

Логинова Светлана Андреевна

Старший преподаватель,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>
E-mail: sl79066171227@yandex.ru

Loginova Svetlana Andreevna

Senior lecturer,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0001-6025-8968>
E-mail: sl79066171227@yandex.ru

Гоглев Илья Николаевич

Соискатель,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0002-4956-323X>
E-mail: azidplumbum00@mail.ru

Goglev Ilya Nikolaevich

Applicant for a degree,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0002-4956-323X>
E-mail: azidplumbum00@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ И
ДИНАМИКИ ПРОТЕКАНИЯ
МАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
ВИДАХ КОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ
БЕТОНОВ**

**MODELING THE KINETICS
AND DYNAMICS OF MASS TRANSFER
DURING VARIOUS TYPES OF CEMENT
CONCRETE CORROSION**

Аннотация. В статье рассмотрены особенности протекания различных видов коррозии цементных бетонов: коррозии жидкостной, кислотной и биологической, которые наиболее часто выявляются на стадии обследования бетонных и железобетонных строительных конструкций. Рассмотрена возможность применения методов математического моделирования коррозионных процессов, что позволит определить интенсивность протекания массопереноса и спрогнозировать срок службы бетонных и железобетонных конструкций. Приведены математические модели коррозии 1-го и 2-го видов, благодаря которым можно рассчитать концентрацию «свободного» гидроксида кальция в зависимости от толщины бетонной конструкции. Данные математические модели позволяют также определить концентрацию переносимого целевого компонента в жидкой кислотно-солевой среде и найти среднее значение концентрации в произвольный момент времени. Одним из важных отличий рассмотренной математической модели кислотной коррозии является

Abstract. The article describes the features of various types of cement concrete corrosion: liquid, acid and biological corrosion, which are most often detected at the stage of inspection of concrete and reinforced concrete building structures. The authors consider the possibility of using methods of mathematical modeling applicable to corrosion processes, which will determine the intensity of mass transfer and predict the service life of concrete and reinforced concrete structures. Mathematical models for corrosion of the 1st and 2nd types are given, which allow calculating the concentration of “free” calcium hydroxide depending on the thickness of the concrete structure. These mathematical models also allow us to determine the concentration of the transferred target component in a liquid acid-salt medium and find the average value of the concentration at any time. One of the important differences of the considered mathematical model for acid corrosion is its dependence on the concentration of the target component in the liquid phase. At the same time, the authors present a physical and

ее зависимость от концентрации целевого компонента в жидкой фазе. Наряду с этим представлена физико-математическая модель, позволяющая проводить расчет процессов массопереноса при биокоррозии цементных бетонов независимо от видового состава биообрастания. На основе предложенных математических моделей различных видов коррозии бетонов были разработаны практические рекомендации по мониторингу и повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций.

Ключевые слова: массоперенос, коррозия бетона, биодеструкция, математическое моделирование, целевой компонент, долговечность

mathematical model that allows calculating the mass transfer processes in the biodestruction of cement concrete, without regard to the specific composition of the biofouling. Based on the proposed mathematical models related to various types of concrete corrosion, the authors developed practical recommendations for monitoring and improving the corrosion resistance of concrete and reinforced concrete structures.

Keywords: mass transfer, concrete corrosion, biodegradation, mathematical modeling, target component, durability

Введение

Очень часто при выявлении коррозии бетонных и железобетонных конструкций на стадии обследования выделяются сразу несколько различных ее видов, действующих совместно и приводящих к разрушению бетона¹. В качестве примера можно рассмотреть случаи, когда совместно действуют коррозия вымывания (коррозия 1-го вида) и коррозия 2-го вида, или биологическая и химическая коррозия (см. рис. 1). Данные коррозионные разрушения усугубляются сложностью и дороговизной ремонта, поскольку требуют точечных ремонтных мероприятий, особенно в вертикальных сжатых и горизонтальных изгибаемых конструкциях (во избежание потери устойчивости)².

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.

² 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; Федосов С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А., Шестеркин М. Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // Строительные материалы. – 2015. – № 3. – С. 8–11.



Рис. 1. Разрушение защитного бетонного слоя, оголение и коррозия арматуры железобетонной стенки нагильного пруда, вследствие совместного действия биологической и химической коррозии

Карбонизация и хлоридная коррозия в настоящее время являются наиболее распространенными видами химической коррозии бетонных и железобетонных конструкций¹. Негативные последствия, возникающие в результате влияния продуктов жизнедеятельности грибов и плесени, представляют собой биологическую коррозию; особенно она распространена в зонах с застойными водами².

Помимо обнаружения коррозии бетона, важным пунктом современной научной деятельности при обследованиях является прогнозирование срока службы железобетонных конструкций.

Прогнозирование долговечности конструкции – весьма сложный аналитический процесс, требующий многообразных системных знаний ряда наук: физической химии, электрохимии, термодинамики, теории и кинетики гетерогенных химических процессов, массопереноса в капиллярно-пористых телах. Посредством визуальных методов практически невозможно спрогнозировать срок эффективной эксплуатации конструкции без проведения капитального ремонта. Однако установить срок службы бетонных и железобетонных конструкций представляется возможным при помощи математических моделей³.

Основная часть

На основании многолетнего опыта обследований зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения (в том числе инфраструктурных и линейных объектов) можно утверждать, что коррозионная деструкция бетонных и железобе-

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; Федосов С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А., Шестеркин М. Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // Строительные материалы. – 2015. – № 3. – С. 8–11.

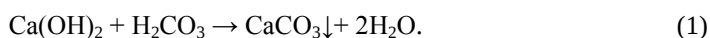
² Семенов С. А., Гумаргалиева К. З., Калинина И. Г., Заиков Г. Е. Био-разрушения материалов и изделий техники // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. – 2007. – Т. 2. – № 6. – С. 3–26.

³ Федосов С. В., Румянцева В. Е., Коновалова В. С., Гоглев И. Н., Нармания Б. Е. Управление процессами коррозионной деструкции строительных материалов на основе законов массопереноса // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 3 (74). – С. 106–111.

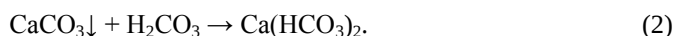
тонных конструкций в основном представлена тремя видами: карбонизацией, хлоридной и сульфатной коррозией. Сульфатная коррозия в статье рассматриваться не будет, поскольку является специфичным видом коррозии¹. Кроме того, помимо нее распространена биологическая коррозия, которая возникает при появлении на поверхности бетона грибов или плесени. Продукты их жизнедеятельности агрессивны по отношению к цементному камню бетона².

В общем виде карбонизация представляет собой процесс нейтрализации основного компонента цементного камня – «свободного гидроксида кальция» (по терминологии академика Российской академии архитектуры и строительных наук С. В. Федосова). В результате взаимодействия снижается величина показателя pH бетона³.

Нейтрализация осуществляется посредством насыщения пор бетона углекислым газом из воздуха или раствором угольной кислоты, что ведет к образованию карбоната кальция (по реакции (1)):

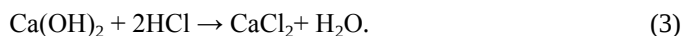


При избытке углекислого газа или угольной кислоты в растворе образуется гидрокарбонат кальция (по реакции (2)):



Образующийся в результате реакции (2) бикарбонат кальция является растворимым соединением, вследствие чего способен уноситься во внешнюю среду. Таким образом с химической точки зрения можно описать процесс коррозии вымывания⁴.

Процесс кислотной коррозии представляет собой реакцию нейтрализации «свободного» гидроксида кальция раствором кислоты (например, по реакции (3)):



Образующийся в результате реакции (3) хлорид кальция также является растворимым соединением, вследствие чего уносится во внешнюю среду. По причине кислотной коррозии бетон теряет основной связывающий компонент, что вызывает его разрушение⁵.

Современные ученые⁶ выделяют биологическую коррозию как самостоятельный вид коррозии. Кислоты, продуцируемые микроорганизмами, реагируют с гидроксидом

¹ Федосов С. В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2003. – 193 с.

² Василенко М. И., Гончарова Е. Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4–4. – 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. – № 12–4. – С. 708–716.

³ Москвин В. М. Коррозия бетона. – Москва: Госстройиздат, 1952. – 344 с.; Степанова В. Ф. Долговечность бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. – 126 с.

⁴ Там же.

⁵ Там же.

⁶ Василенко М. И., Гончарова Е. Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4–4. – С. 886–891; Ерофеев В. Т., Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биокоррозия

дом кальция на поверхности бетона и снижают его pH. В результате оксид кальция, который является основной составляющей бетона, начинает из него выщелачиваться. Скорость выщелачивания ионов кальция прямо пропорциональна биоразрушению бетона, поскольку она указывает на изменения химического характера, что в конечном итоге приводит к эрозии поверхности¹. Следовательно, скорость выщелачивания кальция служит средством оценки конкретного биоразрушения. Известно, что большая часть микробной активности протекает на поверхности бетона. Исследователями отмечается логарифмическое уменьшение микробных популяций в зависимости от глубины бетона из-за ограниченного поступления сероводорода и кислорода. Степень агрессивного биологического воздействия среды на бетон будет максимальной при значении $\text{pH} = 7,2\text{--}7,6^2$.

На ухудшение прочностных характеристик бетона в результате биологического разрушения влияют как физические, так и химические факторы. Физические факторы включают учет закономерностей поселения микроорганизмов и связанных с этим изменений структуры бетона. Ухудшение прочностных характеристик, вызванное химическими факторами, оценивают, исходя из значений концентрации агрессивной среды во всех точках тела бетона в любой момент времени t (из решения II уравнения Фика):

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где $C(x, \tau)$ – концентрация агрессивной среды в точке тела в данный момент времени t ; k – коэффициент диффузии; x – координата точки, м; τ – время, с.

Очевидно, что в биологически агрессивных жидких средах процесс коррозии цементного камня зависит от скорости заселения его поверхности микроорганизмами и интенсивности выделения продуктов их метаболизма, т. е. различных органических кислот. Исходя из этого можно сделать вывод о схожести химических реакций, протекающих при биологической коррозии и при коррозии 1-го и 2-го видов по классификации В. М. Москвина³.

По теории массопереноса академика А. В. Лыкова в общем виде для коррозии 1-го и 2-го видов диффузия гидроксида кальция в пористой структуре бетона описывается нелинейным дифференциальным уравнением массопроводности второго порядка⁴:

цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12–4. – С. 708–716.

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. – № 12–4. – С. 708–716.

² Там же.

³ Москвин В. М. Коррозия бетона. – Москва: Госстройиздат, 1952. – 344 с.

⁴ Красильников И. В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2016. – 159 с.; Шестеркин М. Е. Массообменные процессы при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2015. – 181 с.

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x, \tau)}{\rho_{\text{бет}}}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta, \quad (5)$$

где $C(x, \tau)$ – распределение концентрации «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени τ , в пересчете на CaO , кг ($\text{CaO}/\text{кг}$ бетона); k – коэффициент массопроводности в твердой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$; $q_v(x, \tau)$ – мощность объемного источника массы вследствие химических реакций, кг ($\text{CaO}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$); $\rho_{\text{бет}}$ – плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ – толщина бетона.

Начальные условия характеризуют значения полей концентрации в момент времени, принимаемый за начало отсчета, и в случае нестационарных полей концентрации имеют вид:

$$C(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0, \quad (6)$$

где $C(x, 0)$ – заданная функция концентрации в начальный момент времени.

Граничные условия характеризуют значения потенциалов переноса концентрации на границах рассматриваемой области в любой момент времени. Помимо вышесказанного, в данном случае они также будут отражать условия взаимодействия на границах рассматриваемой среды с другими средами¹:

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta^* [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)], \quad (8)$$

где $\beta^* = \rho_{\text{ж}} [C_{\text{пж}}(\tau) - C_{\text{ж}}(\tau)] / \rho_{\text{бет}} [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)]$ – модифицированный коэффициент массоотдачи в жидкой среде, $\text{м}/\text{с}$; $C_{\text{ж}}(\tau)$ – концентрация гидроксида кальция в жидкости в момент времени τ , в пересчете на CaO , кг ($\text{CaO}/\text{кг}$ жидкости); $C_p(\tau)$ – равновесная концентрация переносимого компонента на поверхности твердого тела, кг ($\text{CaO}/\text{кг}$ бетона).

При исследованиях начальных этапов коррозии бетона 1-го вида была разработана математическая модель коррозионного массопереноса на уровне феноменологических уравнений. Данная модель базируется на записи краевой задачи нестационарной массопроводности для области малых значений чисел Фурье ($F_{\text{от}} < 0,1$). Таким образом, при математическом моделировании решалась следующая система уравнений с начальным и граничными условиями, записанная в безразмерном виде²:

¹ Красильников И. В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2016. – 159 с.; Шестеркин М. Е. Массообменные процессы при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2015. – 181 с.

² Красильников И. В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2016. – 159 с.; Шестеркин М. Е. Массообменные процессы при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом влияния свойств порт-

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

$$Z(\bar{x}, 0) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial Z(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(1, Fo_m)], \quad (12)$$

$$-\frac{\partial Z_*(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}}, \quad (13)$$

где $Fo_m = \kappa t / \delta^2$ – массообменный критерий Фурье; $Bi_m = \beta \delta / k$ – массообменный критерий Био; $\bar{x} = x / \delta$ – безразмерная координата; $Z(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона; $Z_p(Fo_m)$ – безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела; $Z_*(Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе; K_m – коэффициент, учитывающий характеристики фаз.

При решении краевой задачи системы уравнений (9–13) получают следующую запись:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m) + 2Po_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x}) \cdot \phi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^2 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m), \quad (14)$$

$$Z_*(Fo_m) = Z_*(0) + 2Bi_m \cdot K_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] - 2Po_m^* \cdot K_m \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \phi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^3 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1], \quad (15)$$

$$\phi(Bi_m, K_m, \mu_m) = (\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m) \cdot \sin \mu_m - \mu_m \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_m - 1), \quad (16)$$

$$\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m) = [\mu_m^2 (3 + Bi_m) - Bi_m \cdot K_m] \cdot \sin \mu_m + \mu_m [\mu_m^2 - Bi_m (K_m + 2)] \cdot \cos \mu_m, \quad (17)$$

где μ_m – корни характеристического уравнения.

ландцемента: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2015. – 181 с.; Федосов С. В., Румянцев В. Е., Касьяненко Н. С., Красильников И. В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 97–99.

Данные уравнения (14)–(17) позволяют рассчитать профиль безразмерных концентраций переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени и концентрацию перенесенного компонента в жидкой фазе на начальных этапах процесса коррозии 1-го вида¹.

Для процессов массопереноса при коррозии бетона 2-го вида среда представляет собой агрессивный компонент, распределенный в некотором объеме (в данном случае – в объеме жидкой фазы)². Концентрация этого компонента в общем случае изменяется во времени по формуле (18):

$$C_{\text{ж}}(\tau) = f(\tau). \quad (18)$$

При математическом моделировании процесса массопереноса при коррозии 2-го вида уравнение теплопроводности будет аналогично уравнению (5). Неизменными останутся граничные условия (6)–(7). Запишем граничное условие, показывающее, что на границе конструкции с жидкой средой существует массообмен между твердой и жидкой фазами:

$$-k\rho_{\delta} \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=\delta} = q_n, \quad (19)$$

где q_n – плотность потока массы вещества из бетона в жидкую среду, кг/(м²·с).

Решение краевой задачи процесса массопереноса при коррозии 2-го вида проводилось методом интегрального преобразования Лапласа. Конечное решение имеет вид³:

$$\begin{aligned} \theta(\bar{x}, Fo_m) = & -\frac{Ki_m^*}{6}(6Fo_m + 3\bar{x}^2 - 1) + \frac{2Ki_m^*}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \\ & + \int_0^1 \theta_0(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 + 2}{6} \right) \cdot \\ & \cdot \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi - \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cdot \xi \cdot d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cdot \xi^2 \cdot d\xi - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \cos(\pi n \bar{x}) \cdot \end{aligned} \quad (20)$$

¹ Красильников И. В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2016. – 159 с.; Шестеркин М. Е. Массообменные процессы при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2015. – 181 с.; Федосов С. В., Румянцев В. Е., Касьяненко Н. С., Красильников И. В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 97–99.

² Касьяненко Н. С. Процессы массопереноса при жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2010. – 156 с.

³ Там же.

$$\cdot \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m).$$

Полученное решение позволяет проводить расчет кинетики процессов массопереноса гидроксида кальция в жидкой и твердой фазах, а также проследивать динамику полей концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетонном изделии или конструкции, в зависимости от их габаритов и объема¹.

В случае биокоррозии бетона в жидкой среде расчетная схема представляет собой систему из двух находящихся в контакте неограниченных пластин, каждая из которых характеризуется своими размерами и свойствами. Размеры первой пластины соответствуют размерам исследуемого бетона, второй – параметрам биопленки, образованной на бетоне микроорганизмами. В процессе жизнедеятельности микроорганизмы выделяют большое количество различных органических кислот². Этот факт дает возможность говорить о коррозии 2-го вида, протекающей совместно с коррозией 1-го вида.

Математическое моделирование биокоррозии бетона сводится к построению математической модели массопереноса в полуограниченной двухслойной пластине в виде дифференциальных уравнений с граничными условиями второго рода на границе бетона с жидкостью и четвертого рода на границе бетона с биопленкой.

В месте контакта бетона и биопленки:

$$C_1(x, \tau)|_{x=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{x=0}, \quad (21)$$

$$-\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\rho_{\text{биом}} \cdot k_2 \cdot \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0}, \quad (22)$$

где m – константа Генри (кг биопленки/кг бетона); $\rho_{\text{бет}}$ – плотность бетона, кг/м³; $\rho_{\text{биом}}$ – плотность биопленки, кг/м³.

Аналогичные изменения методом интегральных преобразований Лапласа дают возможность получить решения краевой задачи, позволяющие определять значения концентрации переносимого компонента по толщине как бетонной конструкции, так и самой биопленки в любой момент времени, а также допускают расчет концентрации «свободного» гидроксида кальция в жидкой фазе, расчет кинетики процесса по твердой, жидкой фазам и в биопленке, что в конечном итоге определяет (с минимальной погрешностью) прогноз долговечности и надежности строительных конструкций.

Для решения системы данных уравнений наиболее рационально использование расчетных программных комплексов на ЭВМ. Знание особенностей кинетики химической реакции между компонентами позволяет без труда дополнить приведенные выше уравнения и выполнить необходимые расчеты массопереноса в процессах кор-

¹ Федосов С. В., Румянцева В. Е., Касьяненко Н. С., Красильников И. В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 97–99.

² Дрозд Г. Я. Микроскопические грибы как фактор биоповреждений жилых, гражданских и промышленных зданий. – Макеевка: [б. и.], 1995. – 18 с.

розии бетона 1-го и 2-го видов, а также биокоррозии¹. Таким образом, для реально существующей конструкции (в зависимости от ее толщины и срока эксплуатации на момент обследования) возможен расчет профилей концентрации «свободного» гидроксида кальция. Это позволит определить срок ее долговечности или остаточный срок эксплуатации².

Выводы

Проведенные исследования затрагивают одну из важнейших тем в области массопереноса, поскольку позволяют прогнозировать последствия коррозионных воздействий 1-го, 2-го вида и биологической коррозии на бетонные и железобетонные конструкции. В процессе изучения биокоррозии бетона впервые проведено математическое моделирование с точки зрения массопереноса. Кроме того, следует отметить, что выполненные исследования имеют актуальное прикладное применение. Так, с использованием данных физико-математических моделей был произведен расчет профилей концентрации целевого компонента железобетонных стенок резервуара для воды (см. рис. 2–4).

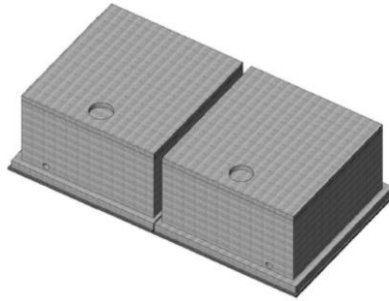


Рис. 2. Общий вид железобетонного резервуара для воды

¹ Федосов С. В., Румянцева В. Е., Касьяненко Н. С., Красильников И. В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 97–99.

² Касьяненко Н. С. Процессы массопереноса при жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2010. – 156 с.; Дрозд Г. Я. Микроскопические грибы как фактор биоповреждений жилых, гражданских и промышленных зданий. – Макеевка: [б. и.], 1995. – 18 с.; 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.

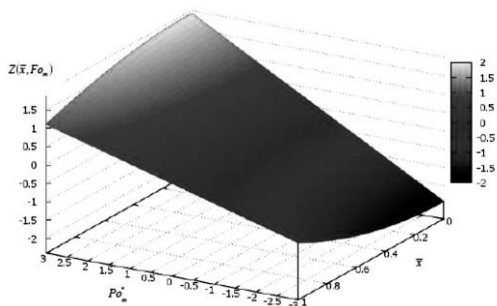


Рис. 3. Динамика изменения профиля безразмерной концентрации целевого компонента на графике программного комплекса MATLAB в зависимости от модифицированного массообменного критерия Померанцева при $Fo_m = 0,1$; $Bi_m = 1$; $K_m = 0,5$; $Z_p(0) = 0,5$

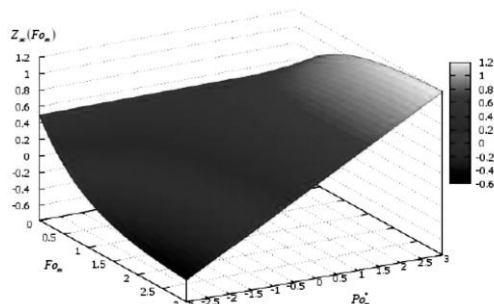


Рис. 4. Динамика изменения профиля безразмерной концентрации целевого компонента на графике программного комплекса MATLAB в жидкой фазе в зависимости от модифицированных массообменных критериев Померанцева и Фурье при $Bi_m = 1$; $K_m = 0,5$; $Z_p(0) = 0,5$

Общность математического описания позволит распространить разработанные математические модели и предложенные методы расчета для различных видов коррозии бетона с учетом экспериментально определяемых коэффициентов массопереноса.

Важность данных исследований заключается в их практическом применении¹, которые можно использовать при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений с целью прогнозирования срока их службы и долговечности.

¹ 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; Каюмов Р. А., Федосов С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А., Манохина Ю. В., Красильников И. В. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда – цементный бетон». Частные случаи решения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 4 (26). – С. 343–348; Федосов С. В., Румянцева В. Е., Коновалова В. С., Гоглев И. Н. Явления массопереноса в системе «цементный раствор – композитная пластиковая арматура» на стадии структурообразования композита. Часть 1. Физические представления и математическая постановка задачи // Academia. Архитектура и строительство. – 2020. – № 1. – С. 118–123.

Литература

- Василенко М. И., Гончарова Е. Н. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 4–4. – С. 886–891.
- Дрозд Г. Я. Микроскопические грибы как фактор биоповреждений жилых, гражданских и промышленных зданий. – Макеевка: [б. и.], 1995. – 18 с.
- Ерофеев В. Т., Федорцов А. П., Богатов А. Д., Федорцов В. А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12–4. – С. 708–716.
- Касьяненко Н. С. Процессы массопереноса при жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2010. – 156 с.
- Каюмов Р. А., Федосов С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А., Манохина Ю. В., Красильников И. В. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда – цементный бетон». Частные случаи решения // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2013. – № 4 (26). – С. 343–348.
- Красильников И. В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2016. – 159 с.
- Москвин В. М. Коррозия бетона. – Москва: Госстройиздат, 1952. – 344 с.
- 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.
- Семенов С. А., Гумаргалиева К. З., Калинина И. Г., Заиков Г. Е. Био-разрушения материалов и изделий техники // *Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова*. – 2007. – Т. 2. – № 6. – С. 3–26.
- Степанова В. Ф. Долговечность бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. – 126 с.
- Федосов С. В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона. – Москва: Ассоциация строительных вузов, 2003. – 193 с.
- Федосов С. В., Румянцева В. Е., Касьяненко Н. С., Красильников И. В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2015. – Т. 58. – № 1. – С. 97–99.
- Федосов С. В., Румянцева В. Е., Коновалова В. С., Гоглев И. Н. Явления массопереноса в системе «цементный раствор – композитная пластиковая арматура» на стадии структурообразования композита. Часть 1. Физические представления и математическая постановка задачи // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2020. – № 1. – С. 118–123.
- Федосов С. В., Румянцева В. Е., Коновалова В. С., Гоглев И. Н., Нармания Б. Е. Управление процессами коррозионной деструкции строительных материалов на основе законов массопереноса // *Вестник гражданских инженеров*. – 2019. – № 3 (74). – С. 106–111.
- 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.
- Федосов С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А., Шестеркин М. Е. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // *Строительные материалы*. – 2015. – № 3. – С. 8–11.

Шестеркин М. Е. Массообменные процессы при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: [б. и.], 2015. – 181 с.

References

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

Drozd G. Ia. Mikroskopicheskie griby kak faktor biopovrezhdenii zhilykh, grazhdanskikh i promyshlennykh zdanii [Microscopic fungi as a factor of biodeterioration of residential, civic and industrial buildings]. Makeevka, 1995. 18 p.

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

Kas'ianenko N. S. *Protsessy massoperenosa pri zhidkostnoi korrozii vtorogo vida tsementnykh betonov* [Processes of mass transfer related to the II type liquid corrosion of cement concrete: PhD thesis in Technology]. Ivanovo, 2010. 156 p.

Kaïumov R. A., Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Khrunov V. A., Manokhina Iu. V., Krasil'nikov I. V. Matematicheskoe modelirovanie korroziionnogo massoperenosa geterogennoi sistemy “zhidkaia agressivnaia sreda – tsementnyi beton”. Chastnye sluchai resheniia [Mathematical modeling of corrosion mass transfer of the heterogeneous system “corrosive liquids – cement concrete”. Special cases of the solutions]. *Izvestiia Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2013, no. 4 (26), pp. 343–348.

Krasil'nikov I. V. *Issledovanie protsessov massoperenosa pri zhidkostnoi korrozii pervogo vida tsementnykh betonov s ucheto deistviia vnutrennikh istochnikov massy* [Research into the processes of mass transfer related to the I type liquid corrosion of cement concrete with reference to internal sources of mass: PhD thesis in Technology]. Ivanovo, 2016. 159 p.

Moskvina V. M. *Korroziia betona* [Concrete corrosion]. Moscow: Gosstroizdat, 1952. 344 p.

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

Semenov S. A., Gumargalieva K. Z., Kalinina I. G., Zaikov G. E. Bio-razrusheniia materialov i izdelii tekhniki [Bio-damage of materials and material samples]. *Vestnik MITKhT im. M. V. Lomonosova* [Vestnik of Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies], 2007, vol. 2, no. 6, pp. 3–26.

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

Fedosov S. V., Bazanov S. M. *Sul'fatnaia korroziia betona* [Sulphate corrosion of concrete]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2003. 193 p.

Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Kas'ianenko N. S., Krasil'nikov I. V. Nestatsionarnyi massoperenos v protsessakh korrozii vtorogo vida tsementnykh betonov. Malye znacheniiia chisel Fur'e, s vnutrennim istochnikom massy [Unsteady mass transfer in processes of type II corrosion of cement concrete. Small values of Fourier numbers with the internal source of mass]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriia: Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiia* [Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology], 2015, vol. 58, no. 1, pp. 97–99.

Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Konovalova V. S., Goglev I. N. Iavleniia massoperenosa v sisteme "tsementnyi rastvor – kompozitnaia plastikovaia armatura" na stadii strukturoobrazovaniia kompozita. Chast' 1. Fizicheskie predstavleniia i matematicheskaia postanovka zadachi [Mass transfer phenomena in the system "cement mortar – fiberglass reinforcement" at the stage of composite structure formation. Part 1. Physical representations and mathematical statement of the problem]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction], 2020, no. 1, pp. 118–123.

Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Konovalova V. S., Goglev I. N., Narmaniiia B. E. Upravlenie protsessami korrozionnoi destruktssii stroitel'nykh materialov na osnove zakonov massoperenosa [Control of corrosion destruction processes of building materials on the basis of mass transfer laws]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2019, no. 3 (74), pp. 106–111.

Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Krasil'nikov I. V., Loginova S. A. Issledovanie vliianiia protsessov massoperenosa na nadezhnost' i dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruktssii, 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.

Fedosov S. V., Rumiantseva V. E., Khrunov V. A., Shesterkin M. E. O nekotorykh problemakh tekhnologii bezopasnosti i dolgovechnosti zdanii, sooruzhenii i inzhenernoi infrastruktury [On some problems of security technology and durability of buildings, construction systems and engineering infrastructure]. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials], 2015, no. 3, pp. 8–11.

Shesterkin M. E. *Massoobmennye protsessy pri zhidkostnoi korrozii pervogo vida tsementnykh betonov s uchedom vliianiia svoistv portlandsementa* [Mass exchanging processes related to the I type liquid corrosion of cement concrete with reference to Portland cement characteristics: PhD thesis in Technology]. Ivanovo, 2015. 181 p.

Для цитирования: Логинова С. А., Гоглев И. Н. Моделирование кинетики и динамики протекания массопереноса при различных видах коррозии цементных бетонов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 22–35. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-2

For citation: Loginova S. A., Goglev I. N. Modeling the kinetics and dynamics of mass transfer during various types of cement concrete corrosion. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 6 (99), pp. 22–35. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-2