

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.1.691

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_47

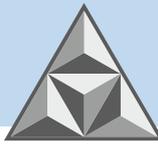
Принципы математического моделирования коррозионных процессов в биоагрессивных средах

С.А. Логинова

Светлана Андреевна Логинова

Ярославский государственный технический университет Ярославль, Российская Федерация

sl79066171227@yandex.ru



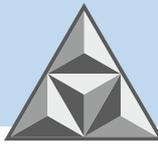
Статья посвящена вопросу математического моделирования как методу теоретического исследования процессов биологической коррозии бетона в жидких средах. Изложены результаты экспериментальных исследований по влиянию микроорганизмов на общий коррозионный процесс, протекающий в бетоне в водных средах. Представлено моделирование диффузионных процессов, характерных при биокоррозии бетонных конструкций. Впервые рассчитана модель массообменных процессов в неограниченной двухслойной пластине, представляющая собой систему дифференциальных уравнений параболического типа в частных производных с граничными условиями второго и четвертого рода. Предложенная математическая модель учитывает кинетику процессов увеличения и уменьшения биомассы на поверхности бетона. Отражена перспектива применения разработанной математической модели биокоррозии бетона в жидких средах. Проведен ряд численных экспериментов, подтверждающий адекватность и универсальность предложенной математической модели.

Ключевые слова: бетон, микроорганизмы, диффузия, массоперенос, граничные условия

Для цитирования:

Логинова С.А. Принципы математического моделирования коррозионных процессов в биоагрессивных средах // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 1. С. 47-57. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N1_2022

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_47



RESEARCH ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_47

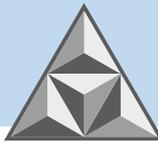
Principles of mathematical modeling of corrosion processes in aggressive environments

S.A. Loginova

Svetlana A. Loginova

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

sl79066171227@yandex.ru



The article is devoted to the issue of mathematical modeling as a method of theoretical investigation of the processes of biological corrosion of concrete in liquid media. The results of experimental studies on the effect of microorganisms on the general corrosion process occurring in concrete in aqueous media are presented. Modeling of diffusion processes characteristic of biocorrosion of concrete structures is presented. For the first time, a model of mass transfer processes in an unlimited two-layer plate is calculated, which is a system of partial differential equations of parabolic type with boundary conditions of the second and fourth kind. The proposed mathematical model takes into account the kinetics of the processes of increasing and decreasing biomass on the concrete surface. The perspective of application of the developed mathematical model of concrete biocorrosion in liquid media is reflected. A number of numerical experiments have been carried out confirming the adequacy and universality of the proposed mathematical model.

Key words: concrete, microorganisms, diffusion, mass transfer, boundary conditions

For citation:

Loginova S.A. (2022) Principles of mathematical modeling of corrosion processes in aggressive environments, *Smart Composite in Construction*, 3(1), pp.47-57 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N1_2022 (In Russian)

DOI: 10.52957/27821919_2022_1_47



ВВЕДЕНИЕ

Впервые о проблеме биоразрушения бетона заговорили в начале XX века в США. Тогда в Лос-Анджелесе при обследовании водного канала в поврежденном поверхностном слое бетона ученые обнаружили нитрифицирующие бактерии [1]. Первые исследования биокоррозии бетона в СССР были проведены академиком Б.Л. Исаченко тридцать лет спустя [2].

Одним из наиболее распространенных видов биокоррозии является микробиологическая коррозия, возникающая в результате контакта бетона с морскими и пресными водами. Ученые в соответствии с таксономическим составом биодеструкторов в отдельные подвиды выделяют водорослевую, бактериальную и грибковую коррозию [3, 4]. На практике отдельные подвиды биокоррозии встречаются редко, так как обычно биообрастание представлено биоценозом различных групп микроорганизмов. Наибольшую опасность для бетона представляют грибковые микроорганизмы, способные образовывать фунгальные биопленки на его поверхности.

Биоразрушение бетонных конструкций представляет серьезную опасность для мостовых и иных гидросооружений, эксплуатирующихся в биоагрессивных средах. Очень часто биообрастанию подвергаются опоры нефтедобывающих платформ, опоры мостов, пирсов и т.д. [5]. Всё это неизбежно приводит к возникновению дополнительной нагрузки на опоры от постепенно возрастающей массы биообрастания, к катализации коррозионных процессов, протекающих в бетонных сооружениях, в результате жизнедеятельности биодеструкторов.

Ежегодно на ликвидацию последствий от биоразрушения строительных конструкций государства тратят миллионы долларов [6, 7]. Объективная оценка ущерба от биоразрушения строительных материалов складывается из потерь от непосредственно самих биоповреждений и затрат на защиту от них. Под непосредственными потерями от биокоррозии принято понимать затраты на замену поврежденных строительных материалов и конструкций. Затраты на защиту от биоповреждений включают в себя расходы на капитальный и текущий ремонты, а также затраты на проведение плановых работ по восстановлению противобиокоррозионной защиты строительных конструкций.

В настоящее время применяется несколько подходов в борьбе с биокоррозией бетона: разработка эпоксидных и полимерных покрытий; корректировка состава бетона; применение биоцидов для обработки поверхности строительных конструкций [8-11]. Несмотря на множество существующих способов защиты от биообрастания, вопрос биодegradации бетона остается нерешенным.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Любое коррозионное разрушение бетона в жидкой среде объясняется массообменными процессами бетона и жидкости [12, 13]. При биообрастании отмечается ускорение коррозионных процессов в бетоне. Заселение поверхности бетона микроорганизмами, секреция метаболитов и образование биоценозов на его поверхности меняют условия в месте контакта «бетон-жидкость». Микроорганизмы выделяют широкий спектр органических кислот, которые вступают в различные химические реакции, разрушая бетон.

Моделирование биокоррозии бетона вызывает ряд трудностей в силу многофакторности этого процесса. На рис. 1 представлена схема образования биоценоза микроорганизмов на бетонной поверхности. Изначально микроорганизмы находятся в подвижном состоянии (I



стадия). Формирование любой биопленки начинается с адгезии микроорганизмов к субстрату (II стадия), после чего начинают образовываться микроколонии (III стадия), которые в результате образуют зрелую биопленку (IV стадия) [13]. Важным моментом является процесс дисперсии, т.е. способность микроорганизмов покидать биопленку в результате действия каких-либо факторов, например, в результате снижения содержания питательных веществ. Этот процесс невозможно спрогнозировать и контролировать. Изменение условий среды может вызвать как ускоренный рост биопленки путем появления и развития более развитых форм микроорганизмов, так и отмирание микроорганизмов. Отмершие и разрушившиеся клетки микроорганизмов также входят в состав биопленки, увеличивая ее биомассу.

Также известно, что соотношение микроорганизмов и матрикса (полимерных веществ, выделяемых клетками) в биопленке может сильно варьироваться. Установлено, что содержание микроорганизмов в биопленке может опускаться до 10% от общего объема [14]. Сложные, непрерывные во времени фазы роста и отмирания микроорганизмов, изменение толщины биопленки удается учесть при математическом моделировании путем введения специальных коэффициентов.

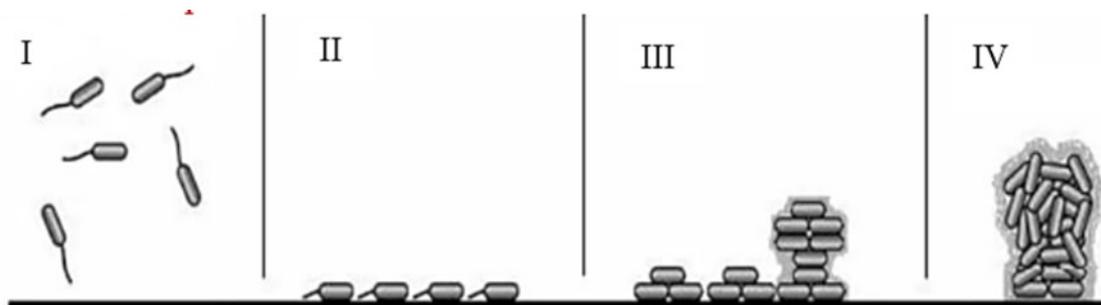


Рис. 1. Схема формирования биопленки на поверхности бетона: I стадия - начальная; II - первичная адгезия; III - образование микроколоний; IV - зрелая биопленка

Fig. 1. Scheme of biofilm formation on the concrete surface: Stage I - initial; II - primary adhesion; III - formation of microcolonies; IV - mature biofilm

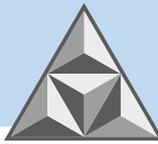
Специфичностью математического моделирования биокоррозии бетона является необходимость решения краевых задач. Важно учитывать квазистационарность процесса коррозии. В этом случае процесс считается равновесным в пределах определенных интервалов по времени и по координате.

Одним из основных требований, предъявляемых к математическим моделям, является универсальность. Математическая модель должна включать в себя обобщенные уравнения, описывающие процессы биоразрушения бетона в наиболее общем случае.

Моделирование биообрастания бетонной конструкции в водной среде сводится к решению задачи массопроводности через неограниченную двухслойную пластину (рис. 2) [15].

Толщина первой пластины (цементный бетон) задана как δ_1 , толщина второй пластины (биообрастания) - δ_2 (см. рис. 2). Задача сводится к определению изменения концентрации целевого компонента (C) по толщине конструкции (x) с течением времени (τ). Для математического описания использовались дифференциальные уравнения с заданными граничными условиями [15, 16].

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



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

Начальные условия:

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

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

Процессы, протекающие на границе I (см. рис. 1), представлены граничным условием второго рода, означающим отсутствие потока вещества:

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

На границе раздела фаз II (см. рис. 2) концентрации целевого компонента равны, следовательно, равны диффузионные потоки масс, поэтому в данном случае применяется граничное условие четвертого рода:

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

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

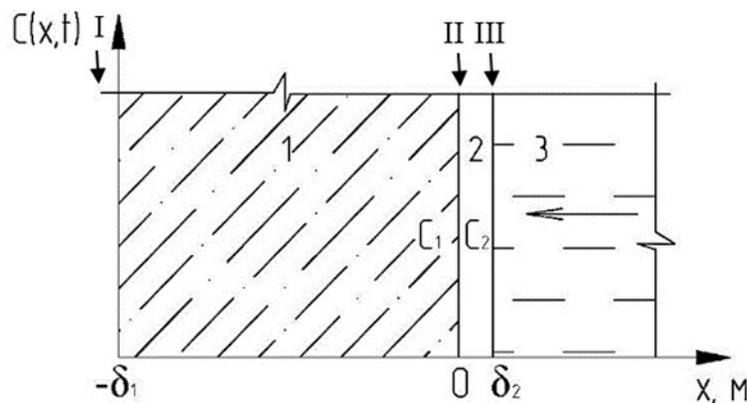


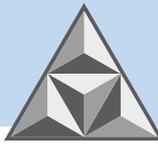
Рис. 2. Модель биообрастания бетонной конструкции: 1 – цементный бетон; 2 – биообрастание; 3 – жидкость

Fig. 2. Biofouling model of concrete structure: 1 - cement concrete; 2 - biofouling; 3 - liquid

На границе III (см. рис. 2) граничное условие выглядит следующим образом:

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

Условные обозначения: $C_1(x, \tau)/C_2(x, \tau)$ - концентрации целевого компонента в бетоне/био пленке в момент времени « τ » в произвольной точке с координатой « x », ($\kappa_{CaO}/\kappa_{бет}$); $k_{1,2}$ -коэффициенты массопроводности (m^2/c); δ_1 - толщина бетонной конструкции (м); δ_2 - толщина био пленки (м); $C_{1,0}$ - начальная концентрация целевого компонента ($\kappa_{CaO}/\kappa_{бет}$); $C_{2,0}$ - начальная концентрация свободного компонента ($\kappa_{CaO}/\kappa_{биом}$); m - константа



равновесия Генри (кг биопленки/кг бетона); $\rho_{бет}, \rho_{биом}$ - плотности бетона и биомассы соответственно (кг/м³); $q_n(\tau)$ - плотность диффузионного потока от биопленки в поток жидкости.

Для решения системы дифференциальных уравнений применялся метод интегрального преобразования Лапласа. Было получено общее решение задачи массопроводности. На основе математической модели была написана расчетная программа, которая позволяет определять значения концентраций переносимого компонента по толщине бетонной конструкции и биопленки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Адекватность предложенной математической модели подтверждается рядом численных экспериментов. На рис. 3 приведены расчетные кривые зависимости безразмерных концентраций от критерия Кирпичева (1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3) при критерии Фурье равном единице. Увеличение массообменного критерия Кирпичева сопровождается большими градиентами концентраций. На рис. 4 представлены кривые концентраций целевого компонента при разных значениях массообменного критерия Фурье (1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3) и критерии Кирпичева, равном 0,5 [15].

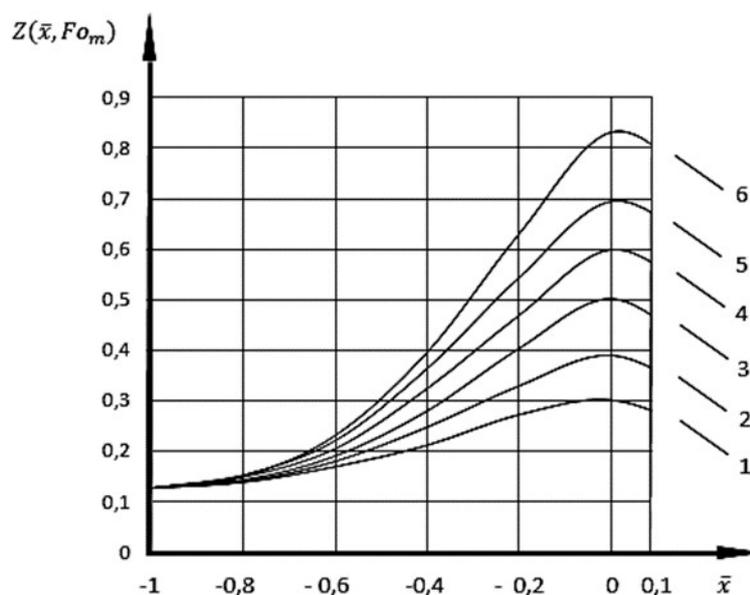


Рис. 3. Кривые концентраций переносимого компонента по толщине бетона и биопленки при разных значениях критерия Кирпичева

Fig. 3. Curves of the concentrations of the transferred component by the thickness of concrete and biofilm at different values of the Kipichev criterion

Предложенная расчетная программа позволяет определить предварительный срок службы бетонных конструкций в агрессивных водных средах, характеристики которых изначально известны. Для проведения численного эксперимента были приняты следующие допущения: бетонная конструкция эксплуатируется в речной воде, средняя скорость течения реки не превышает 2 км/ч, согласно экспериментальным данным прирост толщины биообрастания для рассматриваемого климатического района составляет 20–25 мм в год. Для численного эксперимента были рассчитаны значения критерия Фурье (рис. 5): 1 - 0,16; 2 - 0,33; 3 - 0,41; 4 - 0,81; 5 - 1,19, что соответствует 2, 4, 5, 10 и 15 годам эксплуатации [15, 16].

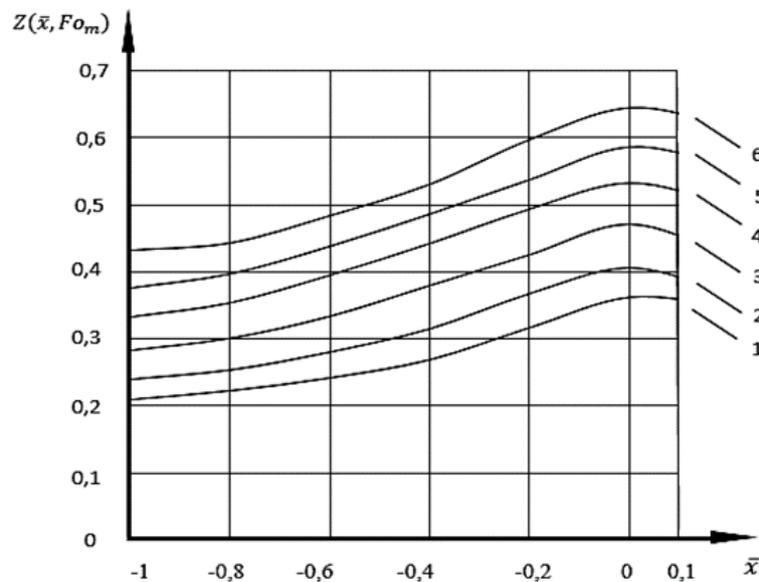


Рис. 4. Кривые концентраций переносимого компонента по толщине бетона и био пленки при разных значениях критерия Фурье

Fig. 4. Curves of the concentration of the transferred component over the thickness of concrete and biofilm at different values of the Fourier criterion

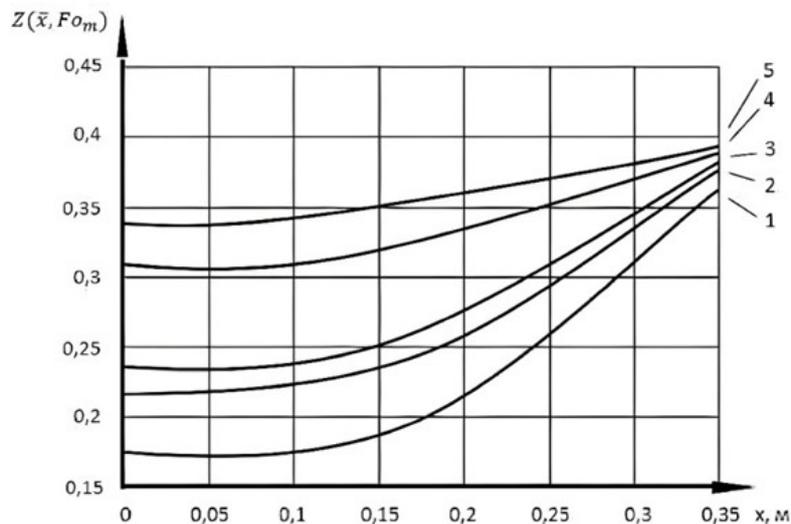


Рис. 5. Поля концентраций в бетонной конструкции, соответствующие различным временным параметрам: 1 – 2 года; 2 – 4 года; 3 – 5 лет; 4 – 10 лет; 5 – 15 лет

Fig. 5. Concentration fields in a concrete structure corresponding to various time parameters: 1 – 2 years; 2 – 4 years; 3 – 5 years; 4 – 10 years; 5 – 15 years

Разработанная и апробированная математическая модель и созданная на ее основе расчетная программа дают возможность своевременного прогнозирования долговечности бетонных конструкций, эксплуатирующихся в водных биологически агрессивных средах. Предварительный расчет позволяет грамотно назначить антикоррозионные мероприятия, способствующие увеличению срока службы бетонных конструкций.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Jamaguchi S., Aayama V.** Zumbakteriologischen korrosions produktvom Betoneisen in Untermeertunnel // *Werkst. und Korros.* 1973. No. 24. P. 209-210.
2. К 150-летию со дня рождения академика Бориса Лаврентьевича Исаченко (годы жизни 15.06.1871–17.11.1948) // *Микробиология.* 2021. № 90(4). С. 506-508. DOI: 10.31857/s002636562104008x
3. **Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А.** Особенности биодеградации гидротехнических бетонов // *Умные композиты в строительстве.* 2020. № 1 (1). С. 45-55. URL: <http://comincon.ru/index.php/tor/article/view/12/5>
4. **Светлов Д.А., Качалов А.Н.** Микробиологическая коррозия строительных материалов // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения».* 2019. №4 (6). DOI: 10.15862/19SATS419
5. **Лебедева К.К., Няникова Г.Г., Царовцева И.М.** Микробиологический анализ образцов материалов, размещенных в прибрежной зоне Баренцева моря // *Изв. Санкт-Петербургского гос. технол. ин-та (техн. ун-та).* 2021. № 57. С. 53-58. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-57-83-53-58
6. **Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Перов Н.С., Бухарев Г.М.** Опыт ФГУП "ВИАМ" по исследованию биокоррозии в морской воде // *Трубопроводный транспорт. Теория и практика.* 2016. № 4. С. 28-32.
7. **Inaba Y., Xu S., Vardner J.T., West A.C., Banta S.** Microbially influenced corrosion of stainless steel by *Acidithiobacillus ferrooxidans* supplemented with pyrite: importance of thiosulfate // *Applied and environmental microbiology.* 2019. Vol. 85(21). e01381-19. DOI: 10.1128/AEM.01381-19
8. **Сторожева М.Е., Денисова Я.В.** Биокоррозия подземных сооружений: основные причины и защита конструкций // *Ученые записки Сахалинского гос. ун-та.* 2020. № 15-16. С. 109-113.
9. **Гурбанов А.Н.** Основные направления защиты оборудования и трубопроводов от биокоррозии // *Вестник Азербайджанской инженерной академии.* 2021. Т. 13, № 3. С. 74-82. DOI: 10.52171/2076-0515202113037482
10. **Кочина Т.А., Кондратенко Ю.А., Шилова О.А., Власов Д.Ю.** Биокоррозия, биообрастание и современные методы борьбы с ними // *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2022. Т. 58, № 1. С. 86-112. DOI: 10.31857/S0044185622010120
11. **Makita H.** Iron-oxidizing bacteria in marine environments: recent progresses and future directions // *World J Microbiol Biotechnol.* 2018. Vol. 34(8). P. 110.
12. **Смирнов В.Ф., Светлов Д.А., Зоткина М.М., Светлов Д.Д., Бажанова М.Е., Вильдяева М.В., Захарова Е.А.** Экологические аспекты биокоррозии и повышение биостойкости строительных материалов // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2021. № 4. С. 14-26. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.14
13. **Ерофеев В.Т., Аль Д.С., Мишуняева О.А.** Способы повышения долговечности и надёжности железобетонных конструкций // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения.* 2016. № 1. С. 13-19.
14. **Телегди Ю., Шабан А., Триф Л.** Обзор. Микробиологическая коррозия и характеристика биопленок // *Коррозия: материалы, защита.* 2020. № 6. С. 1-19. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-6-1-19
15. **Fedosov S.V., Loginova S.A.** Mathematical model of concrete biological corrosion // *Magazine of Civil Engineering.* 2020. No. 7(99). С. 9906.
16. **Румянцева В.Е., Логинова С.А., Карцева Н.Е.** Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах // *Вестник Череповецкого гос. ун-та.* 2021. № 3(102). С. 56-67. DOI: 10.23859/1994-0637-2021-3-102-4

Поступила в редакцию 10.03.2022

Одобрена после рецензирования 17.03.2022

Принята к опубликованию 22.03.2022



REFERENCES

1. **Jamaguchi S., Aayama V. (1973)** Zumbakteriologischen korrosions produktvom Betoneisen in Untermeertunnel, *Werkst. und Korros*, (24), pp. 209-210.
2. To the 150th anniversary of the birth of Academician Boris Lavrentievich Isachenko (years of life 15.06.1871-17.11.1948) (2021) *Microbiology*, 90(4), pp. 506-508. DOI: 10.31857/s002636562104008x
3. **Fedosov S.V., Rumyantseva V.E. & Loginova S.A. (2020)** Biodegradation of hydrotechnical concrete, *Smart composites in construction*, 1(1), pp. 45-55. URL: <http://comincon.ru/index.php/tor/article/view/12/5>
4. **Svetlov D.A., Kachalov A.N. (2019)** Microbiological corrosion of building materials, *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/19SATS419.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/19SATS419
5. **Lebedeva K.K., Nyanikova G.G. & Tsarovtseva I.M. (2021)** Microbiological analysis of samples of materials placed in the coastal zone of the Barents Sea, *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, (57), pp. 53-58. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-57-83-53-58
6. **Laptev A.B., Lutsenko A.N., Perov N.S. & Bukharev G.M. (2016)** The experience of FSUE "VIAM" on the study of biocorrosion in seawater, *Pipeline transport. Theory and practice*, (4), pp. 28-32.
7. **Inaba Y., Xu S., Vardner J.T., West A.C. & Banta S. (2019)** Microbially influenced corrosion of stainless steel by *Acidithiobacillus ferrooxidans* supplemented with pyrite: importance of thiosulfate, *Applied and environmental microbiology*, 85(21). DOI: 10.1128/AEM.01381-19
8. **Storozheva M.E., Denisova Ya.V. (2020)** Biocorrosion of underground structures: the main causes and protection of structures, *Scientific notes of the Sakhalin State University*, (15-16), pp. 109-113.
9. **Gurbanov A.N. (2021)** The main directions of protection of equipment and pipelines from biocorrosion, *Bulletin of the Azerbaijan Engineering Academy*, 13(3), pp. 74-82. DOI: 10.52171/2076-0515202113037482
10. **Kochina T.A., Kondratenko Yu.A., Shilova O.A., Vlasov D.Yu. (2022)** Biocorrosion, biofouling and modern methods of combating them, *Physicochemistry of the surface and protection of materials*, 58(1), pp. 86-112. DOI: 10.31857/S0044185622010120
11. **Makita H. (2018)** Iron-oxidizing bacteria in marine environments: recent progresses and future directions, *World J Microbiol Biotechnol*, 34(8), p. 110.
12. **Smirnov V.F., Svetlov D.A., Zotkina M.M., Svetlov D.D., Bazhanova M.E., Vildyaeva M.V. & Zakharova E.A. (2021)** Ecological aspects of biocorrosion and increasing the biostability of building materials, *Bulletin of the Volga State Technol. un-ta. Series: Materials. Constructions. Technologies*, (4), pp. 14-26. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.14
13. **Erofeev V.T., Al D.S., Mishunyaeva O.A. (2016)** Ways to increase the durability and reliability of reinforced concrete structures, *Safety of the Construction Fund of Russia. Problems and solutions*, (1), pp. 13-19.
14. **Telegdi Yu., Shaban A., Trif L. (2020)** Review. Microbiological corrosion and characteristics of biofilms, *Corrosion: materials, protection*, (6), pp. 1-19. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-6-1-19
15. **Fedosov S.V., Loginova S.A. (2020)** Mathematical model of concrete biological corrosion, *Magazine of Civil Engineering*, 7(99). p. 9906.
16. **Rumyantseva V.E., Loginova S.A., Kartseva N.E. (2021)** Mathematical modeling of corrosion of concrete structures in biologically aggressive environments, *Bulletin of Cherepovets State University*, 3(102). pp. 56-67. DOI: 10.23859/1994-0637-2021-3-102-4

Received 10.03.2022

Approved after reviewing 17.03.2022

Accepted 22.03.2022