

УДК 620.197.4

DOI: 10.17277/voprosy.2015.01.pp.235-244

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

**В. Е. Румянцева, С. А. Логинова**

*ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор В. А. Огурцов*

**Ключевые слова и фразы:** бетон; долговечность; железобетон; коррозия; массоперенос; математическое моделирование.

**Аннотация:** Проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов, касающиеся современных представлений о механизмах коррозионного разрушения бетона и железобетона. Дано обоснование общности методологического подхода к моделированию процессов массопереноса при жидкостной коррозии строительных материалов. Представлены математические модели массообменных процессов, протекающих по механизмам коррозии первого и второго видов. Приведены решения систем уравнений коррозионного массопереноса для замкнутой системы «жидкость – резервуар» и математической модели диффузии «свободного гидроксида кальция» в гетерогенной системе «бетон – жидкость». Представлен анализ кинетики и динамики исследуемых процессов.

Целью данной статьи является установление общности методологического подхода к моделированию процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов и железобетонов разных видов.

Прогнозирование долговечности строительных конструкций – одна из основных задач, решение которой необходимо для оптимального проектирования зданий и сооружений. Изменение свойств материала во времени носит необратимый характер, зависит от условий эксплуатации и взаимодействия с окружающей средой. По мере проникновения агрес-

---

Румянцева Варвара Евгеньевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия, экология и микробиология», директор института социально-гуманитарных и естественных наук, e-mail: vargum@gmail.ru; Логинова Светлана Андреевна – аспирант кафедры «Химия, экология и микробиология», ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново.

сивной среды в толщу конструкции снижаются защитные свойства бетона по отношению к арматуре, которая, в свою очередь, начинает корродировать. В процессе коррозии уменьшается площадь поперечного сечения арматуры и нарушается ее сцепление с бетоном. Все это сказывается на несущей способности железобетонных конструкций [1].

К настоящему времени накоплен большой объем научных данных о коррозионных процессах, протекающих в бетонах под влиянием окружающей среды того или иного состава: установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций, даны математические описания некоторых коррозионных процессов. Большой практический материал создает предпосылки для более широкого применения математического моделирования при исследовании процессов коррозии бетона и железобетона.

По общепринятой международной классификации [2] коррозионное воздействие любых сред на бетоны подразделяют на три основных вида:

– к *первому* относят процессы, возникающие в бетоне при воздействии на него вод с малой жесткостью, когда составные части цементного камня растворяются, вымываются и уносятся перемещающейся водной средой;

– ко *второму* – процессы, происходящие при действии на цементный камень агрессивных веществ, которые, вступая во взаимодействие с составными частями цементного камня, образуют либо легкорастворимые и вымываемые водой соли, либо аморфные массы, не обладающие связующими свойствами.

– к *третьему* – процессы, при развитии которых в порах бетона происходит накопление и кристаллизация продуктов реакции с увеличением объема твердой фазы. Они создают внутренние напряжения, ведущие к разрушению бетона.

Первые математические модели представляли собой эмпирические выражения, то есть простейшие математические аппроксимации экспериментальных результатов. В них механические характеристики связывались с характеристиками процесса коррозии через безразмерные эмпирические коэффициенты, не имеющие четкого физического смысла [1]. Позднее, исследователями [3 – 6] были разработаны более сложные модели, в которых физические и химические процессы коррозии бетона представлены в виде элементарных процессов, каждый из которых описан дифференциальным уравнением.

Существенный вклад в развитие теории и построения математических моделей процессов коррозии бетонов внесли работы члена-корреспондента РАН Б. В. Гусева с соавторами [3 – 5]. Особое внимание исследователи уделяли изучению процесса сульфатной коррозии, по классификации В. М. Москвина [1], относящейся к третьему виду.

Классическое объяснение разрушающего действия сульфатов на портландцементный камень связано с представлениями об увеличении объема твердой фазы гидроалюмината кальция при ее взаимодействии с сульфат-ионами из раствора. В работе [7] на основе решения задач массопереноса в бетоне при действии агрессивной среды сульфата натрия доказано, что технологическими путями для повышения сульфатостойкости бетона могут быть признаны способы, приводящие к повышению плотности бетона, снижению его проницаемости к компонентам агрессивной среды.

Основываясь на физико-химической сущности процессов коррозии, А. Ф. Полаку [6] удалось с помощью математического моделирования получить простую инженерную формулу для прогноза глубины повреждения бетона, широко известную как «закон корня квадратного от времени»,

$$L = A\sqrt{t}, \quad (1)$$

где  $L$  – глубина нейтрализации бетона, мм;  $t$  – срок эксплуатации, годы;  $A$  – коэффициент, зависящий от концентрации углекислого газа  $C$ , эффективного коэффициента диффузии  $D'$  и реакционной емкости бетона  $m_0$ .

При этом использовался специально разработанный метод квазистационарного режима, позволивший путем ряда допущений получить аналитическое решение для «нерешаемой» системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии бетона.

Разработанные на основе данных принципов отечественными исследователями [3 – 6] математические модели сводятся, в конечном счете, к выражению вида (1).

Разработка математических моделей невозможна без четкого представления о механизме процессов, экспериментальных данных, характеризующих влияние различных факторов на кинетику и динамику процессов, и проверки достоверности методологии прогноза в натуральных условиях.

Решение этих задач возможно с позиций теории массопереноса. Законы массопереноса дают возможность рационального проектирования строительных конструкций в соответствии с режимами эксплуатации, оптимального подбора материала, оценки состояния конструкций. Поэтому изучение процессов массопереноса, протекающих при коррозионной деструкции, является актуальной задачей.

В настоящее время в ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет» продолжается цикл публикаций, посвященных теоретическому исследованию и математическому моделированию процессов коррозии бетонов, протекающих по механизмам первого и второго видов [8 – 13]. В работах научной школы под руководством академика Российской академии архитектуры и строительных наук С. В. Федосова представлены математические модели коррозионного массопереноса, протекающего по механизмам первого и второго видов.

В статье [8] приводится математическая модель коррозионного массопереноса в замкнутой системе «жидкость – резервуар», которая определяется краевой задачей массопроводности вида

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

начальные условия

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0); \quad (3)$$

граничные условия:

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)], \quad (5)$$

где  $C(x, \tau)$  – концентрация «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$ , в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона;  $C_p(\tau)$  – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона;  $k$  – коэффициент массопроводности в твердой фазе, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – толщина стенки конструкции, м;  $x$  – координата, м;  $\tau$  – время, с;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с.

Следует отметить, что основными характеристиками коррозионного процесса в данной модели являются два коэффициента:

– массопроводности, показывающий какое количество вещества переносится в твердом теле;

– массоотдачи, показывающий какое количество вещества переносится от границы раздела фаз в сплошную среду.

Значения коэффициентов зависят от количества переносимого вещества в твердой и жидкой фазах.

Уравнение массопроводности при коррозии первого вида в безразмерных переменных примет вид:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} - Po_m^*, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad Fo_m > 0; \quad (6)$$

$$Z(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0} \Big|_{\tau=0} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(\bar{x}, Fo_m)] \Big|_{\bar{x}=1}; \quad (9)$$

$$-\frac{\partial Z_{ж}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1}; \quad (10)$$

$$K_m = \frac{m S \delta \rho_{бет}}{V_{ж} \rho_{ж}} = \frac{m G_{бет}}{G_{ж}}, \quad (11)$$

где  $Fo_m = k\tau/\delta^2$  – массообменный критерий Фурье;  $Bi_m = \beta\delta/k$  – массообменный критерий Био;  $Po_m^* = q_v \delta^2 / k C_0 \rho_{бет}$  – модифицированный критерий Померанцева;  $q_v(x)$  – мощность объемного источника массы вследствие химических реакций, кг CaO/(м<sup>3</sup>·с);  $C_0$  – концентрация «свободного гидроксида кальция» в бетоне в начальный момент времени в произвольной точке с координатой  $x$ , в пересчете на CaO, кг CaO / кг бетона;  $\bar{x} = x/\delta$  – 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;  $Z_{ж}(Fo_m)$  – безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе;  $\rho_{бет}$ ,  $\rho_{ж}$  – плотности бетона и жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – константа Генри, кг жидкости/кг бетона;  $K_m$  – коэффициент, учитывающий характеристики фаз;  $G_{бет}$  – масса бетонного резервуара, кг;  $G_{ж}$  – масса жидкости в резервуаре, кг.

На начальном этапе процесса коррозии первого вида, когда концентрация «свободного гидроксида кальция» в порах бетона претерпевает незначительные изменения, разложение высокоосновных соединений не происходит, поэтому в уравнении (6) модифицированный массообменный критерий Померанцева, характеризующий источник «свободного гидроксида кальция», равен нулю  $Po_m^* = 0$ .

Для малых чисел Фурье получены выражения, позволяющие рассчитать профиль безразмерных концентраций переносимого компонента «свободного гидроксида кальция» по толщине бетона в произвольный момент времени (12) и концентрацию перенесенного компонента «свободного гидроксида кальция» в жидкой фазе (13) на начальных этапах процесса коррозии первого вида:

$$\frac{Z(\bar{x}, Fo_m)}{Z_{ж}(0)} = -\frac{Bi_m}{\sqrt{Bi_m^2 - 4K_m}} \times \sum_{i=1}^2 (-1)^i \exp[-a_i(1-\bar{x}) + a_i^2 Fo_m] \operatorname{erfc}\left(\frac{1-\bar{x}}{2\sqrt{Fo_m}} - a_i\sqrt{Fo_m}\right); \quad (12)$$

$$\frac{Z_{ж}(Fo_m)}{Z_{ж}(0)} = 1 - \frac{K_m Bi_m}{\sqrt{Bi_m^2 - 4K_m Bi_m}} \times \sum_{i=1}^2 (-1)^{i=1} \left\{ 2\sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}} + a_i \int_0^{Fo_m} \exp(a_i^2 Fo_m) \operatorname{erfc}(-a_i\sqrt{Fo_m}) dFo_m \right\}. \quad (13)$$

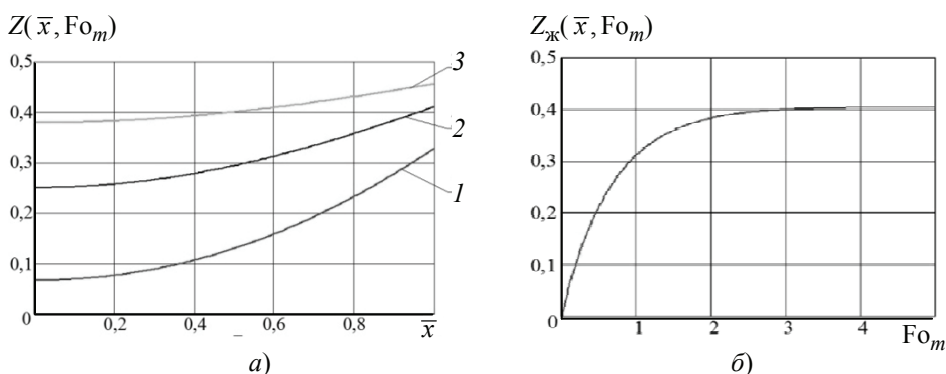
На основании решений системы уравнений (6) – (11) получены выражения, позволяющие рассчитывать динамику и кинетику процесса коррозии первого вида цементных бетонов в замкнутой системе «жидкость – резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m Z_p(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n \cos(\mu_n \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo_m) + 2Po_m^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_n \bar{x}) \left[ (\mu_n^2 - Bi_m K_m) \sin \mu_n - \mu_n Bi_m (\cos \mu_n - 1) \right]}{\mu_n^2 \psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo_m); \quad (14)$$

$$Z_{ж}(Fo_m) = Z_{ж}(0) + 2Bi_m K_m Z_p(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \left[ \exp(-\mu_n^2 Fo_m) - 1 \right] - 2Po_m^* K_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n \left[ (\mu_n^2 - Bi_m K_m) \sin \mu_n - \mu_n Bi_m (\cos \mu_n - 1) \right]}{\mu_n^3 \psi'(Bi_m, K_m, \mu_n)} \left[ \exp(-\mu_n^2 Fo_m) - 1 \right], \quad (15)$$

где  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $\operatorname{tg} \mu_n = \frac{Bi_m \mu_n}{\mu_n^2 - K_m Bi_m}$ ;

$$\psi'(Bi_m, K_m, \mu_n) = \frac{(\mu_n^2 - Bi_m K_m) \cos \mu_n + Bi_m \mu_n \sin \mu_n}{\sin \mu_n \left[ 3\mu_n^2 + Bi_m (\mu_n^2 - K_m) \right] + \cos \mu_n \mu_n Bi_m \left[ \mu_n^2 - (Bi_m K_m + 2) \right]}.$$



**Рис. 1. Профиль безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине стенки резервуара (а) и в жидкой фазе (б) при отсутствии источника массы при  $Bi_m = 1, K_m = 1$ : а – при различных  $Fo$ : 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1**

На рисунке 1, а представлена иллюстрация динамики безразмерных концентраций переносимого компонента в отсутствие источника массы. Кривая рис. 1, б отражает кинетику изменения содержания компонента «свободного гидроксида кальция» в объеме жидкой фазы.

Изложенные в [8, 9] результаты расчетов, полученных с помощью метода преобразований Лапласа, позволяют в конечном итоге определить продолжительность жидкостной коррозии первого вида.

В работе [12] установлены закономерности массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов, протекающих по механизму второго вида. На основании этого разработана математическая модель диффузии «свободного гидроксида кальция» в гетерогенной системе «бетон – жидкость» [13], которая в твердой фазе представляется уравнениями вида

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x)}{\rho_\delta}, \quad \tau \geq 0, \quad 0 \leq x \leq \delta; \quad (16)$$

начальные условия

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C_0(x); \quad (17)$$

граничные условия:

$$\left. \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (18)$$

$$-k\rho_{\text{бет}} \left. \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta} = q_i, \quad (19)$$

где  $\rho_{\text{бет}}$  – плотность бетона,  $\text{кг/м}^3$ .

В безразмерных координатах краевая задача массопроводности (16) – (19) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \theta(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 \theta(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} + Po_m^*(\bar{x}), \quad Fo_m > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1; \quad (20)$$

$$\theta(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = \theta_0(\bar{x}); \quad (21)$$

$$\frac{\partial \theta(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{x=0} = 0; \quad (22)$$

$$-\frac{\partial \theta(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{x=1} = Ki_m^*, \quad (23)$$

где  $\theta(\bar{x}, Fo_m)$  – безразмерная концентрация «свободного гидроксида кальция» по толщине бетона;  $Ki_m^*$  – модифицированный критерий Кирпичева.

Окончательное решение уравнений (20) – (23) при малых значениях массообменного числа Фурье имеет вид

$$\begin{aligned} \theta(\bar{x}, Fo_m) = & Ki_m^* (1 \pm \bar{x}) \operatorname{erfc} \left[ \frac{(1 \pm \bar{x})}{2\sqrt{Fo_m}} \right] - 2Ki_m^* \sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}} \exp \left[ -\frac{(1 \pm \bar{x})^2}{4Fo_m} \right] + \\ & + \frac{1}{\sqrt{\pi Fo_m}} \int_0^1 \theta_0(\xi) \exp \left[ -\frac{(1 \pm \bar{x} + \xi)^2}{4Fo_m} \right] d\xi + 2\sqrt{Fo_m} \int_0^1 Po_m(\xi) \operatorname{ierfc} \left[ \frac{(1 \pm \bar{x} + \xi)^2}{2\sqrt{Fo_m}} \right] d\xi. \end{aligned} \quad (24)$$

При отсутствии источника массы, то есть при  $Po_m^*(\xi) = 0$ , решение (24) упрощается до выражения

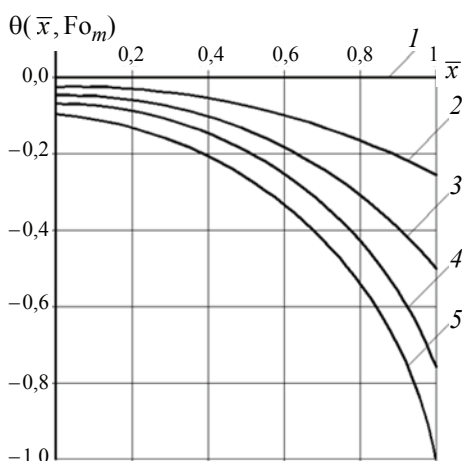
$$\theta(\bar{x}, Fo_m) = Ki_m^* \left[ \frac{1 - 3\bar{x}^2}{6} - Fo_m + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) \right]. \quad (25)$$

Построенный по выражению (25) рис. 2 иллюстрирует влияние массообменного критерия Кирпичева на динамику полей концентраций целевого компонента – «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной конструкции, контактирующей с жидкостью, не содержащей агрессивного компонента. При одинаковом значении массообменного критерия Фурье возрастание потока массы вещества приводит к существенной интенсификации массопереноса целевого компонента в твердой фазе.

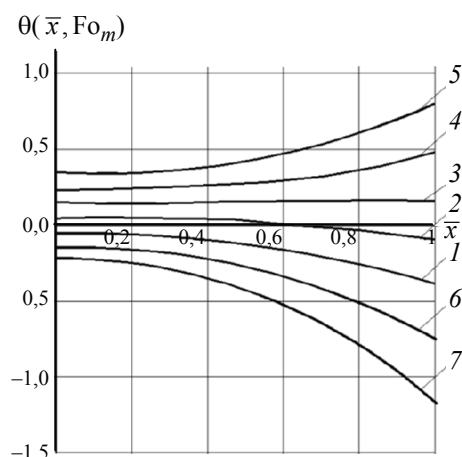
При равномерном начальном распределении концентраций переносимого компонента «свободного гидроксида кальция» решение принимает вид

$$\begin{aligned} \theta(\bar{x}, Fo_m) = & Ki_m^* \left[ \frac{1 - 3\bar{x}^2}{6} - Fo_m + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) \right] + \\ & + Po_m^*(Fo_m + 0,5\bar{x}^2). \end{aligned} \quad (26)$$

На рисунке 3 представлены результаты расчетов по выражению (26) при различных значениях модифицированного числа Померанцева, характеризующего влияние на процесс массопереноса равномерно распределенного по координате  $\bar{x}$  объемного источника массы вследствие химических



**Рис. 2. Профили безразмерных концентраций переносимого компонента «свободного гидроксида кальция» в зависимости от интенсивности внешней массоотдачи:**  
 $Fo_m = 0,2$ ;  $Ki_m^*$ : 1 – 0; 2 – 0,5;  
 3 – 1; 4 – 1,5; 5 – 2



**Рис. 3. Влияние внутреннего источника массы  $Po_m^*$  на профили безразмерных концентраций:**  
 $Fo_m = 0,2$ ;  $Ki_m^* = 1$ ;  
 $Po_m^*$ : 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1;  
 4 – 1,5; 5 – 2; 6 – -0,5; 7 – -1

реакций выделения (кривые 2, 5) или поглощения (кривые 6, 7) вещества при фиксированных значениях критериев Кирпичева и Фурье. Кривая 1 показывает безразмерное поле концентраций в массообменном процессе, определяемом «чистой» теплопроводностью в твердом теле: вещество за счет градиента концентраций перемещается от внешней границы конструкции к поверхности, контактирующей с жидкостью.

Полученные методом преобразований Лапласа решения позволяют рассчитывать концентрации «свободного гидроксида кальция» в твердой и жидкой фазах, концентрации продуктов реакций, продолжительность процесса коррозии бетона второго вида.

В конечном итоге использование методов математического моделирования при исследовании процессов коррозии бетона и железобетона позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать долговечность и надежность объектов строительного комплекса.

#### Список литературы

1. Иванов, Ф. М. Химия в строительстве / Ф. М. Иванов, В. Б. Ратинов. – М. : Стройиздат, 1977. – 220 с.
2. Москвин, В. М. Коррозия бетона / В. М. Москвин. – М. : Госстройиздат, 1952. – 342 с.
3. Математические модели процессов коррозии бетона / Б. В. Гусев [и др.]. М. : ТИМР, 1996. – 104 с.
4. Гусев, Б. В. Основы математической теории процессов коррозии бетона / Б. В. Гусев. – М. : Науч. мир, 2006. – 39 с.
5. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства / Б. В. Гусев [и др.]. – М. : Науч. мир, 2006. – 560 с.

6. Полак, А. Ф. Математическое моделирование процесса коррозии бетона в жидких средах / А. Ф. Полак // Бетон и железобетон. – 1988. – № 3. – С. 30.
7. Федосов, С. В. Сульфатная коррозия бетона / С. В. Федосов, С. М. Базанов. – М. : АСВ, 2003. – 192 с.
8. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) / С. В. Федосов [и др.] // Строит. материалы. – 2007. – № 5. – С. 70 – 71.
9. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона / С. В. Федосов [и др.] // Вестн. ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2009. – Вып. 14 (33). – С. 117 – 122.
10. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. – 2013. – № 6. – С. 44 – 47.
11. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда – цементный бетон». Частные случаи решения / Р. А. Каюмов [и др.] // Изв. Казан. гос. архитектур.-строит. университета. – 2013. – № 4 (26). – С. 343 – 348.
12. Федосов, С. В. Физико-химические основы жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко // Строительство и реконструкция. – 2010. – № 4(30). – С. 74 – 77.
13. Федосов, С. В. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона второго вида / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко // Строит. материалы. – 2008. – № 7. – С. 35– 39.

#### References

1. Ivanov F.M., Ratinov V.B. *Himija v stroitel'stve* (Chemistry in construction), Moscow: Strojizdat, 1977, 220 p.
2. Moskvин V.M. *Korrozija betona* (Corrosion of concrete), Moscow: Gosstrojizdat, 1952, 342 p.
3. Gusev B.V., Fajusovich A.S., Stepanova V.F., Rozental' N.K. *Matematicheskaja model' processov korrozii betona* (Mathematical models of processes of corrosion of concrete), Moscow: TIMR, 1996, 102 p.
4. Gusev B.V. *Osnovy matematicheskoj teorii processov korrozii betona* (Fundamentals of the mathematical theory of corrosion processes of concrete), Moscow: Nauchnyi mir, 2006, 39 p.
5. Gusev B.V., Kondrashenko V.I., Maslov B.P., Fajvusovich A.S. *Formirovanie struktury kompozicionnyh materialov i ih svojstva* (Formation of structures of composite materials and their properties), Moscow: Nauchnyj mir, 2006, 560 p.
6. Polak A.F. *Beton i zhelezobeton*, 1988, no. 3, pp. 30.
7. Fedosov S.V., Bazanov S.M. *Sul'fatnaja korrozija betona* (), Moscow: ASV, 2003, 192 p.
8. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Aksakovskaja L.N. *Stroitel'nye Materialy*. 2007.no. 5, pp. 70-71.
9. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Kas'janenko N.S., Smel'cov V.L. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2009, issue 14 (33), pp. 117-122.
10. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Kas'janenko N.S., Krasil'nikov I.V. *Stroitel'nye Materialy*, 2013, no. 6, pp. 44-47.

11. Kajumov R.A., Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Manohina Ju.V., Krasil'nikov I.V. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2013, no. 4 (26), pp. 343-348.

12. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Kas'janenko N.S. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija*, 2010, no. 4(30), pp. 74-77.

13. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Kas'janenko N.S. *Stroitel'nye Materialy*, 2008, no. 7, pp. 35-39.

---

## **Mathematical Modeling of Concrete and Steel Concrete Corrosion Processes**

**V. E. Rumyantseva, S. A. Loginova**

*Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo*

**Key words and phrases:** corrosion, mathematic modeling, concrete, steel concrete, mass transfer, durability.

**Abstract:** Having analyzed the works of foreign and Russian scientists concerning modern conceptions about the metal corrosion process, we have presented the substantiation of a general methodological approach to modeling a mass transfer process under liquid corrosion of building materials; we have developed mathematical models of mass transfer processes occurring by the first and second types of corrosion mechanism; we have come up with solutions of corrosion mass transfer equations for the closed system “liquid-tank” and developed a mathematical model of “free calcium hydroxide” diffusion in the heterogeneous system “concrete-liquid”; we have analyzed the kinetics and dynamics of the investigated process.

---

© В. Е. Румянцева, С. А. Логинова, 2015