

Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 3 (108). С. 21–33.
Cherovovets State University Bulletin, 2022, no. 3 (108), pp. 21–33.

Научная статья

УДК 66.021.3

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-3-108-2>

Математическое моделирование биокоррозии бетона в жидких средах

Светлана Андреевна Логинова

Ярославский государственный технический университет,
Ярославль, Россия,
sl79066171227@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>

Аннотация. Микробиологическая коррозия представляет серьезную опасность для строительных конструкций, находящихся в прямом контакте с водной средой. Разрушение цементных бетонов при биокоррозии определяется процессами массопереноса. В статье описана физико-математическая модель диффузионных процессов в системе «цементный бетон – биопленка – жидкость». Рассчитана модель массопереноса в неограниченной двухслойной пластине в виде дифференциальных уравнений параболического типа в частных производных. Представлены результаты численного эксперимента с целью изучения влияния коэффициентов массопроводности и массоотдачи на кинетику и динамику процесса. Проведен численный эксперимент, иллюстрирующий влияние критериев подобия на интенсивность протекания коррозионного массопереноса.

Ключевые слова: биокоррозия, математическая модель, массоперенос, бактерии, грибы

Для цитирования: Логинова С. А. Математическое моделирование биокоррозии бетона в жидких средах // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 3 (108). С. 21–33. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-3-108-2>.

Mathematical modeling of concrete biocorrosion in liquid media

Svetlana A. Loginova

Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia,
sl79066171227@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>

Abstract. Microbiological corrosion poses a serious danger to building structures in direct contact with an aquatic medium. The destruction of cement concrete during biocorrosion is determined by the processes of mass transfer. The article presents a physical and mathematical model of diffusion processes in the “cement concrete – biofilm – liquid” system. A model of mass transfer in an unbounded two-layer plate is calculated in the form of differential equations of parabolic type in partial derivatives. The author presents the results of the numerical experiment to study the influence of the mass conductivity and mass transfer on the kinetics and dynamics of the process. A numerical experiment has been carried out to illustrate the effect of similarity criteria on the intensity of the process of corrosive mass transfer.

Keywords: biocorrosion, mathematical model, mass transfer, bacteria, fungi

For citation: Loginova S. A. Mathematical modeling of concrete biocorrosion in liquid media. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 3 (108), pp. 21–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-3-108-2>.

Введение

Прогнозирование износа бетонных и железобетонных конструкций в результате коррозии является сложной задачей, решение которой требует поиска новых методов и подходов. Оценку влияния различных условий эксплуатации объекта на его долговечность целесообразно осуществлять путем математического моделирования и проведения на его основе численных экспериментов. Эффективность использования методов математического моделирования как неотъемлемой части успешного прогнозирования преждевременного износа конструкций доказана высокой практической применимостью полученных результатов¹.

Проблема подверженности подводных бетонных и железобетонных объектов обрастанию и коррозии по-прежнему остается актуальной. Несмотря на многообразие способов защиты от обрастания, радикальных методов борьбы на сегодняшний день не существует². Традиционные приемы по предотвращению появления коррозии оказываются малоэффективными, если она возникает в условиях воздействия микроорганизмов (речь идет о биокоррозии).

Опасность такого типа разрушения заключается в том, что биодефекторы быстро размножаются, легко адаптируясь к меняющимся условиям среды. Наиболее часто в роли биодефекторов выступают грибы родов *Penicillium*, *Aspergillus*, *Rizopus*³ (см. рис. 1).

¹ 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; Пехташева Е. Л., Неверов А. Н., Заиков Г. Е., Софьина С. Ю., Дебердеев Р. Я., Стоянов О. В. Микробиологическая коррозия металлов и защита от нее // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 5. С. 131–133; Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2017. Т. 7, № 2 (21). С. 75–83.

² Соломатов В. И. и др. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2001. 194 с.; Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 99 (7). URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7\(99\)/06.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7(99)/06.pdf) (дата обращения: 15.08.2021).

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; Пехташева Е. Л., Неверов А. Н., Заиков Г. Е., Софьина С. Ю., Дебердеев Р. Я., Стоянов О. В. Микробиологическая коррозия металлов и защита от нее // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15, № 5. С. 131–133; Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2017. Т. 7, № 2 (21). С. 75–83; Соломатов В. И. и др. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2001. 194 с.; Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2020.

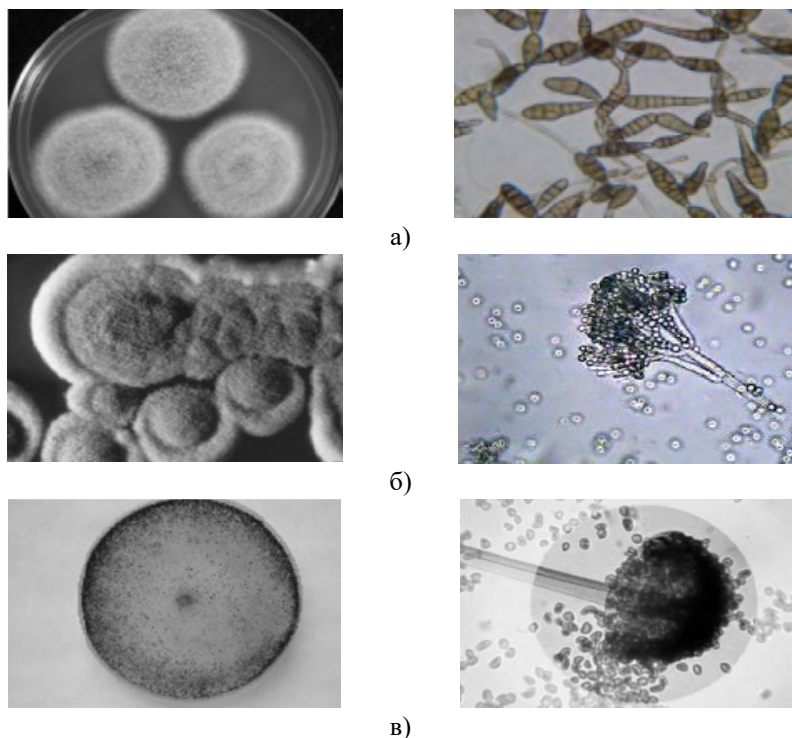


Рис. 1. Колонии грибов:
а) род *Aspergillus*; б) род *Penicillium*; в) род *Rizopus*

Биопоражение поверхности бетонных и железобетонных конструкций обуславливает снижение их эксплуатационных характеристик, а также ухудшение эстетических свойств.

Основная часть

В качестве объектов исследования использовались образцы кубической формы с гранью 30 мм, изготовленные из цемента класса ЦЕМ I 42,5Н с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. Зараженные суспензиями микроорганизмов образцы погружали в дистиллированную воду объемом 1000 см³. Пять поверхностей исследуемой системы были изолированы (см. рис. 2). Открытой для взаимодействия с агрессивной жидкостью оставалась только одна поверхность.

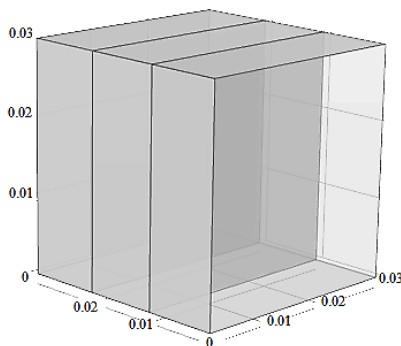


Рис. 2. Схема образца для испытаний на коррозионную стойкость (размеры указаны в м)

В результате дифференциально-термического анализа образцов цементного камня были зафиксированы четыре основных эндотермических эффекта: (-)130°C, (-)455°C, (-)550°C, (-)800°C при бактериальном поражении; (-)130°C, (-)450°C, (-)550°C, (-)700°C, (-)790°C при грибковом поражении. Они, в свою очередь, определяют дегидратацию соответствующих гидратных соединений. Возникшие эндотермические эффекты описаны в табл. 1.

Таблица 1

Изменение массы и энергии цементных образцов

t, °C	Характер эффекта	Процесс, вызывающий эффект	Изменение массы (до внешнего воздействия, %)	Изменение массы (после внешнего воздействия, %)
Образцы цементного камня после воздействия воды и бактерий				
100–130	Эндотермический	Удаление физически связанной воды	6,2	7,7
430–480	Эндотермический	Дегидратация гидроксида кальция $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	1,8	0,9
550–650	Эндотермический	Полиморфные превращения кварца $\alpha\text{-SiO}_2 \rightarrow \beta\text{-SiO}_2$	7,9	5,0
750–815 (1 пик)	Эндотермический	Декарбонизация $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	4,4	3,2
Общее изменение массы			20,3	16,8
Образцы цементного камня после воздействия воды и грибов				
100–130	Эндотермический	Удаление физически связанной воды	6,2	11,7
430–480	Эндотермический	Дегидратация гидроксида кальция $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	1,8	0,75
550–650	Эндотермический	Полиморфные превращения кварца $\alpha\text{-SiO}_2 \rightarrow \beta\text{-SiO}_2$	7,9	1,1
650–815 (2 пика)	Эндотермический	Декарбонизация $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	4,4	6,8
Общее изменение массы			20,3	20,35

Температура и интенсивность эндотермических эффектов, соответствующих дегидратации гидратных соединений, в исследуемых образцах существенно не менялись.

Количество связанной воды спустя 70 суток в образцах после воздействия воды при бактериальном поражении было выше на 19,4 %, а при грибковом – на 47 % (по сравнению с контрольными образцами). Во всех пробах зафиксировано изменение содержания гидроксида кальция по эндоэффекту при температуре 430–480 °С. У образцов, подверженных бактериальному и грибковому поражению, наблюдается сужение площади эффекта, характеризующего дегидратацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, что соответствует уменьшению количества гидроксида кальция. На основании результатов табл. 1 для образцов, на которые было оказано биовоздействие, отмечается снижение температуры окончательной дегидратации гидратных соединений до 790–800 °С, что свидетельствует о наличии небольшого количества карбонатов кальция в цементном камне¹.

Методом дифференциально-термического анализа были определены значения концентраций «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (по терминологии академика РААСН С. В. Федосова) в середине каждой пластины (см. рис. 2) для шести моментов времени, необходимые для аналитического построения профилей концентраций (см. табл. 2).

Таблица 2

Значения концентраций «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в растворе пор образца в зависимости от времени и координаты

Время		Концентрация ($\text{кг}_{\text{CaO}}/\text{кг}_{\text{бет}} \cdot 10^{-4}$) в точке с координатой		
		$x_1 = 0,005$ м	$x_2 = 0,015$ м	$x_3 = 0,025$ м
при бактериальном поражении				
τ_0	0 сут	2,47	2,47	2,47
τ_1	14 сут	2,47	2,23	1,93
τ_2	28 сут	2,38	1,98	1,76
τ_3	42 сут	2,16	1,81	1,48
τ_4	56 сут	1,88	1,53	1,23
τ_5	70 сут	1,68	1,45	1,20
при грибковом поражении				
τ_0	0 сут	2,47	2,47	2,47
τ_1	14 сут	2,47	2,15	1,84
τ_2	28 сут	2,28	2,01	1,59
τ_3	42 сут	2,12	1,69	1,24
τ_4	56 сут	1,81	1,41	1,07
τ_5	70 сут	1,49	1,25	1,01

На рис. 3 представлены профили концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетонного образца в биологически агрессивной среде.

¹ Fedosov S. V., Roumyantseva V. E., Konovalova V. S., Loginova S. A. Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of “free calcium hydroxide” during corrosion of cement concretes // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14, no. 3. P. 161–168.

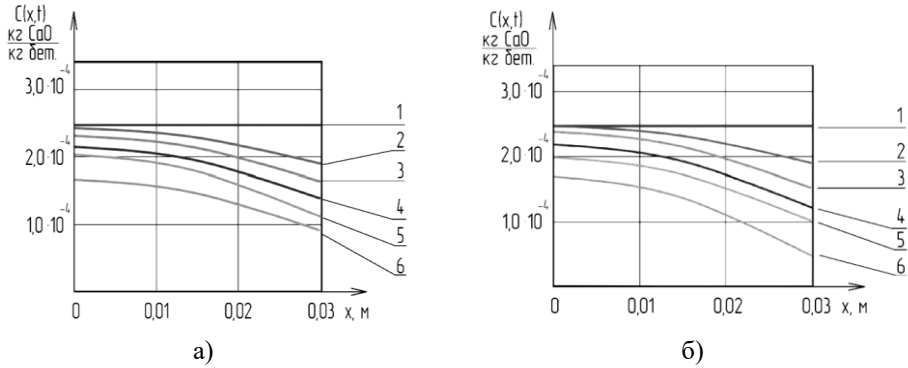


Рис. 3. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине бетонного образца в водной среде при τ :
1 – 0 сут; 2 – 14 сут; 3 – 28 сут; 4 – 42 сут; 5 – 56 сут; 6 – 70 сут:
а) при бактериальном поражении; б) при грибковом поражении

С математической точки зрения система «цементный бетон – биопленка – жидкость» может быть представлена двумя находящимися в контакте неограниченными пластинами: толщина первой пластины – δ_1 (бетон), второй – δ_2 (биопленка). Возникает необходимость определения изменения концентрации «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ во времени (τ) по толщине конструкции (x). На границе бетона с жидкостью возникают граничные условия второго рода (так как поток вещества отсутствует), на границе между бетоном и биопленкой – четвертого рода (в месте контакта пластин концентрации «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ равны, также совпадают плотности потоков массы) (см. систему уравнений (1)–(8)):

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

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

Начальное распределение концентраций принимается равномерным:

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

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

Граничные условия:

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

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

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

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

На границе «био пленка – жидкость»:

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

В безразмерных координатах краевая задача массопроводности будет иметь следующий вид (см. систему уравнений (9)–(16)):

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo_m > 0, \quad -1 \leq \bar{x} \leq 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} \cdot K_k, \quad Fo_m > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq K_\delta. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = Z_{1,0}(\bar{x}), \quad (11)$$

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = Z_{2,0}(\bar{x}). \quad (12)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=-1} = 0, \quad (13)$$

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{\bar{x}=0} = Z_2(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{\bar{x}=0}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = N \cdot \frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=K_\delta} = KI_H^*, \quad (16)$$

где $C_1(x, \tau)$ – концентрация «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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; $C_{1,0}$ – начальная концентрация «свободного» CaO , кг $\text{CaO}/\text{кг}$ бетона; $C_{2,0}$ – начальная концентрация «свободного» CaO , кг $\text{CaO}/\text{кг}$ биомассы; m – константа равновесия Генри, кг биопленки/кг бетона; $\rho_{\text{бет}}, \rho_{\text{биом}}$ – плотности бетона и биомассы, $\text{кг}/\text{м}^3$; $q_H(\tau)$ – плотность потока массы, уходящей от биопленки в поток жидкости; $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ – 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; $K_k = k_2 / k_1$; $K_\delta = \delta_2 / \delta_1$; $N = (\rho_{\text{биом}} \cdot k_2) / (\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot m)$ – коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $Fo_m = (k_1 \cdot \tau) / \delta_1^2$ – критерий Фурье;

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

Решение задачи массопроводности имеет следующий вид¹:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NK_i^* \left[Fo_m + \frac{(1 - \bar{x})^2}{2} + \varphi(K_k, N, K_\delta) \right] \right\} + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_m^2 \Psi_1(\mu_m)} \left(\begin{aligned} & \mu_m \sin \mu_m \left[\cos(\mu_m \bar{x}) \cos(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta) - \sqrt{K_k} K_\delta \sin(\mu_m \bar{x}) \sin(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta) \right] - \\ & - \frac{N}{\sqrt{K_k}} \cos(\mu_m (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_m^2 Fo_m) \end{aligned} \right) \quad (17)$$

¹ Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 99 (7). URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7\(99\)/06.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7(99)/06.pdf) (дата обращения: 15.08.2021).

$$Z_2(\bar{x}, F_{O_m}) = \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left(\frac{1 - NK_\delta + Ki_H^* [\bar{x} - F_{O_m} K_k K_\delta] +}{+ NK_i H^* \left(\phi(K_k, N, K_\delta) - \frac{1 + K_k \bar{x}^2}{2} \right)} \right) -$$

$$- 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_m^2 \psi_1'(\mu_m)} \left(\begin{aligned} & \mu_m \sin \mu_m \cos \left[\mu_m \sqrt{K_k} (K_\delta - \bar{x}) \right] - \\ & - \frac{\mu_m}{\sqrt{K_k}} \sin(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta) \left[\frac{N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) +}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] + \\ & + Ki_H^* \left[\frac{N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) +}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] \exp\left(-\mu_m^2 K_k F_{O_m}\right) \end{aligned} \right) + , \quad (18)$$

где $J = \int_0^1 Z_{1,0}(\xi) \cos[\mu_m(1-\xi)] d\xi$; μ_m – корни характеристического уравнения.

Выводы

В табл. 1 представлены результаты расчетов по предложенной математической модели процесса массопереноса «свободного» Са(ОН)₂ при биоразрушении бетона. Анализ полученных расчетных данных показывает, что в начальный период времени поток массы вещества максимален, в дальнейшем он уменьшается. На основании сведений табл. 3 можно сделать вывод о том, что при грибковой коррозии интенсивность потока массы вещества несколько выше, чем при бактериальной коррозии. Результаты численных экспериментов по предложенной математической модели представлены на рис. 4–7¹.

Таблица 3

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса

№ п/п	Наименование показателя	τ, сут				
		14	28	42	56	70
1	2	3	4	5	6	7
При бактериальной коррозии						
1	Плотность потока массы вещества в образце, кг/(м ² ·с)	5,52·10 ⁻⁷	2,42·10 ⁻⁷	6,96·10 ⁻⁸	6,22·10 ⁻⁸	8,73·10 ⁻⁹
2	Коэффициент массопроводности, м ² /с	2,58·10 ⁻⁹	1,73·10 ⁻⁹	4,84·10 ⁻¹⁰	4,54·10 ⁻¹⁰	5,02·10 ⁻¹¹
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	1,62·10 ⁻⁸	1,62·10 ⁻⁸	1,64·10 ⁻⁸	1,64·10 ⁻⁸	1,58·10 ⁻⁸

¹ Mullard J. A., Stewart M. G. Corrosion-Induced Cover Cracking: New Test Data and Predictive Models // ACI Structural Journal. 2011. Vol. 108, no. 1. P. 71–79.

Продолжение таблицы 3

При грибковой коррозии						
1	2	3	4	5	6	7
4	Плотность потока массы вещества в образце, кг/(м ² ·с)	$7,25 \cdot 10^{-7}$	$4,08 \cdot 10^{-7}$	$7,96 \cdot 10^{-8}$	$7,82 \cdot 10^{-8}$	$9,68 \cdot 10^{-9}$
5	Коэффициент массопроводности, м ² /с	$4,02 \cdot 10^{-9}$	$3,72 \cdot 10^{-9}$	$5,55 \cdot 10^{-10}$	$5,42 \cdot 10^{-10}$	$6,39 \cdot 10^{-11}$
6	Коэффициент массоотдачи, м/с	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$1,66 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$

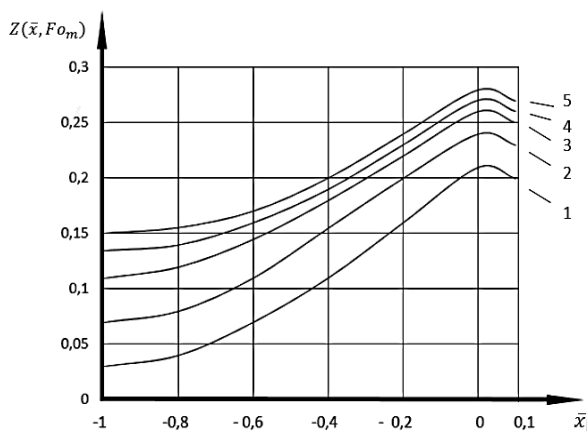


Рис. 4. Профили безразмерных концентраций «свободного» Ca(OH)_2 по толщине бетона и биопленки при бактериальной коррозии: 1 – на 14 сут; 2 – на 28 сут; 3 – на 42 сут; 4 – на 56 сут; 5 – на 70 сут

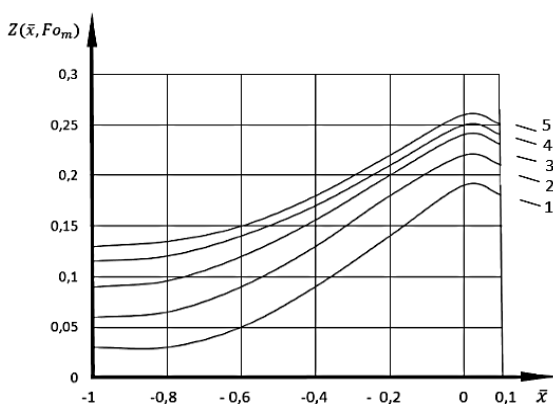


Рис. 5. Профили безразмерных концентраций «свободного» Ca(OH)_2 по толщине бетона и биопленки при грибковой коррозии: 1 – на 14 сут; 2 – на 28 сут; 3 – на 42 сут; 4 – на 56 сут; 5 – на 70 сут

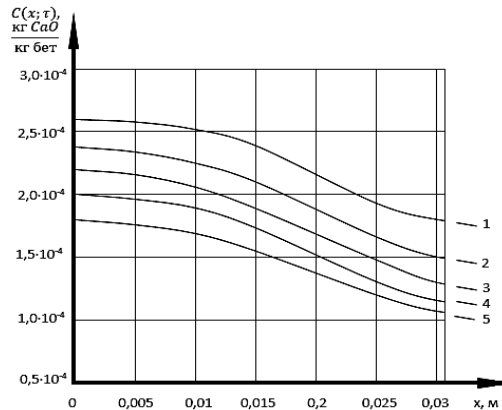


Рис. 6. Профили концентраций «свободного» Ca(OH)_2 по толщине бетона и био пленки при бактериальной коррозии: 1 – на 14 сут; 2 – на 28 сут; 3 – на 42 сут; 4 – на 56 сут; 5 – на 70 сут

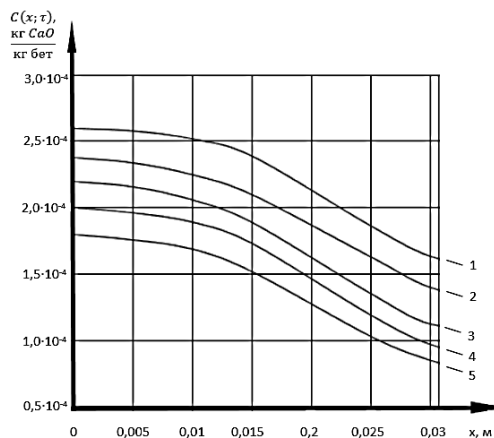


Рис. 7. Профили концентраций «свободного» Ca(OH)_2 по толщине бетона и био пленки при грибковой коррозии: 1 – на 14 сут; 2 – на 28 сут; 3 – на 42 сут; 4 – на 56 сут; 5 – на 70 сут

Таким образом, экспериментальные и расчетные данные позволяют судить о сходимости полученных результатов, что подтверждает возможность применения разработанной математической модели для расчетов процессов массопереноса при биокоррозии цементных бетонов независимо от таксономического состава биообрастания.

Список источников

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.

Пехташева Е. Л., Неверов А. Н., Заиков Г. Е., Софьина С. Ю., Дебердеев Р. Я., Стоянов О. В. Микробиологическая коррозия металлов и защита от нее // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 5. С. 131–133.

Соломатов В. И. и др. Биологическое сопротивление материалов. Саранск: Издательство Мордовского университета, 2001. 194 с.

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.

Чижик К. И., Белоокая Н. В. Модель микробиологической коррозии бетона в системах канализации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7, № 2 (21). С. 75–83.

Fedosov S. V., Loginova S. A. Mathematical model of concrete biological corrosion // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 99 (7). URL: [https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7\(99\)/06.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7(99)/06.pdf) (дата обращения: 15.08.2021).

Fedosov S. V., Roumyantseva V. E., Konovalova V. S., Loginova S. A. Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of “free calcium hydroxide” during corrosion of cement concretes // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Vol. 14, no. 3. P. 161–168.

Mullard J. A., Stewart M. G. Corrosion-Induced Cover Cracking: New Test Data and Predictive Models // ACI Structural Journal. 2011. Vol. 108, no. 1. P. 71–79.

References

Erofeev V. T., Fedortsov A. P., Bogatov A. D., Fedortsov V. A. Biokorroziia tsementnykh betonov, ocoennosti 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.

Pekhtasheva E. L., Neverov A. N., Zaikov G. E., Sofina S. Iu., Deberdееv R. Ia., Stoianov O. V. Mikrobiologicheskaiia korroziiia metallov i zashchita ot nee [Microbiological corrosion of metals and protection against it]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan technological university], 2012, vol. 15, no. 5, pp. 131–133.

Solomatov V. I. i dr. *Biologicheskoe soprotivlenie materialov* [Biological resistance of materials]. Saransk: Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta, 2001. 194 p.

Chesnokova T. V., Rumiantseva V. E., Loginova S. A. Izuchenie gribkovoii korrozii betona s pomoshch'iu model'noi srede [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.

Chizhik K. I., Belookaia N. V. Model' mikrobiologicheskoi korrozii betona v sistemakh kanalizatsii [Model of microbiological corrosion of concrete in the systems of canalization]. *Izvestiia vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimos't'* [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate], 2017, vol. 7, no. 2 (21), 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://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7\(99\)/06.pdf](https://engstroy.spbstu.ru/userfiles/files/2020/7(99)/06.pdf) (accessed: 15.08.2021).

Fedosov S. V., Roumyantseva V. E., Konovalova V. S., Loginova S. A. Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of “free calcium hydroxide” during corrosion of cement concretes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 161–168.

Mullard J. A., Stewart M. G. Corrosion-Induced Cover Cracking: New Test Data and Predictive Models. *ACI Structural Journal*, 2011, vol. 108, no. 1, pp. 71–79.

Сведения об авторах

Светлана Андреевна Логинова – доцент; <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>, sl79066171227@yandex.ru, Ярославский государственный технический университет (д. 88, пр-т Московский, 150023 г. Ярославль, Россия); **Svetlana A. Loginova** – Associate Professor; <https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>, sl79066171227@yandex.ru, Yaroslavl State Technical University (88, pr. Moscovskiy, 150023 Yaroslavl, Russia).

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 14.10.2021; принята к публикации 26.10.2021.

The article was submitted 30.08.2021; Approved after reviewing 14.10.2021; Accepted for publication 26.10.2021.