УДК 66.018.8

© С. В. Федосов, д-р техн. наук, профессор,
академик РААСН
© В. Е. Румянцева, д-р техн. наук, профессор,
советник РААСН
© В. С. Коновалова, канд. техн. наук, ст. преподаватель
© И. Н. Гоглев, аспирант
© Б. Е. Нармания, студент
(Ивановский государственный политехнический
университет)
E-mail: varrym@gmail.com, fedosov-academic53@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-106-111

© S. V. Fedosov, Dr. Sci. Tech., Professor,
Academician of RAACS
© V. E. Roumyantseva, Dr. Sci. Tech., Professor,
advisor of RAACS
© V. S. Konovalova, PhD in Sci. Tech., senior teacher
© I. N. Goglev, post-graduate student
© B. E. Narmaniya, student
(Ivanovo State Polytechnic University)
E-mail: varrym@gmail.com, fedosov-academic53@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ КОРРОЗИОННОЙ ДЕСТРУКЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОВ МАССОПЕРЕНОСА

CONTROL OF CORROSION DESTRUCTION PROCESSES OF BUILDING MATERIALS ON THE BASIS OF MASS TRANSFER LAWS

Представлены аспекты различных видов коррозии цементных бетонов в агрессивных средах. Показана возможность применения математического моделирования для прогнозирования долговечности строительных материалов. Приведена математическая модель, построенная на основе уравнений массопереноса, позволяющая рассчитывать поля концентраций переносимого целевого компонента по толщине бетонной конструкции, находить среднее значение концентрации в произвольный момент времени, а также определять значение концентраций целевого компонента в жидкой агрессивной среде. Для полученной математической модели отличительной особенностью от известных моделей коррозии бетона является не постоянство величины равновесной концентрации на поверхности твердого тела, а ее зависимость от концентрации целевого компонента в жидкой фазе.

Ключевые слова: коррозия бетона, массоперенос, математическое моделирование, долговечность.

The article considers some corrosion aspects of different types of cement concrete in aggressive environments. The possibility of using mathematical modeling to predict the durability of building materials is shown. The authors present a mathematical model based on mass-transfer equations that allow calculating the concentration fields of the portable «target» component, in accordance with the thickness of the concrete structure, determining the average value of concentration at an arbitrary point in time, and assessing the value of the concentrations of the «target» component in the liquid aggressive medium. A distinctive feature of the obtained mathematical model from the well-known models of corrosion of concrete is not the constancy of the equilibrium concentration on the surface of a solid, but its dependence on the concentration of the component in the liquid phase.

Keywords: concrete corrosion, mass transfer, mathematical modeling, durability.

На современном этапе развития строительной индустрии одним из приоритетных направлений является разработка — на основе классических и новейших теоретических и экспериментальных исследований — эффективных рекомендаций для предотвращения разрушения строительных сооружений и конструкций вследствие коррозии.

По данным Федеральной службы государственной статистики большинство строитель-

ных объектов изношено более чем на 75 %, при этом подавляющий объем износа связан с коррозионными разрушениями. Экономические потери вследствие коррозии огромны. К примеру, в США, по данным NACE (международной ассоциации инженеров-коррозионистов), ущерб от коррозии конструкций и материалов и затраты на преодоление последствий с ней составляют более 3 % от ВВП, что в денежном эквиваленте исчисляется сотнями миллиардов долларов. В Герма-

нии ущерб от влияния коррозионных процессов на объекты строительной индустрии также приближается к 3 % от ВВП. По экспертным оценкам экономические потери от коррозии в промышленно развитых странах составляют 2–4 % от валового национального продукта. По некоторым оценкам [1], на количество подвергнувшегося коррозии металла, включающее вышедшие из строя металлические конструкции, изделия, оборудование, приходится от 10 до 20 % произведенной за год стали. В России отсутствуют официальные данные, отражающие экономический ущерб от коррозии, но, по оценкам некоторых экспертов, он составляет не менее 5 % от ВВП [1].

Как показывают многочисленные исследования, из всего многообразия строительных материалов наиболее коррозионностойкими и, соответственно, долговечными являются изделия и конструкции из природных каменных материалов. Но и они с течением времени разрушаются, а скорость их разрушения зависит не только от минерального состава горных пород, их структуры, фактуры поверхности, принятых решений по защите от выветривания, но и от внешних деструктивных воздействий и влияния различных факторов. Практика эксплуатации строительных изделий и конструкций показывает, что бетон и железобетон сопоставимы с природными каменными материалами по критерию коррозионной стойкости [2, 3].

Разнообразие сред, которые могут воздействовать на бетон и железобетон различных сооружений, и разнообразие условий такого воздействия чрезвычайно усложняют задачу определения характера возникающих коррозионных и деструктивных процессов, которые снижают долговечность конструкций. Поэтому проблема классификации процессов коррозии цементного бетона с выявлением групп, обладающих общими признаками и характеристиками протекающих процессов, до сих пор является актуальной.

Анализ большого экспериментального материала и результатов исследований действия различных агрессивных сред на сооружения и конструкции позволил профессору В. М. Москвину выделить три основных вида коррозии бетона [4].

В соответствии с классическими принципами профессора В. М. Москвина, в первую группу (коррозия бетона I вида) объединены все те

процессы, которые возникают в бетоне при действии на него мягких вод, когда составные части цементного камня растворяются и уносятся проникающей внутрь бетона водой. В результате этого процесса происходит повышение проницаемости и снижение прочностных характеристик бетона [4].

Второй вид коррозии бетона включает процессы, при которых протекают обменные реакции между цементным камнем и агрессивной средой, в результате которых образуются продукты коррозии в виде не обладающей прочностью аморфной массы или легко растворимые системы, которые диффузионно выносятся из структуры цементного камня [4].

Третий вид коррозии бетона характеризуется процессами, в результате которых в порах бетона аккумулируются малорастворимые продукты реакции, при кристаллизации которых происходит увеличение объема [4].

На практике в бетоне редко протекает коррозия только одного из указанных видов, но всегда есть возможность определить преобладающее действие конкретного вида коррозионного воздействия, а затем установить и учесть роль вторичных факторов для частного случая коррозии бетона. Это находит подтверждение в различных исследованиях, научной школы академика РААСН С. В. Федосова, в том числе в диссертационных работах В. Е. Румянцевой [5], В. А. Хрунова [6], Н. С. Касьяненко [7], М. Е. Шестеркина [8], И. В. Красильникова [9] и В. С. Коноваловой [10].

Бетон является наиболее распространенным из современных строительных материалов широкого диапазона применения для изготовления монолитных и сборных конструктивных элементов зданий и сооружений. Поэтому проблема разрушения бетонных и железобетонных объектов строительного комплекса из-за деструктивного воздействия агрессивных сред, от решения которой во многом зависит безопасность современных городов, становится все злободневнее, несмотря на существующие научные и инженерные разработки и изыскания.

Прогнозирование долговечности бетонных и железобетонных конструкций является весьма сложным аналитическим процессом, требующим обобщения системных знаний ряда разделов науки: термодинамики, физической химии,

кинетики гетерогенных химических процессов, электрохимии, теории тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых телах.

За более чем 150 лет исследований деструкции бетона вследствие коррозии учеными накоплен и систематизирован большой объем теоретических и экспериментальных знаний о коррозионных процессах, которые протекают в бетоне и железобетоне: установлены и исследованы принципиальные механизмы химических реакций; создан математический аппарат, описывающий некоторые коррозионные явления; разработана и внедрена система нормативных документов, направленная на предотвращение коррозионных процессов или снижение ущерба от коррозии в строительном комплексе [11–14].

Как отмечается во многих исследованиях, в том числе и в работе В. А. Хрунова [6], накопленный при изучении коррозии бетона теоретический и практический материал дает возможность описывать протекающие процессы с помощью математических моделей, которые позволяют с требуемой точностью устанавливать срок службы бетонных и железобетонных изделий и конструкций.

Прогнозирование долговечности строительных изделий и конструкций невозможно проводить без тщательного анализа экспериментальных данных, а также разработки теоретических положений, направленных на создание математических моделей массообменных процессов, протекающих в бетонных и железобетонных изделиях на стадиях их изготовления и эксплуатации.

В русле научного направления, развиваемого в Ивановском государственном политехническом университете и связанного с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов массопереноса при коррозии бетона и железобетона, было разработано несколько математических моделей процессов коррозии в средах различной степени агрессивности, на основании обработки которых предложены пути борьбы с коррозионной деструкцией [5, 6, 15–17].

В расчетах характеристик процессов массопереноса применялись уравнения массопередачи и массоотдачи. На практике коррозия первого вида цементных бетонов в условиях ограниченного объема жидкой среды является очень важным случаем.

Отличительной чертой такого коррозионного процесса является то, что переносимый компонент «свободный гидроксид кальция» переходит из твердой фазы в жидкую в условиях ограниченного объема жидкой фазы, в которой изменение концентрации вещества происходит во времени процесса.

Математически задача массопереноса может быть представлена уравнениями:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (1)$$

Начальное условие:

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0. \quad (2)$$

Граничные условия:

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

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_b(\tau) - C(\delta, \tau)]. \quad (3)$$

В этих выражениях $C(x, \tau)$ — концентрация свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x в пересчете на CaO , кг CaO /кг бетона; $C_0(x)$ — концентрация свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бетоне в начальный момент времени в произвольной точке с координатой x в пересчете на CaO , кг CaO /кг бетона; k — коэффициент массопроводности в твердой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$; β — коэффициент массоотдачи в жидкой среде, $\text{м}/\text{с}$; δ — толщина стенки конструкции, м ; x — координата, м ; τ — время, с .

Отличительной особенностью представленной математической модели (1)–(3) от классической теории массопереноса [18] является не постоянство величины равновесной концентрации на поверхности твердого тела C_p , а ее зависимость от концентрации переносимого компонента в жидкой фазе:

$$C_p(\tau) = f[C_{\text{ж}}(\tau)]. \quad (4)$$

Простейшей формой этой зависимости является закон Генри:

$$C_p(\tau) = m C_{\text{ж}}(\tau), \quad (5)$$

где m — константа Генри, кг жидкости/кг бетона.

В качестве одной из форм решения краевой задачи массопроводности (1)–(3) может быть рекомендована следующая запись [5, 8]:

$$Z(\bar{x}, \text{Fo}_m) = \frac{Z(0)}{1 + K_m} - 2\text{Bi}_m Z_{\text{ж}}(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \bar{x})}{\psi'(\mu_n)} \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}_m). \quad (6)$$

Средняя по толщине конструкции концентрация переносимого компонента:

$$Z_{\text{ср}}(Fo_m) = \frac{Z(0)}{1 + K_m} - 2Bi_m Z_{\text{ж}}(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\mu_m \psi'(\mu_m)} \exp(-\mu_m^2 Fo_m). \quad (7)$$

Концентрация переносимого компонента в жидкой фазе:

$$Z_{\text{ж}}(Fo_m) = Z_{\text{ж}}(0) \left\{ 1 + 2Bi_m K_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\mu_m \psi'(\mu_m)} \times \left[\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1 \right] \right\}. \quad (8)$$

Таким образом, как было показано в работах ученых научной школы Ивановского государственного политехнического университета [5, 8, 9], выражения (6), (8) и (9) дают окончательное решение задачи (1)–(3) и позволяют рассчитывать поля концентраций переносимого целевого компонента по толщине конструкции, находить среднее значение концентрации в произвольный момент времени, а также определять значение концентраций целевого компонента в жидкой среде.

В связи с быстрым развитием и совершенствованием вычислительной техники для решения дифференциальных уравнений массопереноса в частных производных с помощью ЭВМ все большее применение находят численные методы. При рассмотрении систем дифференциальных уравнений массопереноса с весьма общими краевыми условиями точные методы решения сталкиваются с большими трудностями, которые становятся непреодолимыми при решении нелинейных задач. В таких случаях необходимо использовать численные методы решения. Метод конечных разностей (метод сеток) является наиболее распространенным методом приближенного решения уравнений тепло- и массопереноса.

Использование современных компьютерных программ позволяет свести сложную нелинейную задачу к нескольким более простым линейным. На этом принципе основан метод микропроцессов, в котором весь процесс разделен на n элементарных микропроцессов, в пределах каждого из которых все параметры фаз могут считаться постоянными, и нелинейная задача тепломассопереноса сводится к совокупности

n линейных задач. Этот метод расчета позволяет применять комбинированный подход, при котором в начале получают аналитическое решение каждого микропроцесса, а затем просчитывают поэтапно весь процесс. Такой комбинированный подход обычно является более эффективным по сравнению с непосредственным численным решением нелинейной задачи [19].

Следует отметить, что этот метод дает хорошие результаты в том случае, если он осуществляется в совокупности с методом интегрального преобразования Лапласа [20, 21]. Это обусловлено тем, что в области больших чисел Фурье достаточно точные результаты получаются при использовании всего лишь нескольких первых членов ряда. С уменьшением числа Фурье число членов ряда, которое необходимо учитывать для обеспечения заданной точности расчетов, резко возрастает, но современные компьютеры в состоянии достаточно быстро справиться с этой проблемой. Кроме того, преобразование Лапласа часто дает возможность получить решение в двух формах: при $Fo_m > 0,1$ и $Fo_m < 0,1$, в этом и заключается преимущество использования этого преобразования при проведении расчетов [22].

На основании научных исследований Н. С. Касьяненко, проводимых под руководством С. В. Федосова [7], разработаны практические рекомендации, которые были внедрены компаниями ОАО «Череповецкий аммофос» и ООО «Балаковские минеральные удобрения» при проведении промышленной экспертизы зданий и сооружений, что позволило повысить уровень их безопасности в соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»; разработаны практические рекомендации, заключающиеся в повышении коррозионной стойкости железобетонных наливных сооружений и включающие в себя исследования процессов массопереноса при коррозии цементных бетонов в жидких средах, протекающей по механизму II вида, которые были использованы при проведении обследований строительных конструкций сооружений Москвы. Полученные результаты позволили определить причину снижения прочности нескольких резервуаров для питьевой воды, содержащих растворы коагу-

лянта, и разработать эффективные мероприятия по обеспечению их долговечности.

Проведенные исследования [5–7, 15–17] являются основополагающей частью изучения процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов и железобетонов. Несомненно, перспективой теоретических и экспериментальных исследований являются разработка способов защиты стальной арматуры железобетона от коррозии, исследование коррозии цементных бетонов, армированных в том числе и композитной арматурой, изучение свойств и поведения неметаллической арматуры при работе системы «неметаллическая арматура — бетон», разработка рекомендаций по предотвращению коррозии цементных бетонов и повышению прочности сцепления композитной арматуры с бетоном, прогнозирование развития микробиологической коррозии цементных бетонов. Важным аспектом научных изысканий является создание математических моделей на основе уравнений математической физики, описывающих поведение бетона и железобетона при высоких температурах, что позволит разработать рекомендации по обеспечению пожаробезопасности железобетонных конструкций.

Библиографический список

1. Ивановский В. Н. Теоретические основы процесса коррозии нефтепромыслового оборудования // Инженерная практика. 2010. № 6. С. 4–14.
2. Бабушкин В. И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1968. 187 с.
3. Комохов П. Г., Латыпов В. М., Латыпова Т. В., Вагапов Р. Ф. Долговечность бетона и железобетона (приложения методов математического моделирования с учетом ингибирующих свойств цементной матрицы). Уфа: Белая река, 1998. 216 с.
4. Москвин В. М. Коррозия бетона. М.: Госстройиздат, 1952. 342 с.
5. Румянцева В. Е. Научные основы закономерностей массопереноса в процессах жидкостной коррозии строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2011. 441 с.
6. Хрунов В. А. Исследование массообменных процессов при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2008. 137 с.
7. Касьяненко Н. С. Процессы массопереноса при жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2010. 155 с.
8. Шестеркин М. Е. Массообменные процессы при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2015. 181 с.
9. Красильников И. В. Исследование процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом действия внутренних источников массы: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2016. 159 с.
10. Коновалова В. С. Разработка состава и исследование свойств фосфатного покрытия для защиты арматуры железобетона от жидкостной коррозии: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2017. 164 с.
11. Гусев Б. В., Файвусович А. С., Степанова В. Ф., Розенталь В. К. Математическая модель процессов коррозии бетонов в жидких средах // Известия вузов. Строительство. 1998. № 4/5. С. 56–60.
12. Добролюбов Г. В., Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М.: Стройиздат, 1981. 213 с.
13. Леонович С. Н., Прасол А. В. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение // Строительные материалы. 2013. № 5. С. 94–95.
14. Иванов Ф. М. О моделировании процесса коррозии бетона // Бетон и железобетон. 1982. № 7. С. 45–46.
15. 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.
16. 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.
17. 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 КГАСУ. 2013. № 4 (26). С. 343–348.
18. Романков П. Г., Раишовская Н. Б., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1975. 336 с.
19. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование (система твердое тело — жидкость). Л.: Химия, 1974. 256 с.
20. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности. М.: Высшая школа, 1982. 304 с.
21. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
22. Лыков А. В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

References

1. Ivanovskiy V. N. *Teoreticheskie osnovy protsesssa korrozii neftepromyslovogo oborudovaniya* [Theoretical bases of corrosion process of oilfield equipment]. *Inzhenernaya praktika – Engineering practice*, 2010, no. 6, pp. 4–14.

2. Babushkin V. I. *Fiziko-khimicheskie protsessy korrozii betona i zhelezobetona* [Physical and chemical processes of corrosion of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968, 187 p.
3. Komokhov P. G., Latypov V. M., Latypova T. V., Vagapov R. F. *Dolgovechnost' betona i zhelezobetona (prilozheniya metodov matematicheskogo modelirovaniya s uchetom ingibiruyushchikh svoystv tsementnoy matritsy)* [Durability of concrete and reinforced concrete (applications of mathematical modeling methods taking into account the inhibitory properties of the cement matrix)]. Ufa, Belaya Reka Publ., 1998, 216 p.
4. Moskvina V. M. *Korroziya betona* [Corrosion of concrete]. Moscow, Gosstroyizdat, 1952, 342 p.
5. Rumyantseva V. E. *Nauchnye osnovy zakonomernostey massoperenosa v protsessakh zhidkostnoy korrozii stroitel'nykh materialov. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Scientific bases of regularities of mass transfer in processes of liquid corrosion of building materials. Dr. Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2011, 441 p.
6. Khrunov V. A. *Issledovanie massoobmennyykh protsessov pri zhidkostnoy korrozii pervogo vida tsementnykh betonov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Investigation of mass transfer processes in liquid corrosion of the first type of cement concrete. PhD in Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2008, 137 p.
7. Kas'yanenko N. S. *Protsessy massoperenosa pri zhidkostnoy korrozii vtorogo vida tsementnykh betonov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Processes of mass transfer at liquid corrosion of the second type of cement concrete. PhD in Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2010, 155 p.
8. Shesterkin M. E. *Massoobmennyye protsessy pri zhidkostnoy korrozii pervogo vida tsementnykh betonov s uchetom vliyaniya svoystv portlandtsementa. Diss. kand. tekhn. nauk* [Mass transfer processes in cement concrete at liquid corrosion of the first type taking into account the influence of Portland cement properties. PhD in Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2015, 181 p.
9. Krasil'nikov I. V. *Issledovanie protsessov massoperenosa pri zhidkostnoy korrozii pervogo vida tsementnykh betonov s uchetom deystviya vnutrennikh istochnikov massy. Diss. kand. tekhn. nauk* [Investigation of mass transfer processes in cement concrete at liquid corrosion of the first type taking into account the action of internal sources of mass. PhD in Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2016, 159 p.
10. Konovalova V. S. *Razrabotka sostava i issledovanie svoystv fosfatnogo pokrytiya dlya zashchity armatury zhelezobetona ot zhidkostnoy korrozii. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of the composition and study of properties of phosphate coatings for protection of concrete reinforcement against corrosion from liquid. PhD in Sci. Tech. diss.]. Ivanovo, 2017, 164 p.
11. Gusev B. V., Fayvusovich A. S., Stepanova V. F., Rozental' V. K. *Matematicheskaya model' protsessov korrozii betonov v zhidkikh sredakh* [Mathematic model of concrete corrosion processes in liquid media]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – News of Higher Schools. Construction*, 1998, no. 4/5, pp. 56–60.
12. Dobrolyubov G. V., Ratinov V. B., Rozenberg T. I. *Prognozirovanie dolgovechnosti betona s dobavkami* [Prediction of durability of concrete with additives]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 213 p.
13. Leonovich S. N., Prasol A. V. *Zhelezobeton v usloviyakh khlordnoy korrozii: deformirovanie i razrushenie* [Reinforced concrete under conditions of chloride corrosion: deformation and destruction]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2013, no. 5, pp. 94–95.
14. Ivanov F. M. *O modelirovanii protsessa korrozii betona* [On modeling the corrosion process of concrete]. *Beton i zhelezobeto – Concrete and reinforced concrete*, 1982, no. 7, pp. 45–46.
15. Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Kas'yanenko N. S., Krasil'nikov I. V. *Nestatsionarnyy massoperenos v protsessakh korrozii vtorogo vida tsementnykh betonov. Malye znacheniya chisel Fur'e, s vnutrennim istochnikom massy* [Unsteady mass transfer in corrosion processes of the second type of cement concrete. Small values of Fourier numbers, with an internal source of mass]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*, 2015, vol. 58, no. 1, pp. 97–99.
16. Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Krasil'nikov I. V., Loginova S. A. *Issledovanie vliyaniya protsessov massoperenosa na nadezhnost' i dolgovechnost' zhelezobetonnykh konstruktsey, ehkspluatiruemykh v zhidkikh agressivnykh sredakh* [Investigation of the influence of mass transfer processes on the reliability and durability of reinforced concrete structures operated in liquid aggressive media]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2017, no. 12, pp. 52–57.
17. Kayumov R. A., et al. *Matematicheskoe modelirovanie korrozionnogo massoperenosa geterogennoy sistemy «zhidkaya agressivnaya sreda – tsementnyy beton»*. *Chastnye sluchai resheniya* [Mathematical modeling of corrosion mass transfer of heterogeneous system “liquid aggressive medium – cement concrete”. Special cases of solutions]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU*, 2013, no. 4 (26), pp. 343–348.
18. Romankov P. G., Rashkovskaya N. B., Frolov V. F. *Massoobmennyye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Mass transfer exchange processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1975, 336 p.
19. Aksel'rud G. A., Lysyanskiy V. M. *Ehstragirovanie (sistema tverdoe telo–zhidkost')* [Extraction (solid–liquid system)]. Leningrad, Khimiya Publ., 1974, 256 p.
20. Belyaev N. M., Ryadno A. A. *Metody teorii teploprovodnosti* [Methods of the theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982, 304 p.
21. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 600 p.
22. Lykov A. V., Mikhaylov Yu. A. *Teoriya teplo- i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow, Leningrad, Gosehnergoizdat Publ., 1963, 536 p.