

S.V. FEDOSOV¹, V.N. FEDOSEEV², P.B. RAZGOVOROV³, S.A. LOGINOVA³

¹NRU «Moscow State University of Civil Engineering», Moscow, Russia

²Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

³Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

PREDICTING THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES WITH REGARD TO MASS TRANSFER AND PORE COLMATATIONS DURING CORROSION

Abstract. *The object of research is the corrosion process of destruction of concrete and reinforced concrete structures in aggressive media. The purpose of the investigation is to establish a set of relationships and ratio between the characteristics of this process and various external and internal factors that affect the growth of corrosion. To solve the tasks set on the basis of the obtained experimental data, the method of mathematical modeling of corrosion processes was applied. The theories of physical and chemical transformations and heat and mass transfer laws suggest that different stages of corrosion can be simulated by differential equations of interrelated heat and mass transfer with boundary conditions. They are defined by arbitrary functions of initial transfer potentials and nonlinear boundary conditions of all known types. The possibilities of developed physical and mathematical models of mass transfer in the processes of studying corrosion of various types are demonstrated. They allow to evaluate the concentration of the transported component throughout the thickness of the concrete structure and in the biofilm itself at any time, as well as the concentration of "free" calcium hydroxide in the liquid phase. As a result, it is succeeded to predict the durability and reliability of concrete structures with a minimum error. The proposed author's model of the destruction of cement concretes, taking into account the colmatation of pores and capillaries, ensures the adequacy of judgments about the kinetics of mass transfer processes during corrosion of the II type.*

Keywords: *corrosion, mathematical model, porous and non-porous materials, colmatation.*

С.В. ФЕДОСОВ¹, В.Н. ФЕДОСЕЕВ², П.Б. РАЗГОВОРОВ³, С.А. ЛОГИНОВА³

¹НИУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново, Россия

³ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ МАССОПЕРЕНОСА И КОЛЬМАТАЦИИ ПОР ПРИ КОРРОЗИИ

Аннотация. *Объектом исследования является коррозионный процесс разрушения бетонных и железобетонных конструкций в агрессивных средах. Цель исследования – установление совокупности соотношений и взаимосвязи характеристик указанного процесса с различными внешними и внутренними факторами, влияющими на развитие коррозии. Для решения поставленных задач на основании полученных экспериментальных данных применялся метод математического моделирования коррозионных процессов. С позиции теорий физико-химических превращений и теплообменных закономерностей, различные стадии коррозии могут моделироваться дифференциальными уравнениями взаимосвязанного теплообмена с крайними условиями. Их характеризуют произвольные функции начальных потенциалов переноса и нелинейные граничные условия всех известных типов. Продемонстрированы возможности разработанных физико-математических моделей*

© Федосов С.В., Федосеев В.Н., Разговоров П.Б., Логинова С.А., 2022

массопереноса в процессах изучения коррозии различных видов. Они позволяют оценить концентрации переносимого компонента по толщине бетонной конструкции и в самой биопленке в любой момент времени, а также концентрации «свободного» гидроксида кальция в жидкой фазе. В результате удастся прогнозировать долговечность и надежность бетонных конструкций с минимальной погрешностью. Предлагаемая авторская модель разрушения цементных бетонов с учетом кольтматации пор и капилляров обеспечивает адекватность суждений о кинетике массообменных процессов при коррозии второго вида.

Ключевые слова: *коррозия, математическая модель, пористые и непористые материалы, кольтматация.*

REFERENCES

1. Kurdowski W. Cement and concrete chemistry. 97894007794572014.
2. Saraswathy V., Karthick S., Lee, H.S., Kwon S.J., Yang H.M. Comparative Study of Strength and Corrosion Resistant Properties of Plain and Blended Cement Concrete Types. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. doi:10.1155/2017/9454982.
3. Terenchuk S., Pashko A., Yeremenko B., Kartavykh S., Ershov N. Modeling an intelligent system for the estimation of technical state of construction structures. *Eastern-European Journal of EnterpriseTechnologies*. 2018. 3(2–93). doi:10.15587/1729-4061.2018.132587.
4. Wasim M., Duc Ngo T., Abid M. Investigation of long-term corrosion resistance of reinforced concrete structures constructed with various types of concretes in marine and various climate environments. *Construction and Building Materials*. 2020. 237. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117701.
5. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Narmania B.E. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. 13(2). doi:10.22337/2587-9618-2017-13-2-45-49.
6. Gusev B.V., Faivusovich A.S. *Mathematical models of concrete corrosion process*. M.: 1996. 100 p.
7. Levandovskiy A.N., Melnikov B.E., Shamkin A.A. Modeling of porous material fracture. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 69(1). doi:10.18720/MCE.69.1.
8. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Rodin A.I., Smirnov V.F., Rodina N.G. Development of Biocidal Cements for Buildings and Structures with Biologically Active Environments. *Power Technology and Engineering*. 2017. 51(4). doi:10.1007/s10749-017-0842-8.
9. Fedosov S.V., Loginova S.A. Mathematical model of concrete biological corrosion. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 99(7). doi:10.18720/MCE.99.6.
10. Jack T.R. *Biological Corrosion Failures*. Failure Analysis and Prevention. 2021.
11. Mullard J.A., Stewart M.G. Corrosion-induced cover cracking: New test data and predictive models. *ACI Structural Journal*. 2011. 108(1). doi:10.14359/51664204.
12. Golovin K., Kovalev R., Kopylov A. On modelling the reliability of concrete support for underground construction considering the impact of chemical erosion. *E3S Web of Conferences*. 2019. 105. doi:10.1051/e3sconf/201910501040.
13. Steffens A., Dinkler D., Ahrens H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. *Cement and Concrete Research*. 2002. 32(6). doi:10.1016/S0008-8846(02)00728-7.
14. Soleimani S., Ghods P., Isgor O.B., Zhang J. Modeling the kinetics of corrosion in concrete patch repairs and identification of governing parameters. *Cement and Concrete Composites*. 2010. 32(5). doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.02.001.
15. Fatima T., Arab N., Zemskov E.P., Muntean A. Homogenization of a reaction-diffusion system modeling sulfate corrosion of concrete in locally periodic perforated domains. *Journal of Engineering Mathematics*. 2011. 69(2). doi:10.1007/s10665-010-9396-6.
16. Aiki T., Muntean A. Large-time behavior of a two-scale semilinear reaction-diffusion system for concrete sulfation. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2015. 38(7). doi:10.1002/mma.3161.
17. Hoang N.D., Chen C.T., Liao K.W. Prediction of chloride diffusion in cement mortar using Multi-Gene Genetic Programming and Multivariate Adaptive Regression Splines. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2017. 112. doi:10.1016/j.measurement.2017.08.031.
18. Yang Y., Wang M. Pore-scale modeling of chloride ion diffusion in cement microstructures. *Cement and Concrete Composites*. 2018. 85. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.09.014.
19. Zhang G., Yang Z., Yan Y., Wang M., Wu L., Lei H., Gu Y. Experimental and theoretical prediction model research on concrete elastic modulus influenced by aggregate gradation and porosity. *Sustainability (Switzerland)*. 2021. 13(4). doi:10.3390/su13041811.

20. Roumyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A., Truntov P.S., Burkov A.A. Development and Research of Properties Cement Concrete Hardening Accelerator Additive Based on a Mixture of Inorganic Fluorine-Containing Salts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 753(5). doi:10.1088/1757-899X/753/5/052026.
21. Woyciechowski P., Łukowski P., Szmigiera E., Adamczewski G., Chilmon K., Spodzieja S. Concrete corrosion in a wastewater treatment plant – A comprehensive case study. Construction and Building Materials. 2021. 303. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124388.
22. Davis J.L., Nica D., Shields K., Roberts D.J. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. International Biodeterioration and Biodegradation. 1998. 42(1). doi:10.1016/S0964-8305(98)00049-3.
23. Shuldyakov K., Trofimov B., Kramar L. Stable microstructure of hardened cement paste – A guarantee of the durability of concrete. Case Studies in Construction Materials. 2020. 12. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00351.
24. Slizneva T.E., Akulova M.V., Razgovorov P.B. Influence of mechanomagnetic activation of solutions CaCl₂ and Na₂S₂O₃ on phase structure of cement stone. ChemChemTech. 2019. 62(12). doi:10.6060/ivkkt.20196212.6114.
25. Koksharov S.A., Bazanov A.V., Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.E. Condition of the mechanoactivated calcium chloride solution and its influence on structural and mechanical characteristics of cement stone. Eurasian Chemico-Technological Journal. 2015. 17(4). doi:10.18321/ectj277.
26. Vu K., Stewart M.G., Mullard J. Corrosion-induced cracking: Experimental data and predictive models. ACI Structural Journal. 2005. doi:10.14359/14667.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдовский В. Химия цемента и бетона. 97894007794572014.
2. Сарасвати В., Картик С., Ли Х.С., Квон С.Дж., Янг Х.М. Сравнительное исследование прочностных и коррозионностойких свойств простого и смешанного цементного бетона. Достижения в области материаловедения и инженерии. 2017. doi:10.1155/2017/9454982 .
3. Теренчук С., Пашко А., Еременко Б., Картавых С., Ершов Н. Моделирование интеллектуальной системы оценки технического состояния строительных конструкций. Восточно-Европейский журнал предпринимательских технологий. 2018. 3(2–93). doi:10.15587/1729-4061.2018.132587.
4. Васим М., Дук Нго Т., Абид М. Исследование долговременной коррозионной стойкости железобетонных конструкций, построенных из различных типов бетонов в морских и различных климатических условиях. Строительство и Строительные материалы. 2020. 237. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117701.
5. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Нармания Б.Е. Постановка математической задачи, описывающей физико-химические процессы при коррозии бетона. Международный журнал вычислительной гражданской и строительной инженерии. 2017. 13(2). doi:10.22337/2587-9618-2017-13-2-45-49.
6. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Математические модели процесса коррозии бетона. М.: 1996. 100 с.
7. Левандовский А.Н., Мельников Б.Е., Шамкин А.А. Моделирование разрушения пористых материалов. Журнал гражданского строительства. 2017. 69(1). doi:10.18720/МСЕ.69.1.
8. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Родин А.И., Смирнов В.Ф., Родина Н.Г. Разработка биоцидных цементов для зданий и сооружений с биологически активными средами. Энергетические технологии и инжиниринг. 2017. 51(4). doi:10.1007/s10749-017-0842-8 .
9. Федосов С.В., Логинова С.А. Математическая модель биологической коррозии бетона. Журнал гражданского строительства. 2020. 99(7). doi:10.18720/МСЕ.99.6.
10. Джек Т.Р. Биологические коррозионные разрушения. Анализ и предотвращение отказов. 2021.
11. Маллард Дж.А., Стюарт М.Г. Растрескивание покрытия, вызванное коррозией: новые данные испытаний и прогнозные модели. Структурный журнал АСІ. 2011. 108(1). doi:10.14359/51664204.
12. Головин К., Ковалев Р., Копылов А. О моделировании надежности бетонной опоры для подземного строительства с учетом воздействия химической эрозии. Веб-конференция E3S. 2019. 105. doi:10.1051/e3sconf/201910501040.
13. Стеффенс А., Динклер Д., Аренс Х. Моделирование карбонизации для прогнозирования риска коррозии бетонных конструкций. Исследование цемента и бетона. 2002. 32(6). doi:10.1016/S0008-8846(02)00728-7.
14. Сулеймани С., Годс П., Искор О.Б., Чжан Дж. Моделирование кинетики коррозии при ремонте бетонных заплат и определение управляющих параметров. Цементные и бетонные композиты. 2010. 32(5). doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.02.001.
15. Фатима Т., Араб Н., Земсков Е.П., Мунтян А. Гомогенизация реакционно-диффузионной системы, моделирующей сульфатную коррозию бетона в локально периодических перфорированных областях. Журнал инженерной математики. 2011. 69(2). doi:10.1007/s10665-010-9396-6 .

16. Айки Т., Мунтян А. Поведение двухмасштабной полулинейной реакционно-диффузионной системы для сульфатирования бетона в больших масштабах времени. Математические методы в прикладных науках. 2015. 38(7). doi:10.1002/mma.3161.
17. Хоанг Н.Д., Чен К.Т., Ляо К.В. Прогнозирование диффузии хлоридов в цементном растворе с использованием многогенного генетического программирования и многомерных адаптивных регрессионных сплайнов. Измерение: Журнал Международной конфедерации измерений. 2017. 112. doi:10.1016/j.measurement.2017.08.031.
18. Ян Ю., Ван М. Моделирование диффузии хлорид-ионов в микроструктурах цемента в масштабе пор. Цементные и бетонные композиты. 2018. 85. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.09.014.
19. Чжан Г., Ян З., Ян Ю., Ван М., Ву Л., Лей Х., Гу Ю. Экспериментальное и теоретическое исследование модели прогнозирования модуля упругости бетона под влиянием градации заполнителя и пористости. Устойчивое развитие (Швейцария). 2021. 13(4). doi:10.3390/su13041811.
20. Румянцева В.Е., Гоглев И.Н., Логинова С.А., Трунтов П.С., Бурков А.А. Разработка и исследование свойств добавки-ускорителя твердения цементного бетона на основе смеси неорганических фторсодержащих солей. Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. 2020. 753(5). doi:10.1088/1757-899X/753/5/052026.
21. Войцеховский П., Луковский П., Шмигьера Э., Адамчевски Г., Чилмон К., Сподзья С. Коррозия бетона на очистных сооружениях – комплексное тематическое исследование. Строительство и Строительные материалы. 2021. 303. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124388.
22. Дэвис Дж. Л., Ника Д., Шилдс К., Робертс Д.Дж. Анализ бетона из проржавевшей канализационной трубы. Международное биологическое восстановление и биологическое разложение. 1998. 42(1). doi:10.1016/S0964-8305(98)00049-3.
23. Шульдяков К., Трофимов Б., Крамар Л. Стабильная микроструктура затвердевшего цементного теста – гарантия долговечности бетона. Тематические исследования в области строительных материалов. 2020. 12. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00351.
24. Слизнева Т.Е., Акулова М.В., Разговоров П.Б. Влияние механомагнитной активации растворов CaCl_2 и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ на фазовую структуру цементного камня. ChemChemTech. 2019. 62(12). doi:10.6060/ivkkt.20196212.6114.
25. Кокшаров С.А., Базанов А.В., Федосов С.В., Акулова М.В., Слизнева Т.Е. Состояние механоактивированного раствора хлорида кальция и его влияние на структурно-механические характеристики цементного камня. Евразийский химико-технологический журнал. 2015. 17(4). doi:10.18321/ectj277.
26. Ву К., Стюарт М.Г., Маллард Дж. Коррозионно-индуцированное растрескивание: экспериментальные данные и прогнозные модели. Структурный журнал АСІ. 2005. doi:10.14359/14667.

Информация об авторах:

Федосов Сергей Викторович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов.
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Федосеев Вадим Николаевич

Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства.
E-mail: 4932421318@mail.ru

Разговоров Павел Борисович

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий строительного производства.
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru

Логинова Светлана Андреевна

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций.
E-mail: s179066171227@yandex.ru

Information about the authors:

Fedosov Sergey V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Academician of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor department of building materials.
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

Fedoseev Vadim N.

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor department of production organization and municipal economy.

E-mail: 4932421318@mail.ru

Razgovorov Pavel B.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor department of construction production technologies.

E-mail: razgovorovpb@ystu.ru

Loginova Svetlana A.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,

Ph.D., Associate Professor department of building structures.

E-mail: s179066171227@yandex.ru