

УДК 691.32:620.193:66.021.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ И ДИНАМИКИ МАССОПЕРЕНОСА КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ КРИВОЙ РАВНОВЕСИЯ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ ПЕРВОГО ВИДА ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА

### Часть 1. Физико-математическая постановка задач

**С. В. Федосов, Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева,  
В. С. Коновалова, М. Е. Шестеркин**

*Ивановский государственный политехнический университет (г. Иваново)*

*Аннотация.* Гидроксид кальция является основным компонентом, определяющим массоперенос в системе «бетонная конструкция, ограждающая конструкция – жидкая среда». Процесс коррозии цементного камня обусловлен диффузией «свободного гидроксида кальция» из объема цементного камня к его поверхности, которая граничит с агрессивной средой, и переходом вещества через границу раздела фаз «твердое тело – жидкость» и его растворением в жидкой среде. Уменьшение содержания гидроксида кальция в результате «вымывания» его из бетона жидкостью вызывает изменение фазового и термодинамического равновесия в системе, приводит к разложению основных составляющих цементного клинкера и необратимой потере прочностных свойств бетона. Равновесие в системе «жидкость – твердое», которое наступает при равенстве скоростей переноса вещества в прямом (адсорбция) и обратном (десорбция) направлениях, описывает «закон Генри». Метод кусочно-линейной аппроксимации позволяет разбить нелинейную характеристику отрезками прямых, что позволяет довольно точно аппроксимировать любую заданную нелинейную характеристику и определять параметры массопереноса при коррозии цементных бетонов.

Целью данной работы является моделирование диффузии «свободного гидроксида кальция» в замкнутой гетерогенной системе «твердое тело – жидкая нейтральная среда», а также установление и обобщение закономерностей процессов массопереноса при коррозионной деструкции. В статье раскрыта сущность метода кусочно-линейной аппроксимации. Приведена физико-математическая модель процесса диффузии «свободного гидроксида кальция» в твердой фазе бетона с учетом влияния свойств портландцемента и воздействия жидкой нейтральной среды, в замкнутой системе «резервуар – жидкость», на уровне феноменологических уравнений, базирующаяся на записи краевой задачи нестационарной массопроводности. Показана возможность применения данного метода для решения уравнений массопереноса коррозионных процессов бетона.

Результаты исследования приводят к выводам о том, что разработанная на базе математической модели инженерная методика расчета позволяет рассчитывать динамику полей концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной конструкции в зависимости от свойств портландцемента, а также кинетику массопереноса в твердой и жидкой фазах, что дает возможность в конечном итоге определять продолжительность процесса коррозии I вида с учетом марки портландцемента. Разработана методика расчета, базирующаяся на кусочно-линейной аппроксимации линий равновесия, за пределами зоны действия закона Генри.

*Ключевые слова:* массоперенос; кусочно-линейная аппроксимация; математическое моделирование; коррозия бетона.

**Введение.** Сущность метода кусочно-линейной аппроксимации состоит в замене нелинейной характеристики отрезками прямых, что дает возможность довольно точно аппроксимировать любую заданную нелинейную характеристику [1]. Такая замена нели-

нейной характеристики позволяет вести расчет аналитически с помощью линейных уравнений [2].

Равновесие в системе «твердое – жидкость» характеризуется процессами адсорбции и десорбции. Адсорбция представляет

собой процесс самопроизвольного перераспределения компонентов системы между поверхностным слоем и объемной фазой. Более плотную фазу, определяющую форму поверхности, принято называть адсорбентом. Вещество, которое перераспределяется и поэтому находится в жидкой фазе, называют адсорбатом. Обратный процесс перехода вещества из поверхностного слоя в объемную фазу называют десорбцией [3]. Равновесие в системе «твердое – жидкость» изучается статикой процессов и описывается изотермами сорбции – десорбции [1].

Целью данной работы является моделирование диффузии «свободного гидроксида кальция» в замкнутой гетерогенной системе «твердое тело – жидкая нейтральная среда».

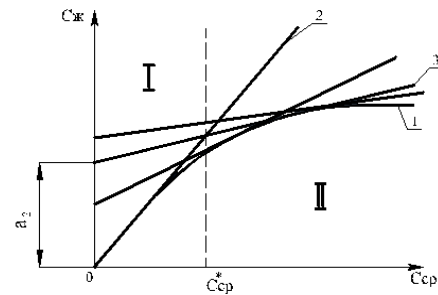
**Разработка математической модели массопереноса в процессах коррозии цементных бетонов первого вида.** Простейшей зависимостью, описывающей равновесие в системе «жидкость – твердое», которое наступает при равенстве скоростей в прямом (адсорбция) и обратном (десорбция) направлениях, является закон Генри [1]:

$$C_p(\tau) = m \cdot C_{жс}(\tau), \quad (1)$$

где  $C_p(\tau)$  – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг СаО/кг бетона;  $C_{жс}(\tau)$  – равновесная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – константа Генри, величина, определяемая экспериментально, кг компонента в жидкой фазе /кг компонента в твердой фазе.

Уравнение (1) характеризует изотерму адсорбции (десорбции) вещества при низких концентрациях (рис. 1). В соответствии с этим закон Генри формулируется следующим образом [3]: величина адсорбции при малых концентрациях вещества в растворе прямо пропорциональна концентрации.

При адсорбции (десорбции) на твердых адсорбентах область действия закона Генри мала из-за неоднородности поверхности. Профессор К. Н. Белоногов применил закон Генри и дал алгоритм решения задач, которым успешно пользовались ученые для моделирования процессов десорбции и экстрагирования [4].



**Рис. 1. Равновесие в системе «бетон-вода»:**  
1 – линия сорбции,  $a = 0$ ; 2 – прямая, иллюстрирующая закон Генри,  $a_i = a_2$ ; 3 – аппроксимация линии равновесия в зоне II

На рисунке 1 кривая 1 показывает реальную кривую равновесия для системы «бетон-вода» (кривая десорбции), кривая 2 иллюстрирует закон Генри. Зона I – зона действия закона Генри (зона малых концентраций); зона II – зона, в которой закон Генри перестает действовать.

Очевидно, что в замкнутой системе чем дольше идет процесс и жидкость все более насыщается переносимым компонентом, интенсивность массопереноса все более снижается, а расхождение между линиями все более вырастает. Следовательно, будет увеличиваться и ошибка расчетов, основанных на законе Генри.

Предположим, что равновесие в системе описывается линейной зависимостью

$$C_p(\tau) = a + bC_{жс}(\tau). \quad (2)$$

Для упрощения расчетов и получения обобщенных решений, удобных для качественного анализа процессов коррозии, введем в рассмотрение безразмерные переменные вида

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta}, \quad Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}, \quad (3)$$

где  $Z(x, Fo_m)$  – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени;  $C_0$  – начальная концентрация свободного СаО, кг СаО/кг бетона;  $x$  – относительная координата;  $Fo_m$  – массообменный критерий Фурье;  $k$  – коэффициент массопроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время, ч;  $\delta$  – толщина стенки конструкции, м.

С учетом этого крайняя задача (4-6) преобразуется к виду задачи массопроводности

при нелинейной изотерме сорбции (7-9).

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta, \quad (4)$$

• начальные условия:

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0, \quad (5)$$

• граничные условия:  $\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0,$

$$k \cdot \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)], \quad (6)$$

где  $C(x, \tau)$  – концентрация свободного СаО в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$ , кг СаО/кг бетона;  $C_0$  – начальная концентрация свободного СаО, кг СаО/кг бетона;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с;  $k$  – коэффициент массопроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – толщина стенки конструкции, м.

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, Fo_m > 0,$$

$$0 \leq \bar{x} \leq 1, Z(\bar{x}, 0) = 0, \quad (7)$$

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

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

где  $Bi_m$  – массообменный критерий Био;  $Z_p(Fo_m)$  – равновесная концентрация переносимого компонента.

Обратимся к дифференциальному уравнению материального баланса переносимого компонента:

$$-S \rho_B k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = V_{ж} \rho_{ж} \frac{\partial C_{ж}(\tau)}{\partial \tau} \quad (10)$$

и преобразуем его с учетом безразмерных переменных (3):

$$S \rho_B k \frac{\partial [C_0 - C(\delta, \tau)] \delta}{C_0 \partial x \delta} = V_{ж} \rho_{ж} \frac{\partial C_{ж}(\tau) \delta^2}{\partial \tau C_0 \delta^2}. \quad (11)$$

В уравнении (10) левая часть – количество переносимого компонента через внутреннюю поверхность резервуара  $S$ , м<sup>2</sup>; правая часть – приращение массы компонента в объеме  $V_{ж}$  резервуара, м<sup>3</sup>;  $\rho_B, \rho_{ж}$  – плотности бетона и жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Равновесие в рассматриваемой системе «бетонная конструкция – жидкая среда», как

было отмечено ранее, определяется линейной зависимостью (2), из которой мы выражаем значение концентрации переносимого компонента в жидкой фазе:

$$C_{ж}(\tau) = \frac{1}{b} [C_p(\tau) - a]. \quad (12)$$

С учетом преобразований получаем

$$\begin{aligned} -\frac{G_B}{G_{ж}} \cdot b \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial x} = \\ = \frac{\partial}{\partial Fo_m} \cdot \frac{[ab - C_0 + C_0 - C_p(\tau)]}{C_0}. \end{aligned} \quad (13)$$

При дифференцировании производная от константы обращается в ноль, отсюда следует:

$$-K_G \cdot b \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial x} = \frac{\partial Z_p(Fo_m)}{\partial Fo_m};$$

$$Z_p(Fo_m) = \frac{C_0 - C_p(\tau)}{C_0}, \quad (14)$$

где  $K_G = G_B/G_{ж}$  – коэффициент, учитывающий характеристики твердой и жидкой фазы;  $G_B, G_{ж}$  – массы бетонного резервуара и жидкости в нем соответственно, кг.

Итак, решению подлежит система

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2},$$

$$Fo_m > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (15)$$

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = Z_0(\bar{x}), \quad (16)$$

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (17)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial x} = Z_p(Fo_m) - Z(1, Fo_m), \quad (18)$$

$$-K_G \cdot b \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial x} = \frac{\partial Z_p(Fo_m)}{\partial Fo_m}. \quad (19)$$

Выразим физическое значение равновесной концентрации:

$$C_p(\tau) = C_0 [1 - Z_p(Fo_m)]. \quad (20)$$

Подставляем (20) в (12):

$$C_{ж}(\tau) = \frac{1}{b} \{C_0 [1 - Z_p(Fo_m)] - a\}. \quad (21)$$

Для того чтобы привести значение концентрации в жидкой фазе к безразмерным ве-

личинам, возвратимся к вопросу о равновесии в системе «твердое – жидкость» [5, 6].

Нанесем на рисунке 1 асимптотическую линию  $C_{жст} = \text{const}$ , параллельную оси абсцисс (рис. 2).

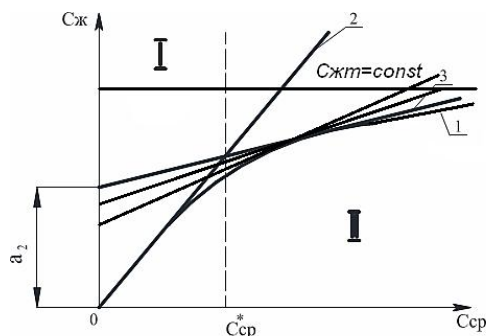


Рис. 2. Равновесие в системе «бетон-вода»:

- 1 – линия сорбции,  $a = 0$ ;
- 2 – кривая, иллюстрирующая закон Генри,  $a_i = a_2$ ;
- 3 – аппроксимация линии равновесия в зоне II

По своему физическому смыслу  $C_{жст}$  характеризует предельное (максимальное зна-

$$Z_p(Fo_m) = Z_p(0) + 2K_G b Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(\mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] - 2K_G b \sum_{m=1}^{\infty} \sin \mu_m \cdot \psi(\mu_m, Bi_m, K_G) \int_0^1 Z_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1], \quad (25)$$

где  $\mu_m$  – корни характеристического уравнения;  $\xi$  – координата интегрирования в диапазоне  $0 \leq \xi \leq x$ .

**Выводы.** Безусловным положительным моментом полученных зависимостей является возможность решения обратной задачи, когда имеющиеся экспериментальные данные с помощью данной модели позволят прогнозировать численное значение источника «свободного гидроксида кальция».

Полученные выражения позволяют определять значение концентраций переносимого компонента – «свободного гидроксида кальция» по толщине конструкции в любой момент времени и, кроме того, дают возможность расчета содержания этого вещества в жидкой фазе и среднего по толщине и объему конструкции, т.е. расчета кинетики процесса по твердой и жидкой фазам, что в конечном итоге позволяет с минималь-

ной погрешностью прогнозировать долговечность и надежность объектов строительного комплекса [7-9]. Расчет производится по разработанной методике, базирующейся на кусочно-линейной аппроксимации линий равновесия, за пределами зоны действия закона Генри.

Необходимым при осуществлении вычислений является наличие информации о статических и кинетических характеристиках процесса, которая может быть получена только на базе проведенных экспериментальных исследований. К статическим характеристикам относится информация о равновесии в системе «бетон – жидкость» и определение коэффициентов  $a$  и  $b$  в уравнении (2); под кинетическими подразумевается информация о коэффициентах массопроводности и массоотдачи в жидкой среде и плотности потока массы переносимого компонента.

Поделим левую и правую части уравнения (20) на  $C_{жст}$ :

$$\frac{C_{жс}(\tau)}{C_{жст}} = \frac{C_0}{bC_{жст}} [1 - Z_p(Fo_m)] - \frac{a}{bC_{жст}}. \quad (22)$$

Все слагаемые в выражении (20) имеют безразмерный вид. Поэтому для упрощения расчетов можно записать:

$$Z_p(Fo_m) = K_A [1 - Z_p(Fo_m)] - K_B, \quad (23)$$

здесь  $Z_p(Fo_m) = \frac{C_{жс}(\tau)}{C_{жст}}$ ;  $K_A = \frac{C_0}{bC_{жст}}$ ;

$$K_B = \frac{a}{bC_{жст}}. \quad (24)$$

Величина  $Z_p(Fo_m)$  определяется из выражения

## Список литературы

1. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.
2. Атабеков Г. И., Тимофеев А. Б., Хухриков С. С. Теоретические основы электротехники. Ч. 2: Нелинейные цепи: учеб. для вузов. М.: Энергия, 1970. 232 с.: ил.
3. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1988. 464 с.
4. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость). М.: Химия, 1974. 256 с.
5. Математическая модель жидкостной коррозии бетона, протекающей по механизму первого вида / С. В. Федосов, Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева, В. А. Хрунов, М. Е. Шестеркин // Информационная среда вуза: сб. материалов XVIII Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГАСУ, 2011. С. 131-135.
6. О некоторых особенностях моделирования массопереноса в процессах коррозии первого вида бетона в замкнутой системе «резервуар – жидкость» / Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева, М. Е. Шестеркин, Ю. В. Манохина // Строительство и реконструкция. 2013. № 1 (45). С. 86-94.
7. Румянцева В. Е., Коновалова В. С., Шестеркин М. Е. Особенности процессов коррозии бетона I вида // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2015: сб. материалов XVIII Междунар. науч.-практ. форума. Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 298-301.
8. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. А. Хрунов, М. Е. Шестеркин // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 8-12.
9. Вопросы прогнозирования долговечности строительных конструкций / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. А. Хрунов, М. Е. Шестеркин // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 63-70.

## Информация об авторах

*ФЕДОСОВ Сергей Викторович* – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, президент и заведующий кафедрой техносферной безопасности Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – научные основы разработки процессов, технологии и оборудования для термической обработки строительных материалов. Автор более 400 научных и методических трудов, в том числе 16 монографий и более 10 учебных пособий. E-mail: prezident@ivgpu.com

*ФЕДОСОВА Нина Львовна* – кандидат химических наук, профессор, профессор кафедры химии, экологии и микробиологии Ивановского государственного политехнического университета. Автор более 120 публикаций по вопросам строительной экологии, физики и химии строительных материалов. E-mail: xem@ivgpu.com

*РУМЯНЦЕВА Варвара Евгеньевна* – советник РААСН, доктор технических наук, доцент, профессор и заведующая кафедрой химии, экологии и микробиологии, директор Института социально-гуманитарных и естественных наук Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – коррозия строительных материалов и конструкций, коррозионный массоперенос, прогнозирование долговечности строительных материалов, физика и химия строительных материалов. Автор более 250 публикаций. E-mail: varrym@gmail.com

*КОНОВАЛОВА Виктория Сергеевна* – магистр химической технологии, инженер кафедры химии, экологии и микробиологии Ивановского государственного политехнического университета. Сфера научных изысканий – коррозия строительных материалов и конструкций, коррозионный массоперенос, прогнозирование долговечности строительных материалов, физика и химия строительных материалов. Опубликовано более 50 работ. E-mail: kotprotiv@yandex.ru

*ШЕСТЕРКИН Максим Евгеньевич* – кандидат технических наук, ассистент кафедры технологии строительного производства Ивановского государственного политехнического университета. Занимается исследованиями в области коррозии строительных материалов и конструкций, коррозионного массопереноса, прогнозирования долговечности строительных материалов, физики и химии строительных материалов. Автор 30 публикаций. E-mail: shesterkin86@mail.ru

UDC 691.32:620.193:66.021.3

**MODELLING OF KINETICS AND DYNAMICS OF THE MASS TRANSFER  
BY THE PIECEWISE AND LINEAR APPROXIMATION OF THE CURVE  
OF EQUILIBRIUM AT LIQUID CORROSION OF THE FIRST TYPE  
OF CEMENT CONCRETE**

**S. V. Fedosov, N. L. Fedosova, V. E. Rumyantseva,  
V. S. Konovalova, M. E. Shestyorkin**  
*Ivanovo State Polytechnical University (Ivanovo)*

*Abstract.* Calcium hydroxide is the main component defining a mass transfer in the system "concrete construction – liquid environment". Process of corrosion of a cement stone is caused by diffusion of "free calcium hydroxide" from the volume of a cement stone to its surface which borders on hostile environment and transition of substance through the interphase boundary "solid body – liquid" and its dissolution in the liquid environment. The decrease in the content of calcium hydroxide as a result of "leaching" it from concrete by a liquid causes a change of phase and thermodynamic equilibrium in the system, leads to decomposition of the main components of cement clinker and irreversible loss of the strength properties of concrete. "Henry's law" describes equilibrium in the system "liquid – solid", which occurs at equality of speeds of transfer of substance in forward (adsorption) and reverse (desorption) directions. Method of piecewise linear approximation allows to split the non-linear characteristic by straight line segments that allows to fairly accurately approximate any given non-linear characteristic and to determine the parameters of mass transfer at corrosion of cement concrete. The purpose of this work is the modeling of the diffusion of the free calcium hydroxide in a closed heterogeneous system "solid body – liquid neutral environment, and also the establishment and generalization of regularities of processes of a mass transfer at corrosion destruction. The article reveals the essence of the method of piecewise linear approximation. The physical and mathematical model of the process of diffusion of "free calcium hydroxide" in the solid phase of concrete taking into account the influence of the properties of Portland cement and exposure of the neutral liquid environment, in a closed system "reservoir-liquid", is given at the level of phenomenological equations, based on the records of the boundary value problem of non-stationary mass conductivity. The possibility of application of this method for solving the equations of mass transfer of corrosion processes of concrete is shown. Conclusions. The engineering calculation procedure developed on the basis of mathematical model allows to calculate the dynamics of the fields of concentration of the «free calcium hydroxide» on the thickness of the concrete structure depending on the properties of Portland cement, and the kinetics of mass transfer in the solid and liquid phases that gives the opportunity finally to determine the duration of the corrosion process of the I type, taking into account the brand of Portland cement. The calculation procedure based on piecewise linear approximation of the equilibrium lines outside of range of Henry's law is developed.

*Keywords:* mass transfer; the piecewise-linear approximation; mathematical modeling; corrosion of concrete

## REFERENCES

1. Kel'tsev, N. V. Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki [Principles of adsorption technology], Moscow: Khimiya, 1984, 592 p.
2. Atabekov G. I., Timofeev A. B., Khukhrikov S. S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Ch. 2: Nelineynye tsepi [Theoretical foundations of electrical engineering. Part 2: Nonlinear circuits], Moscow: Energiya, 1970, 232 p.
3. Frolov, Yu.G. Kurs kolloidnoy khimii. Poverkhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy [Course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems], Moscow: Khimiya, 1988, 464 p.
4. Aksel'rud, G.A., Lysyanskiy V.M. Ekstragirovanie (sistema tverdoe telo-zhidkost') [Extraction (the system solid – liquid)], Moscow: Khimiya, 1974, 256 p.
5. Fedosov S. V., Fedosova N. L., Rumyantseva V. E., Khrunov V. A., Shestyorkin M. E. Matematicheskaya model' zhidkostnoy korrozii betona, protekayushchey po mekhanizmu pervogo vida [Mathematical model of the liquid corrosion of concrete proceeding on the mechanism of the first type], *Informatsionnaya sreda vuza: sb.*

materialov XVIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [The information environment of the University: materials of XVIII international scientific and technical conference], Ivanovo: IGASU, 2011, pp. 131-135.

6. Fedosova N. L., Rumyantseva V. E., Shesterkin M. E., Manokhina Yu. V. O nekotorykh osobennostyakh modelirovaniya massoperenosa v protsessakh korrozii pervogo vida betona v zamknutoy sisteme «rezervuar- zhidkost'» [About some features of modeling of a mass transfer in processes of corrosion of the first type of concrete in the closed system "the tank - liquid"], *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction], 2013, No. 1 (45), pp.86-94.

7. Rumyantseva V. E., Konovalova V. S., Shesterkin M. E. Osobennosti protsessov korrozii betona I vida [The features of processes of corrosion of concrete of the I type], *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy. SMARTEX – 2015: sb. materialov XVIII Mezhdunar. nauch.-praktich. foruma* [Physics of fibrous materials: structure, properties, science intensive technologies and materials. SMARTEX – 2015: materials of XVIII international scientific and practical foruma], Ivanovo: IVGPU, 2015, pp. 298-301.

8. Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Khrunov V. A., Shesterkin M. E. O nekotorykh problemakh tekhnologii bezopasnosti i dolgovechnosti zdaniy, sooruzheniy, i inzhenernoy infrastruktury [About some problems of technology of safety and durability of buildings, constructions and engineering infrastructure], *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2015, No. 3, pp. 8-12.

9. Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Khrunov V. A., Shesterkin M. E. Voprosy prognozirovaniya dolgovechnosti stroitel'nykh konstruksiy [The problems of prediction of durability of building structures], *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction], 2011, No. 5 (37), pp. 63-70.

### Information about the authors

*FEDOSOV Sergey Viktorovich* – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, President and the Head of Technosphere Safety Department, Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – scientific bases of development of processes, technology and equipment for heat treatment of building materials. Author of over 400 scientific and methodical works, including 16 monographs and more than 10 education guidances. E-mail: prezident@ivgpu.com

*FEDOSOVA Nina Lvovna* – Candidate of Chemical Sciences, Professor of Chemistry, Ecology and Microbiology Department, Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – construction ecology; physics and chemistry of building materials. Author of over 120 publications. E-mail: xem@ivgpu.com

*RUMYANTSEVA Varvara Evgenevna* – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor and Head of Chemistry, Ecology and Microbiology Department, Director of the Institute of Social-Humanitarian and Natural Sciences, Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – corrosion of construction materials and structures; corrosion mass transfer; prediction of durability of building materials; physics and chemistry of building materials. Author of over 250 publications. E-mail: varrym@gmail.com

*KONOVALOVA Viktoriya Sergeevna* – Master of Chemical Technology, engineer of Chemistry, Ecology and Microbiology Department, Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – corrosion of construction materials and structures; corrosion mass transfer; prediction of durability of building materials; physics and chemistry of building materials. Author of 50 publications. E-mail: kotprotiv@yandex.ru

*SHESTYERKIN Maksim Evgenevich* – Candidate of Chemical Sciences, Teaching Assistant of Technology of Building Production Department, Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – corrosion of construction materials and structures; corrosion mass transfer; prediction of durability of building materials; physics and chemistry of building materials. Author of 30 publications. E-mail: shesterkin86@mail.ru

### Библиографическая ссылка

Моделирование кинетики и динамики массопереноса кусочно-линейной аппроксимацией кривой равновесия при жидкостной коррозии первого вида цементного бетона. Ч. 1. Физико-математическая постановка задач / С. В. Федосов, Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова, М. Е. Шестеркин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 3. – С. 40-46.