

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИИ АРМАТУРЫ
В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ
НА ОБЪЕКТЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ^{1,2}, В. Л. ТКАЛИЧ^{1*}, О. И. ПИРОЖНИКОВА¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru

²Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Для того чтобы иметь возможность прогнозировать безопасное состояние железобетонных конструкций на объектах транспортной инфраструктуры, очень важно знать направления раскрытия трещин в бетоне. Появление трещин обусловлено процессами коррозии, т.е. образованием гидратированной окиси железа (гидроксид железа) и увеличением ее количества на арматуре. Особенно опасны случаи, когда железобетонные конструкции изготовлены с нарушением требований. Рассмотрен случай применения различных по диаметру стержней стальной арматуры. Представленные результаты расчетов, полученные при помощи математического моделирования нелинейного поведения процессов коррозии и следующих вследствие этого деформации и разрушения структуры бетона, показывают модельные формы и направленность раскрытия трещин.

Ключевые слова: арматура, деформация, железобетонная конструкция, коррозия, математическое моделирование, уравнение Нернста—Планка, трещина, физико-химические реакции

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-5323.2022.4.

Ссылка для цитирования: Коробейников А. Г., Ткалич В. Л., Пирожникова О. И. Моделирование процесса коррозии арматуры в железобетонной конструкции на объекте транспортной инфраструктуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 6. С. 483—488. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-483-488.

**MODELING THE REINFORCEMENT CORROSION PROCESS
IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURE
AT THE OBJECT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE**

A. G. Korobeynikov^{1,2}, V. L. Tkalich^{1*}, O. I. Pirozhnikova¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia

Abstract. To predict the safe state of reinforced concrete structures at transport infrastructure facilities, information on directions of crack opening in such structures is of principle importance. The cracks appearance is due to formation and increase in the amount of hydrated iron oxide (iron hydroxide) on the reinforcing bars, that is, caused by corrosion processes. Particularly dangerous are cases when reinforced concrete structures are manufactured in violation of the requirements. The paper considers a case of using steel reinforcement pins of different diameters. The presented results of calculations obtained using mathematical modeling of the nonlinear behavior of corrosion processes and the resulting deformation and structural destruction of concrete show the model forms and direction of crack opening.

Keywords: reinforcement, deformation, reinforced concrete structure, corrosion, mathematical modeling, Nernst–Planck equation, crack, physical and chemical reactions

Acknowledgment: the work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. MK-5323.2022.4.

For citation: Korobeynikov A. G., Tkalich V. L., Pirozhnikova O. I. Modeling the reinforcement corrosion process in reinforced concrete structure at the object of transport infrastructure. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 6. P. 483—488 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-6-483-488.

Введение. Многие объекты транспортной инфраструктуры содержат железобетонные конструкции (ЖБК), например, автодорожные или железнодорожные мосты. Известно, что коррозия стальной арматуры — одна из основных причин разрушения ЖБК мостовых сооружений [1, 2]. Это связано с воздействием на ЖБК во время эксплуатации различных негативных факторов: агрессивная атмосфера, осадки, влажность, конденсация влаги, знакопеременные механические нагрузки. Действие таких факторов приводит к зарождению и развитию коррозионных процессов. Одним из результатов этого становится появление трещин в бетоне. В настоящей работе в основном используются термины и понятия, определенные в ГОСТ 27.002–2015*.

В связи с особой значимостью объектов транспортной инфраструктуры разработка методов прогнозирования развития коррозионных процессов в арматуре, входящей в их ЖБК, является актуальной задачей.

Расширяющая сила образования ржавчины, которую также называют оксидным домкратом, или взрыв ржавчины, — это явление, вызывающее повреждение ЖБК вследствие того, что расширение корродированной арматуры приводит к растрескиванию бетона.

Коррозия возникает в различных случаях. Причиной возникновения служат физико-химические разрушения ЖБК, связанные с карбонизацией бетона [1], а также блуждающие токи (БТ), появляющиеся в результате утечки электроэнергии с электрифицированного железнодорожного полотна [3]. Катодная зона возникает в месте входа БТ в ЖБК, анодная — в месте выхода. Практика показала, что скорость коррозии арматуры БТ выше скорости разрушения вследствие химической коррозии.

Одним из первых, кто использовал математическое моделирование для изучения коррозийных процессов в бетоне и железобетоне, был А. Ф. Полак [4, 5]. Он рассматривал коррозию как совокупность элементарных, известных на то время, процессов. Далее он составлял систему дифференциальных уравнений, описывающих эти процессы.

Для моделирования коррозийных процессов применяют различные подходы, например, базирующиеся на экспериментальных данных. Сами данные получают в реальном масштабе времени в ходе мониторинга поверхностных слоев ЖБК. Так, в [1] представлен разработанный метод „устанавливающий связи между величиной раскрытия продольной трещины на внешней поверхности и объемом продуктов коррозии“. Одно из направлений, связанных с развитием обозначенного метода, представлено в [6]. Тем не менее, необходимо отметить и недостатки этого метода: использование исключительно линейно-упругих моделей материалов ЖБК и анализ исключительно простейших балочных аналогий.

В настоящей работе представлены результаты расчетов, полученные при помощи математического моделирования (ММ) нелинейных процессов коррозии и следующих вследствие этого деформации и разрушения структуры бетона. При помощи этих результатов можно оценивать модельные формы и направленность раскрытия трещин.

Постановка задачи и основные уравнения процесса образования коррозии. ММ процесса коррозии арматуры в ЖБК базируется на уравнении Нернста—Планка [7], которое включает три транспортных составляющих: диффузию, электропотенциал и конвекцию.

Величина электропроводности ЖБК связана с уровнем насыщения пор в бетоне водой, выступающей в роли электролита. В этом случае на начальном этапе происходит диффузия кислорода с открытой наружной поверхности ЖБК. Затем, после микровзаимодействий с поверхностью арматуры, начинаются реакции восстановления кислорода и окисления железа. Продуктом реакции является слой оксида железа (Fe_2O_3), благодаря которому увеличивается объем, занимаемый стальным стержнем.

* ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.

В разработанной ММ возникновение и развитие трещин в ЖБК (т.е. повреждение ЖБК) описывается при помощи скалярной переменной повреждения d . Ее численное значение характеризует степень разрушения в зависимости от роста трещины. Формально это выражается в следующем виде:

$$\sigma = (1-d) \cdot C \cdot \varepsilon,$$

где σ — тензор напряжений; C — матрица упругости; ε — тензор деформации.

Превышение критического уровня напряжения или деформации в упругой фазе запускает нелинейную фазу разрушения. Другими словами, разрушение бетона начинается, когда уровень напряжения превышает прочность бетона на растяжение.

Средняя поверхностная деформация арматурного стержня рассчитывается на основе толщины оксидного слоя по формуле:

$$\varepsilon_A = \frac{\int s_{\text{оксид}} d\Omega}{\pi r_{\text{стержня}}^2},$$

где $s_{\text{оксид}}$ — толщина слоя оксида железа вдоль границы раздела „арматура—бетон“; $r_{\text{стержня}}$ — радиус стержня; Ω — область интегрирования.

Деформации в направлениях x и y задаются формулой:

$$\varepsilon_{0,x} = \varepsilon_{0,y} = \frac{\varepsilon_A}{2}.$$

Сказанное выше характеризует коррозию металла арматуры в ЖБК как сложный физико-химический процесс. Поэтому при разработке ММ этого процесса были использованы уравнения:

- баланса массы и заряда в электролите;
- баланса заряда в электродах (с учетом образования резистивных пленок);
- кинетики электрохимических реакций;
- межфазной границы для учета изменения геометрии электродов;
- учета теплового эффекта электрохимических реакций;
- конвективной диффузии в электролите.

Как было сказано выше, процесс коррозии происходит за счет восстановления кислорода с образованием оксидного слоя. В этом случае перенос заряда и кислорода моделируется в конкретной области, где проводимость электролита и коэффициент диффузии кислорода зависят от влажности. Сталь арматуры и бетон рассматриваются как линейно-упругие материалы, объемная деформация которых на каждом временном шаге зависит от толщины оксидного слоя. Растрескивание в бетоне, вызванное объемным расширением из-за образования оксида, учитывается с использованием скалярной модели повреждений.

Формально в общем виде уравнение Нернста—Планка для расчета переноса ионов в электролите за счет конвекции, диффузии и электрохимических эффектов можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i - z_i \mathbf{u}_i F c_i \nabla \phi + c_i \mathbf{u}_i, \\ \frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_i = R_i, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{N}_i — вектор i -го диффузионного потока; R_i — источник гомогенной реакции в электролите (коррозии); D_i — коэффициент диффузии i -го компонента; c_i — концентрация i -го компонента; z_i — зарядовое число (валентность) i -го ионного компонента; \mathbf{u}_i — вектор параметров, описывающих течение электролита; $u_{m,i}$ — подвижность i -го ионного

компонент в электролите; F — постоянная Фарадея; ϕ — электрический потенциал; t — время; ∇ — оператор набла.

Электрический ток в электролите возникает вследствие перемещений ионов. В этом случае вектор плотности тока J_l , согласно закону Фарадея [8], составит:

$$J_l = F \sum_i z_i N_i .$$

В этом случае при помощи уравнения Пуассона можно описать электрическое поле в электролите, зависящее от вектора плотности тока J_l [8]:

$$\nabla(-e\nabla\phi) = J_l , \quad (2)$$

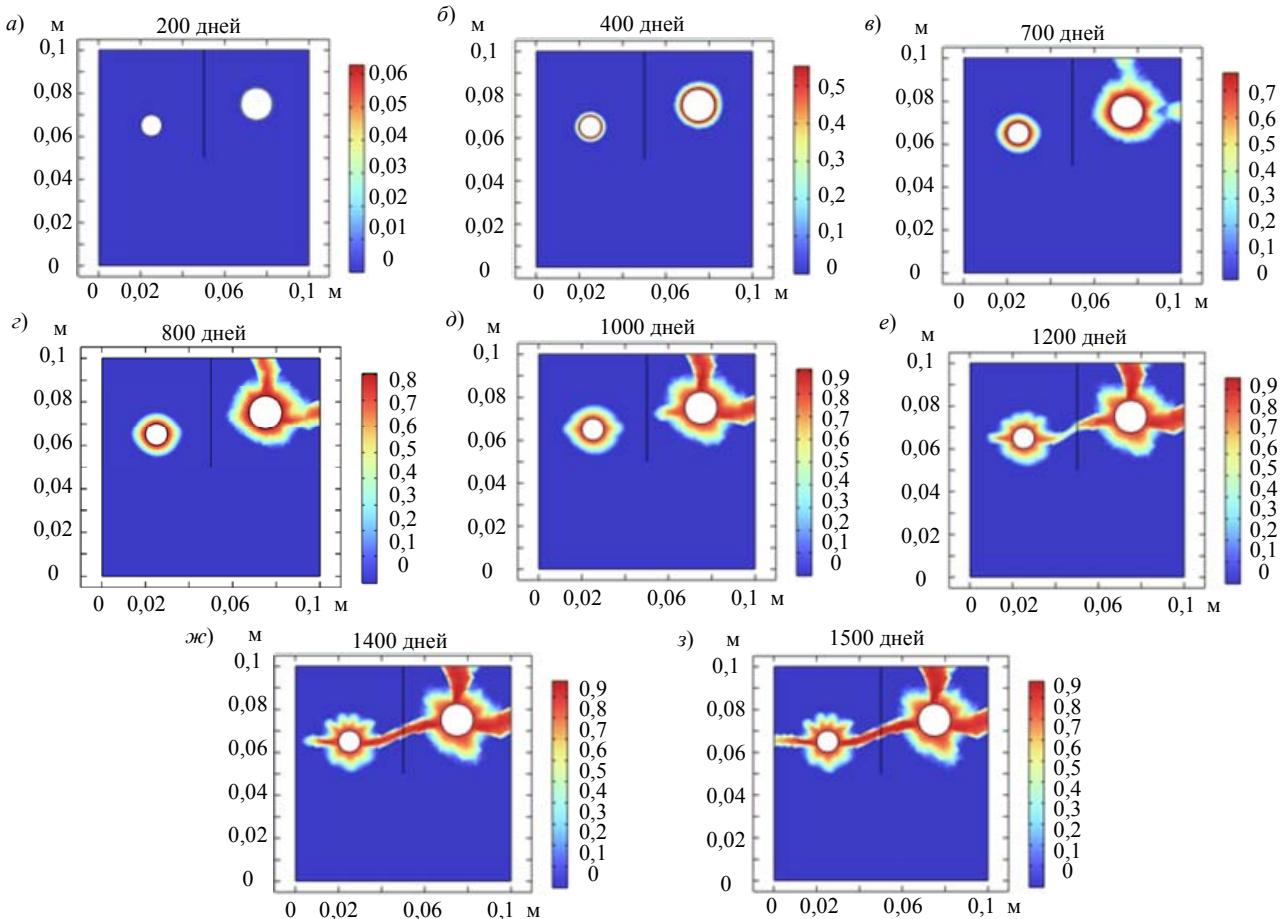
где e — диэлектрическая проницаемость среды.

Отсюда следует, что входящая в уравнения (1) величина $\nabla\phi$ может быть определена из уравнения (2). Систему уравнений (1) и (2) необходимо дополнить соответствующими начальными и граничными условиями.

Таким образом, найдено численное решение краевой задачи для системы уравнений Нернста—Планка и Пуассона в области пространственного заряда.

Результаты моделирования. Проверка разработанной ММ выполнена в системе MatLab, позволяющей решать задачи в различных предметных областях [9—11].

На рисунке представлены результаты компьютерного моделирования процесса разрушения ЖБК с двумя стальными стержнями разного диаметра под воздействием оксидного домкрата.



Время для моделирования процесса коррозии (взрыв ржавчины) задано в 1500 дней. Из рисунка, *a*, видно, что через 200 дней процесс коррозии достаточно слабо повлиял на состояние ЖБК. Появление первых разрушений (через 400 дней) представлено на рисунке, *b*. То, что процесс разрушения достиг края ЖБК через 700 дней, видно на рисунке, *c*. Из рисунка, *g*,

видно усиление воздействия оксидного домкрата (шкала справа). На рисунке, *д*, видно начало процесса распространения разрушения по направлению к стержню меньшего диаметра. Рисунок, *е*, отражает слияние областей разрушения от стержней. На рисунке, *ж*, видно начало процесса распространения разрушения от стержня меньшего диаметра по направлению к краю ЖБК. На рисунке, *з*, видно, что процесс разрушения ЖБК от меньшего стержня меньшего диаметра достиг края.

Заключение. Полученные результаты показывают, что:

- в ЖБК с арматурой разного диаметра процессы оксидного домкрата более выражены для стержня большого диаметра. Поэтому и разрушения в этом месте ЖБК более значительны;
- процессы разрушения для стержня большого диаметра провоцируют усиление разрушения ЖБК в окрестности стержня меньшего диаметра;
- использование ЖБК ограничено во времени;
- необходимо развивать методы защиты ЖБК от оксидного домкрата.

Кроме того, представленные результаты дают основание утверждать, что применение моделирования вносит серьезный вклад в решение задачи безопасной эксплуатации ЖБК объектов транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов // Бетон и железобетон. 2000. № 2. С. 20—23.
2. Лихачев В. А., Глушков Е. Д. Коррозия и защита строительных конструкций: учеб. пособие. Киров: ВятГУ, 2012. 96 с.
3. Россина Н. Г., Попов Н. А., Жилякова М. А., Корелин А. В. Коррозия и защита металлов. В 2 ч. Ч. 1. Методы исследований коррозионных процессов: учеб.-метод. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 108 с. [Электронный ресурс]: <https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1/978-5-7996-2578-8_2019.pdf>.
4. Полак А. Ф. Моделирование коррозии железобетона и прогнозирование его долговечности // Итоги науки и техники. Коррозия и защита от коррозии. Т. XI. М.: ВИНТИ, 1986. С. 136—180.
5. Полак А. Ф. Физико-химические основы коррозии железобетона. Уфа: УНИ, 1982. 76 с.
6. Бенин А. В., Невзоров Н. И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в железобетонных элементах по величине раскрытия трещины в защитном слое бетона // Стройт. механика инж. конструкций и сооружений. 2007. № 3. С. 48—52.
7. Tournassat C., Steefel C. I., & Gimmi T. Solving the Nernst-Planck equation in heterogeneous porous media with finite volume methods: Averaging approaches at interfaces // Water Resources Research. 2020. Vol. 56. P. e2019WR026832. <https://doi.org/10.1029/2019WR026832>.
8. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурина В. Л. Теоретические основы электротехники. Т. 1. СПб: Питер, 2003. 463 с. [Электронный ресурс]: <<https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOLGANOVAJULIA/academics/Tab7/Tab2/%D0%A2%D0%9E%D0%AD%20%D1%87.1.pdf>>.
9. Грищенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Алгоритм поиска, некоторые свойства и применение матриц с комплексными значениями элементов для стеганографии и синтеза широкополосных сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 5. С. 9.
10. Коробейников А. Г., Грищенцев А. Ю., Святкина М. Н. Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 9—20.
11. Korobeynikov A. G., Grishentsev A. Y., Velichko E. N., Aleksanin S. A., Fedosovskii M. E., Bondarenko I. B., Korikov C. C. Calculation of Regularization Parameter in the Problem of Blur Removal in Digital Image // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25, N 3. P. 184—191.

Сведения об авторах

- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; профессор; Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН; зам. директора по науке;
E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Вера Леонидовна Ткалич** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; доцент;
E-mail: Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru
- Ольга Игоревна Пирожникова** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий; доцент;
E-mail: cheesecake@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023; одобрена после рецензирования 01.02.2023; принята к публикации 27.04.2023.

REFERENCES

1. Vasil'yev A.I. *Beton i zhelezobeton*, 2000, no. 2, pp. 20–23. (in Russ.)
2. Likhachev V.A., Glushkov E.D. *Korroziya i zashchita stroitel'nykh konstruktsiy* (Corrosion and Protection of Building Structures), Kirov, 2012, 96 p. (in Russ.)
3. Rossina N.G., Popov N.A., Zhilyakova M.A., Korelin A.V. *Korroziya i zashchita metallov. V 2 chastyakh Chast' 1. Metody issledovaniy korrozionnykh protsessov* (Corrosion and Protection of Metals. In 2 parts Part 1. Methods for Studying Corrosion Processes), Yekaterinburg, 2019, 108 p., https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/68495/1/978-5-7996-2578-8_2019.pdf. (in Russ.)
4. Polak A.F. *Modelirovaniye korrozii zhelezobetona i prognozirovaniye yego dolgovechnosti. Itogi nauki i tekhniki Korroziya i zashchita ot korrozii. Tom XI* (Modeling Corrosion of Reinforced Concrete and Predicting Its Durability. In: Results of Science and Technology Corrosion and Protection Against Corrosion. Volume XI) Moscow, 1986, pp. 136–180. (in Russ.)
5. Polak A.F. *Fiziko-khimicheskiye osnovy korrozii zhelezobetona* (Physical and Chemical Bases of Reinforced Concrete Corrosion), Ufa, 1982, 76 p. (in Russ.)
6. Benin A.V., Nevzorov N.I. *Structural mechanics of engineering structures and facilities*, 2007, no. 3, pp. 48–52. (in Russ.)
7. Tournassat C., Steefel C.I., & Gimmi T. *Water Resources Research*, 2020, vol. 56, art. 2019WR026832, <https://doi.org/10.1029/2019WR026832>.
8. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Tom 1* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Volume 1), St. Petersburg, 2003, 463 p. <https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOLGANOVAJULIA/academics/Tab7/Tab2/%D0%A2%D0%9E%D0%AD%20%D1%87.1.pdf>. (in Russ.)
9. Grishentsev A.Yu., Korobeinikov A.G. *Journal of Radio Electronics*, 2016, no. 5, pp. 9. (in Russ.)
10. Korobeinikov A.G., Grishentsev A.Yu., Svyatkina M.N. *Cybernetics and programming*, 2013, no. 3, pp. 9–20. (in Russ.)
11. Korobeinikov A.G., Grishentsev A.Y., Velichko E.N., Aleksanin S.A., Fedosovskii M.E., Bondarenko I.B., Korikov C.C. *Optical Memory & Neural Networks* (Information Optics), 2016, no. 3(25), pp. 184–191.

Data on authors

- Anatoly G. Korobeynikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Information Security and Computer Technologies; Professor; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, St. Petersburg Branch; Deputy Director for Science;
E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru
- Vera L. Tkalich** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Information Security and Computer Technologies; Associate Professor;
E-mail: Vera_Leonidovna_Tkalich@mail.ru
- Olga I. Pirozhnikova** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Information Security and Computer Technologies; Associate Professor;
E-mail: cheesecake@mail.ru

Received 23.01.2023; approved after reviewing 01.02.2023; accepted for publication 27.04.2023.