. 1. Нефтяные платформы на железобетонных опорах

При биокоррозии на границах бетонной конструкции возникают условия, отличающиеся от условий, вызывающих коррозию I, II и III видов (по классификации В. М. Москвина). Исходная система определяющих уравнений должна быть совместимой с уравнениями моделей сопутствующих процессов (непрерывное зарождение, рост, гибель микроорганизмов). Условно кривая роста микроорганизмов представлена на рис. 2.



Рис. 2. Кривая роста микроорганизмов

Исследования в области микробного воздействия на бетон¹ показали, что к микроорганизмам, наиболее часто участвующим в биоразрушении бетона, относятся бактерии, цианобактерии, микромицеты. Их рост и развитие зависит от состава, пористости, водопроницаемости материала, являющегося субстратом, а также от условий окружающей среды. На рис. 2 отчетливо видны четыре условные фазы роста любой реальной популяции микроорганизмов. Лаг-фаза соответствует периоду адаптации микроорганизмов к новой среде обитания, поэтому она характеризуется низкими показателями роста популяции. Для временного интервала, охватываемого ло-

¹ Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № S1. – С. 61–66; Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 75–83.

гарифмической (экспоненциальной) фазой, свойственна максимальная скорость роста микроорганизмов (кривая роста – прямая). Временной период удвоения количества клеток для разных микроорганизмов неодинаков: для бактериальных клеток он составляет 0,3–1 ч, для микромицетов – 1–2 ч¹. Далее рост популяции микроорганизмов замедляется, переходя в стационарную фазу, при которой его скорость становится равной нулю. В этот период образование новых микроорганизмов постепенно прекращается. В то же время непрерывно протекает процесс гибели других микроорганизмов. Переход к данной фазе обусловливается истощением питательных веществ и накоплением продуктов метаболизма, что приводит к изменению pH и температуры среды; таким образом, создаются неблагоприятные условия для роста микроорганизмов. Последняя фаза (фаза замедления роста) характеризуется высокими показателями гибели микроорганизмов и полным прекращением их размножения.

Опасность биокоррозии заключается в том, что микроорганизмы интенсивно размножаются, легко адаптируясь к меняющимся физико-химическим условиям среды. Установлено, что некоторые виды грибов (например, *Aspergillus* и *Alternaria*) обладают радиационной стойкостью и могут активно колонизировать бетонные поверхности даже при сильном радиоактивном загрязнении (что и произошло после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г.²).

Как известно, большая часть биологической активности протекает на поверхности бетона. Исследователями отмечается логарифмическое уменьшение микробных популяций на большей глубине бетона, связанное с ограниченным поступлением сероводорода и кислорода³.

Основная часть

В качестве экспериментальных образцов использовались кубы с гранью 0,03 м, изготовленные из портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. На 29-ые сутки (условия твердения: температура 20 +/- 2 °С при относительной влажности воздуха 50–70 % по ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний») образцы заражали суспензиями микроорганизмов (*Aspergillus niger* van Tieghem, *Bacillus subtilis*) и выдерживали в условиях, оптимальных для их роста и развития, в течение 28 суток. Далее экспериментальные образцы погружали в дистиллированную воду (pH=6,6) объемом 1000 см³.

На рис. 3 представлена иллюстрация физической модели процесса массопереноса «свободного» Ca(OH)₂ (по терминологии академика РААСН С. В. Федосова) из твердой фазы (бетона) в жидкую (воду) с учетом биообрастания.

¹ Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 75–83.

² Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № S1. – С. 61–66.

³ Там же.

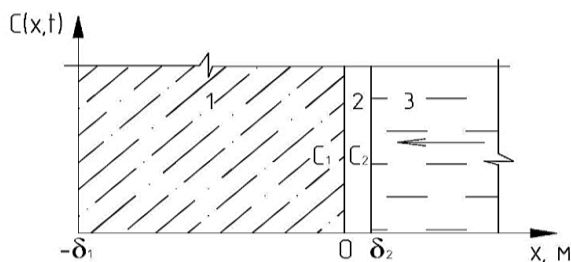


Рис. 3. Иллюстрация модели биообращения бетонной конструкции:

1 – бетон; 2 – биопленка; 3 – жидкость

Система «цементный бетон – биопленка – жидкость» реализована посредством двух находящихся в контакте неограниченных пластин. Бетон толщиной δ_1 с правой стороны покрыт биопленкой толщиной δ_2 (см. рис. 3). Задача сводится к определению изменения концентрации «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ во времени (τ) по толщине конструкции (x).

Физико-математическая модель массопереноса в полуограниченной двухслойной пластине может быть представлена в виде дифференциальных уравнений с граничными условиями второго рода на границе бетона с жидкостью и четвертого рода на границе бетона с биопленкой:

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad -\delta_1 \leq x \leq 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \cdot \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (2)$$

где $C_1(x, \tau)$ – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на CaO в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг $\text{CaO}/\text{кг}$ бетона; $C_2(x, \tau)$ – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на CaO в биопленке в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг $\text{CaO}/\text{кг}$ биомассы; $k_{1,2}$ – коэффициенты массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; δ_1 – толщина бетонной конструкции, м; δ_2 – толщина биопленки, м.

Начальные условия:

$$C_1(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = C_1(x, 0) = C_{1,0}, \quad (3)$$

$$C_2(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = C_2(x, 0) = C_{2,0}, \quad (4)$$

где $C_{1,0}$ – начальная концентрация «свободного CaO », кг $\text{CaO}/\text{кг}$ бетона; $C_{2,0}$ – начальная концентрация «свободного CaO », кг $\text{CaO}/\text{кг}$ биомассы.

Граничные условия:

– левая граница бетонной опоры:

$$\left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_1} = 0; \quad (5)$$

– в месте контакта бетона и биопленки (равновесие в системе подчиняется закону Генри):

$$C_1(x, \tau)|_{x=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{x=0}, \quad (6)$$

где m – константа равновесия Генри, кг биопленки/кг бетона;

$$-\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot \left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\rho_{\text{биом}} \cdot k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{бет}}$, $\rho_{\text{биом}}$ – плотности бетона и биомассы, кг/м³;

– на границе «биопленка–жидкость»:

$$-k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{\delta_2}{\delta_1}} = q_n(\tau), \quad (8)$$

где $q_n(\tau)$ – плотность потока массы, уходящей от биопленки в поток жидкости.

Система уравнений (1)–(2) носит линейный характер, коэффициенты массопроводности, в общем случае являющиеся переменными и зависящими от концентрации величинами, вынесены за знаки математических операторов дифференцирования. При использовании зонального метода расчета весь процесс делится на определенное число n элементарных микропроцессов, в пределах каждого из которых подразумевается постоянство коэффициентов массопроводности. Таким образом, нелинейная задача массопереноса сводится к совокупности n линейных задач.

Поскольку на левой границе бетонной опоры поток вещества отсутствует, граничное условие (5) представлено условием второго рода. Граничные условия (6) и (7) являются условиями четвертого рода и иллюстрируют тот факт, что в месте контакта пластин концентрация «свободного» гидроксида кальция на каждой из них одинакова, а также совпадают плотности потоков массы.

Для решения системы (1)–(8) применялся метод интегральных преобразований Лапласа¹. Далее исходная система уравнений была переведена в область комплекс-

¹ Румянцева В. Е., Гоглев И. Н., Логинова С. А. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 15 (67). – С. 51–58; Чеснокова Т. В., Румянцева В. Е., Логинова С. А. Моделирование процесса биоразрушения бетона на предприятиях текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 1 (385). – С. 206–212; Строкин К. Б., Новиков Д. Г., Коновалова В. С., Логинова С. А., Нармания Б. Е. Определение ресурса безопасности эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии // Современные проблемы гражданской защиты. – 2020. – № 4 (37). – С. 62–69.

ных чисел, в рамках которой система получила решение, далее переведенное в область оригиналов. Общее решение задачи массопроводности имеет следующий вид¹:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NK_i^* \left[Fo_m + \frac{(1 - \bar{x})^2}{2} + \phi(K_k, N, K_\delta) \right] \right\} +$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \psi_1'(\mu_n)} (\mu_n \sin \mu_n \left[\cos(\mu_n \bar{x}) \cos(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) - \right.$$

$$\left. \sqrt{K_k} K_\delta \sin(\mu_n \bar{x}) \sin(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) \right] -$$

$$- \frac{N}{\sqrt{K_k}} \cos(\mu_n (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_n^2 Fo_m);$$

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} (1 - NK_\delta + Ki_H^* [\bar{x} - Fo_m K_k K_\delta] +$$

$$NK_i^* (\phi(K_k, N, K_\delta) - \frac{1 + K_k \bar{x}^2}{2}) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_m^2 \psi_1'(\mu_m)}$$

$$(\mu_m \sin \mu_m \cos[\mu_m \sqrt{K_k} (K_\delta - \bar{x})] - \frac{\mu_m}{\sqrt{K_k}} \sin(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta)$$

$$\left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] +$$

$$+ Ki_H^* \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right]$$

$$\exp(-\mu_m^2 K_k Fo_m),$$

где μ_m – корни характеристического уравнения;

$$\phi(K_k, N, K_\delta) = \frac{1 + K_k K_\delta (3K_\delta + 3N + NK_k K_\delta^2)}{6 (1 + NK_k K_\delta)},$$

$$J = \int_0^1 Z_{1,0}(\xi) \cos[\mu_m (1 - \xi)] d\xi,$$

$$\operatorname{tg} \mu_m = N \sqrt{K_k} \operatorname{tg}(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta),$$

где $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона; $Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине биопленки; $\bar{x} = x / \delta_1$ – безразмерная координата; $K_k = k_2 / k_1$; $K_\delta = \delta_2 / \delta_1$; q_H – плотность потока массы, уходящей от биопленки в поток жидкости; m –

¹ Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – № 99 (7). – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/j21-202.pdf/download/j21-202.pdf> (дата обращения: 20.12.2020).

константа Генри, кг биопленки/кг бетона; $N = (\rho_{\text{биом}} \cdot k_2) / (\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot m)$ – коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $Fo_m = (k_1 \cdot \tau) / \delta_1^2$ – критерий Фурье;

$$Ki_H^* = \frac{q_H \cdot \rho_{\text{бет}} \cdot m \cdot K_\delta}{\delta_2 \cdot \rho_{\text{биом}} \cdot k_2 \cdot C_0} \text{ – массообменный критерий Кирпичева.}$$

Выводы

Представленные решения задачи массопереноса (выражения (9)–(11)) позволяют определять значения концентрации «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине бетонной конструкции и биопленки для любого момента времени, а также дают возможность рассчитать кинетику процесса в жидкой фазе, что в конечном итоге позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать устойчивость бетонных конструкций к биодegradации¹. Результаты расчетов по полученным выражениям приведены на рис. 4, 5². Рис. 4 иллюстрирует зависимость безразмерных концентраций от массообменного критерия Кирпичева. При увеличении данного массообменного критерия появляются большие градиенты концентраций.

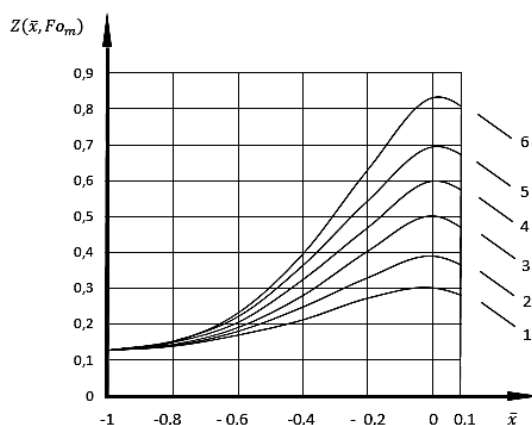


Рис. 4. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при $K_k = 1$; $K_\delta = 0,1$; $N = 1$, Ki_H^* : 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2; 5 – 2,5; 6 – 3

¹ Селяев В. П., Неверов В. А., Селяев П. В., Сорокин Е. В., Юдина О. А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 1. – С. 41–52.

² Чеснокова Т. В., Румянцева В. Е., Логинова С. А. Изучение грибковой коррозии бетона с помощью модельной среды // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2019. – № 3 (59). – С. 85–89; Федосов С. В., Румянцева В. Е., Красильников И. В., Логинова С. А. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах // Строительные материалы. – 2017. – № 12. – С. 52–57.

На рис. 5 представлены результаты расчета для различных чисел коэффициента N , учитывающего характеристики фаз. Из рис. 5 видно, что с увеличением N динамика и кинетика процесса увеличиваются.

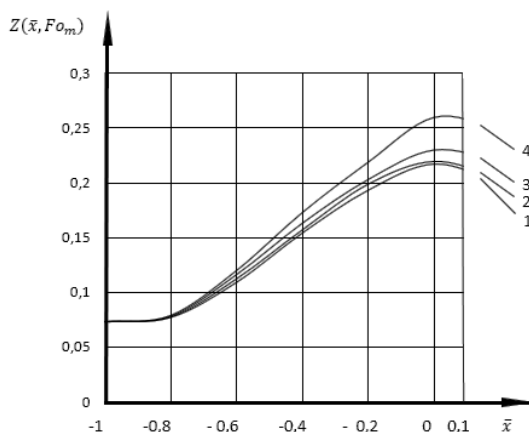


Рис. 5. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и био пленки при $K_k = 1$; $K_\delta = 0,1$; $F_{om} = 1$; $K_{IH}^* = 0,5$; N : 1 – 0,01; 2 – 0,05; 3 – 0,1; 4 – 0,5

Таким образом, мониторинг технического состояния конструкций, прогнозирование их долговечности и надежности возможны только на основании соответствующих методов расчета, позволяющих выполнять необходимые количественные оценки с надлежащей точностью.

Список литературы

Беллендир Л. Э., Власов Д. Ю., Дурчева В. Н., Царовцева И. М. Роль биофактора в коррозии металлических и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № S1. – С. 61–66.

Василенко М. И., Гончарова Е. Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 4. – Ч. 4. – С. 886–891.

Ерофеев В. Т., Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12. – Ч. 4. – С. 708–716.

Румянцева В. Е., Гоглев И. Н., Логинова С. А. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2019. – № 15 (67). – С. 51–58.

Селяев В. П., Неверов В. А., Селяев П. В., Сорокин Е. В., Юдина О. А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона // *Инженерно-строительный журнал*. – 2014. – № 1. – С. 41–52.

Семенов С. А., Гумаргалиева К. З., Калинина И. Г., Заиков Г. Е. Био-разрушения материалов и изделий техники // *Вестник МИТХТ*. – 2007. – Т. 2. – № 6. – С. 3–26.

Степанова В. Ф. Долговечность бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. – 126 с.

Строкин К. Б., Новиков Д. Г., Коновалова В. С., Логинова С. А., Нармания Б. Е. Определение ресурса безопасности эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии // Современные проблемы гражданской защиты. – 2020. – № 4 (37). – С. 62–69.

Федосов С. В., Румянцева В. Е., Красильников И. В., Логинова С. А. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах // Строительные материалы. – 2017. – № 12. – С. 52–57.

Чеснокова Т. В., Румянцева В. Е., Логинова С. А. Изучение грибковой коррозии бетона с помощью модельной среды // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2019. – № 3 (59). – С. 85–89.

Чеснокова Т. В., Румянцева В. Е., Логинова С. А. Моделирование процесса биоразрушения бетона на предприятиях текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 1 (385). – С. 206–212.

Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 75–83.

Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – № 99 (7). – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/j21-202.pdf/download/j21-202.pdf> (дата обращения: 20.12.2020).

References

Bellendir L. E., Vlasov D. Iu., Durbcheva V. N., Tsarovtseva I. M. Rol' biofaktora v korrozii metallicheskih i zhelezobetonnykh konstruksii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Biofactor role in corrosion of metal and steel concrete structures of hydraulic engineering constructions]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2015, no. S1, pp. 61–66.

Vasilenko M. I., Goncharova E. N. Mikrobiologicheskie osobennosti protsessov povrezhdeniia betonnykh poverkhnostei [Microbiological characteristics of damage to concrete surfaces]. *Fundamental'nye issledovaniia* [Fundamental research], 2013, no. 4, part 4, pp. 886–891.

Erofeev V. T., Fedortsov A. P., Bogatov A. D., Fedortsov V. A. Biokorroziia tsementnykh betonov, oobennosti ee razvitiia, otsenki i prognozirovaniia [Biocorrosion of cement concrete, features of its development, assessment and forecasting]. *Fundamental'nye issledovaniia* [Fundamental research], 2014, no. 12, part 4, pp. 708–716.

Rumiantseva V. E., Goglev I. N., Loginova S. A. Primenenie polevykh i laboratornykh metodov opredeleniia karbonizatsii, khloridnoi i sul'fatnoi korrozii pri obsledovanii stroitel'nykh konstruksii zdani i sooruzhenii [The use of field and laboratory methods for the determination of carbonization, chloride and sulphate corrosion at inspection of building constructions and structures]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaia bezopasnost'* [Construction and industrial safety], 2019, no. 15 (67), pp. 51–58.

Seliaev V. P., Neverov V. A., Seliaev P. V., Sorokin E. V., Iudina O. A. Prognozirovaniie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksii s uchetom sul'fatnoi korrozii betona [Predicting the durability of concrete structures including sulfate corrosion of concrete]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Journal of civil engineering], 2014, no. 1, pp. 41–52.

Semenov S. A., Gumargalieva K. Z., Kalinina I. G., Zaikov G. E. Bio-razrusheniia materialov i izdelii tekhniki [Bio-damages of materials and of material samples]. *Vestnik MITKhT* [Vestnik MITHT], 2007, vol. 2, no. 6, pp. 3–26.

Stepanova V. F. *Dolgovechnost' betona* [Concrete durability]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2014. 126 p.

Strokin K. B., Novikov D. G., Konovalova V. S., Loginova S. A., Narmaniiia B. E. Opređenje resursa bezopasnosti ekspluatatsii konstruksii iz zhelezobetona v usloviakh mikrobiologicheskoi korrozii [Determination of safe service life for structures made of reinforced concrete at microbiology induced corrosion]. *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity* [Modern problems of civil protection], 2020, no. 4 (37), pp. 62–69.

Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Krasil'nikov I. V., Loginova S. A. Issledovanie vliianiia protsessov massoperenosa na nadezhnost' i dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruksii, ekspluatiruemykh v zhidkikh agressivnykh sredakh [Study of effect of mass transfer processes on reliability and durability of reinforced concrete structures operating in liquid aggressive media]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2017, no. 12, pp. 52–57.

Chesnokova T. V., Rumiantseva V. E., Loginova S. A. Izuchenie gribkovoï korrozii betona s pomoshch'iu model'noi sredy [Study of fungal corrosion of concrete by means of model environment]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie* [Modern high technologies. Regional application], 2019, no. 3 (59), pp. 85–89.

Chesnokova T. V., Rumiantseva V. E., Loginova S. A. Modelirovanie protsessa biorazrusheniia betona na predpriatiiakh tekstil'noi promyshlennosti [Modeling the concrete bio destruction process at the textile industries]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile technology], 2020, no. 1 (385), pp. 206–212.

Chizhik K. I., Belookaia N. V. Model' mikrobiologicheskoi korrozii betona v sistemakh kanalizatsii [Model of microbiological corrosion of concrete in the sewage systems]. *Izvestiia vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* [Proceedings of universities. Investment. Construction. Real estate], 2017, vol. 7, no. 2, pp. 75–83.

Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, no. 99 (7). Available at: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/j21-202.pdf/download/j21-202.pdf> (accessed: 20.12.2020).

Для цитирования: Румянцева В. Е., Логинова С. А., Карцева Н. Е. Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 3 (102). – С. 56–67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-3-102-4>

For citation: Rumyantseva V. E., Loginova S. A., Kartseva N. E. Mathematical modeling of concrete structure corrosion in biologically aggressive environments. *Cherepovets State University Bulletin*, 2021, no. 3 (102), pp. 56–67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-3-102-4>

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Сведения об авторах

Варвара Евгеньевна Румянцева /
Varvara E. Rumyantseva

Доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>, varrym@gmail.com, Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Россия) / Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7226-4580>, varrym@gmail.com, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russia).

Светлана Андреевна Логинова /
Svetlana A. Loginova

Старший преподаватель, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>, sl79066171227@yandex.ru, Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Россия) / Senior lecturer, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>, sl79066171227@yandex.ru, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russia).

Наталья Евгеньевна Карцева /
Natalia E. Kartseva

Магистрант, <https://orcid.org/0000-0002-8484-0204>, nata09031997@gmail.com, Ивановский государственный политехнический университет (д. 21, Шереметевский пр-т, 153000 Иваново, Россия) / Student in master's programme, <https://orcid.org/0000-0002-8484-0204>, nata09031997@gmail.com, Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetevsky pr., 153000 Ivanovo, Russia).

Статья поступила в редакцию 25.02.2021; Одобрена после рецензирования 23.03.2021; Принята к публикации 26.03.2021.

The article was submitted 25.02.2021; Approved after reviewing 23.03.2021; Accepted for publication 26.03.2021.