УДК 69.059:620.193

С.В. ФЕДОСОВ, д-р техн. наук, академик РААСН (fedosovacademic53@mail.ru),
В.Е. РУМЯНЦЕВА, д-р техн. наук, советник РААСН (varrym@gmail.com),
В.А. ХРУНОВ, канд. техн. наук (hrunovkss@gmail.com), М.Е. ШЕСТЕРКИН, инженер
Ивановский государственный политехнический университет (153037, г. Иваново, ул. 8 марта, 20)

О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры

На основе классических и новейших теоретических и экспериментальных исследований предложены эффективные рекомендации для предотвращения разрушения строительных конструкций от коррозии. Проведено математическое моделирование коррозионного массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов, возникающей в бетоне при воздействии воды с малой жесткостью, когда составные части цементного камня растворяются, вымываются и уносятся перемещающейся водной средой. Приведена краевая задача массопроводности в размерных и безразмерных переменных. Представлено решение задачи методом Лапласа при малых значениях массообменного числа Фурье, а также результаты его практического применения при проведении обследования строительных конструкций резервуара воды для пожаротушения.

Ключевые слова: коррозия, цементный бетон, жидкая водная среда, диффузия, массоперенос, безопасность, долговечность, закон Генри, математическое моделирование.

S.V. FEDOSOV, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (fedosovacademic53@mail.ru),
V.E. RUMYANTSEVA, Doctor of Sciences (Engineering), Adviser of RAACS (varrym@gmail.com),
V.A. KHRUNOV, Candidate of Sciences (Engineering) (hrunovkss@gmail.com), M.E. SHESTERKIN, Engineer (shesterkin86@mail.ru)
Ivanovo State Polytechnical University (20, 8 Marta Street, Ivanovo,153037, Russian Federation)

On Some Problems of Security Technology and Durability of Buildings and Engineering Infrastructure

On the basis of the classical and latest theoretical and experimental studies, efficient recommendations on preventing the destruction of building structures due to corrosion are proposed. The mathematical simulation of the corrosion mass-transfer in the course of corrosion of cement concretes of the first type, which occurs in the concrete under the impact of water with low hardness when components of the cement stone are dissolved, washed away, and carried away by the moving aqueous media, has been carried out. The boundary problem of mass conductivity in dimensional and non-dimensional variables is presented. The final solution of the problem using the method of Laplace at low values of Fourier number for mass exchange, as well as its practical application when inspecting the building structures of the water reservoir for fire fighting is presented.

Keywords: corrosion, cement concrete, liquid water environment, diffusion, mass transfer, safety, durability, Henry number.

Технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры – совокупность результатов экспериментально-теоретических исследований, методов проектирования, проектных, конструктивных и технологических решений, обеспечивающих их эксплуатацию в течение всего периода функционирования без опасности для жизни и здоровья людей и без нанесения вреда окружающей среде. Повышение качества и долговечности сооружений является одной из важнейших задач строительства. Решение этой задачи требует знания сущности процессов, протекающих при эксплуатации строительных конструкций, в первую очередь сущности процессов коррозии.

Коррозией (лат. *corrosio* – разъедание) называется процесс разрушения материала под действием внешней среды. В той или иной степени коррозии подвергаются все материалы.

Бетон и цементный камень как его матричная часть в эксплуатационных условиях подвержены коррозионному воздействию: газообразной среды в виде загрязненной атмосферы окружающего воздуха; твердой среды в виде пылей, загрязняющих атмосферу воздуха и осаждающихся на наружных поверхностях конструкций, грунтов, содержащих агрессивные компоненты; жидкой среды в виде агрессивных природных или загрязненных техническими продуктами поверхностных и грунтовых вод; биологически активных сред.

В большинстве случаев на конструкции действует многофазная среда. Например, воздух промышленных предприятий часто содержит взвешенную жидкую фазу в виде тумана и твердую – в виде пыли [1].

Для развития процессов коррозии агрессивное воздействие среды на компоненты бетона должно быть постоянным, в том числе на внутренние слои, когда граница коррозии перемещается в глубь материала.

Основоположником науки о коррозии бетона профессором В.М. Москвиным многочисленные процессы, протекающие при коррозии бетона, были классифицированы на три основных вида и указаны основные пути повышения коррозионной стойкости бетона [1].

Первая группа *(коррозия I вида)* объединяет коррозионные процессы, которые возникают в бетоне под действием воды, когда составные части цементного камня растворяются и вымываются жидкостью. К ним относятся воды оборотного водоснабжения, конденсат, дождевые воды, воды горных и равнинных рек в половодье, болотная вода.

На начальном этапе растворяется и вымывается водой гидроксид кальция, образовавшийся при гидролизе трехкальциевого силиката. Этот процесс обусловлен диффузией гидроксида кальция из толщи бетона к его поверхности, граничащей со средой, переходом вещества через границу раздела фаз твердое тело – жидкость и растворением в жидкой среде. После вымывания свободного гидроксида кальция начинается разложение гидросиликатов, а затем гидроалюминатов и гидроферритов кальция, приводящее к развитию коррозии других видов.

Вторая группа *(коррозия II вида)* объединяет процессы коррозии, развивающиеся в бетоне при действии вод, содержащих химические вещества, вступающие в обменные реакции с составляющими цементного камня (растворы кислот и некоторых солей). Продукты реакции при этом либо легко растворяются и вымываются водой, либо в виде аморфной массы отлагаются в порах и капиллярах цементного камня, на начальном этапе выступая в роли ингибитора коррозионного разрушения.

Третья группа *(коррозия III вида)* объединяет процессы коррозии, при развитии которых в микропустотах бетона происходит накопление малорастворимых солей, кристаллизация которых вызывает значительные растягивающие напряжения и последующее разрушение.

Кристаллизация солей и другие вторичные процессы, развивающиеся в бетоне, создают внутренние напряжения, приводящие к нарушению структуры бетона. Соли либо образуются вследствие химических реакций взаимодействия агрессивной среды с составными частями материала, либо приносятся извне и выделяются из раствора за счет постепенного испарения из него воды.

При всех видах коррозии скорость разрушения определяется, в основном, закономерностями процессов массопереноса в твердой и жидкой фазах и на границах их раздела.

Выделение трех основных видов коррозии, основанное на принципе доминирующих факторов, дает возможность установить общие для каждого вида закономерности. Это, в свою очередь, облегчает правильный выбор мероприятий, необходимых для предотвращения развития коррозии бетона и обеспечения его долговечности.

Одним из направлений в области изучения проблемы долговечности бетона является исследование закономерностей процессов коррозии как в экспериментальном, так и в теоретическом плане.

В настоящее время отечественными и зарубежными исследователями предлагается большое количество математических моделей процессов коррозии бетона, позволяющих с требуемой точностью рассчитать долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

С точки зрения теории химических процессов основные «события» происходят в диффузионно-кинетической области. В этих условиях разработка математических моделей процессов коррозии бетона базируется на физических моделях диффузии переносимых компонентов в пористой структуре бетона и математическом аппарате краевых задач массопереноса с использованием дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа.

Предметом рассмотрения авторов является жидкостная коррозия, которая возможна на гидротехнических объектах (дамбы, плотины, опоры мостов, резервуары), в частности в условиях вечной мерзлоты. Отмечено, что сваи, на которых строятся объекты в районах Севера, в периоды потепления подвергаются интенсивному воздействию грунтовых вод с высоким содержанием агрессивных компонентов [2]. Процесс усложняется, а скорость коррозии возрастает при фильтрации через толщу бетона. Но даже для случаев отсутствия фильтрации (градирни, резервуары) проблема остается чрезвычайно значимой [3].

Ниже приводится математическая модель процессов диффузии гидроксида кальция при коррозии I вида в системе железобетонный резервуар – жидкость.

Математически массоперенос гидроксида кальция в стенке бетонных конструкций определяется краевой задачей массопроводности вида:

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

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

Граничные условия: $\frac{\partial C(0,\tau)}{\partial x}=0;$ (3)

$$k\cdot\frac{\partial C(\delta,\tau)}{\partial x}=\beta\left[C_{\text{р}}(\tau)-C(\delta,\tau)\right], \quad (4)$$

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

Согласно закону сохранения массы, поток массы вещества, выходящего с поверхности бетона, должен быть равен количеству вещества, прибывающему в жидкую фазу:

$$-S\cdot\rho_{\text{б}}\cdot k\cdot\frac{\partial C(\delta,\tau)}{\partial x}=V_{\text{ж}}\cdot\rho_{\text{ж}}\cdot\frac{\partial C_{\text{ж}}(\tau)}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где левая часть – количество переносимого компонента через внутреннюю поверхность резервуара S, м^2; правая часть – приращение массы компонента в объеме $V_{\text{ж}}$ резервуара, м^3; $\rho_{\text{б}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – плотности бетона и жидкости соответственно, кг/м^3. Знак «минус» указывает на уменьшение концентрации компонента в бетоне.

Уравнение (1) является классической записью параболического дифференциального уравнения массопроводности (диффузии в твердом теле). Выражение (2) – начальное условие задачи, показывающее, что в начальный момент взаимодействия жидкости и бетона, например начало заливки резервуара, концентрация свободного гидроксида кальция по толщине бетонной конструкции равномерна. Граничное условие (3) относится к внешней границе конструкции и называется условием непроницания, показывая, что через наружную поверхность бетона переносимый компонент не уходит. Граничное условие (4) характеризует условие массопереноса через границу раздела фаз твердое – жидкость. Изнутри к поверхности тела целевой компонент переносится посредством массопроводности, а от границы переносится в жидкость посредством массоотдачи естественной конвекцией в жидкой фазе. Дифференциальное уравнение (5) представляет собой материальный баланс переносимого компонента, так как его левая часть отражает значение плотности потока массы вещества, поступающего из внутренних слоев бетона к межфазной границе, а правая часть показывает количество вещества, поступающего в результате массопереноса в объем жидкости.

Отличительной особенностью математической модели (1)–(4) является не постоянство величины равновесной концентрации на поверхности твердого тела $C_{\text{р}}$, а ее зависимость от концентрации компонента в жидкой фазе $C_{\text{ж}}$. Простейшей формой этой зависимости является закон Генри:

$$C_{\text{р}}(\tau)=mC_{\text{ж}}(\tau), \quad (6)$$

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

Для упрощения понимания решения воспользуемся критериями подобия и введем безразмерные переменные вида:

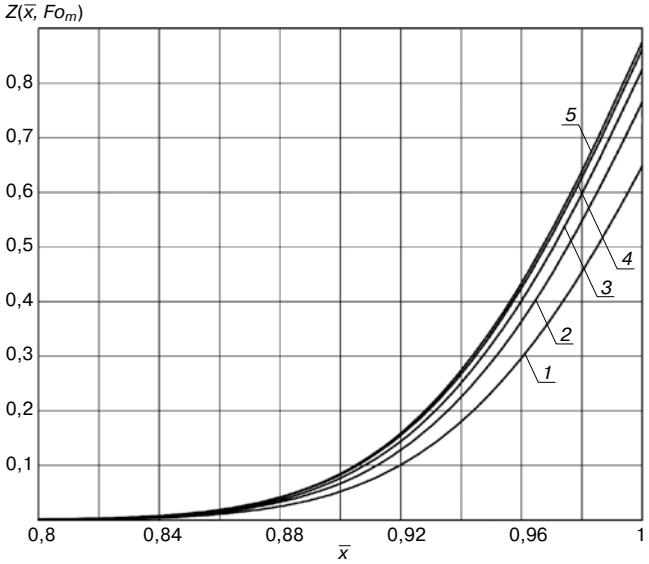

Рис. 1. Профили безразмерных концентраций в бетоне защитного слоя толщиной, мм: *1* – 30; *2* – 45; *3* – 60; *4* – 80; *5* – 90

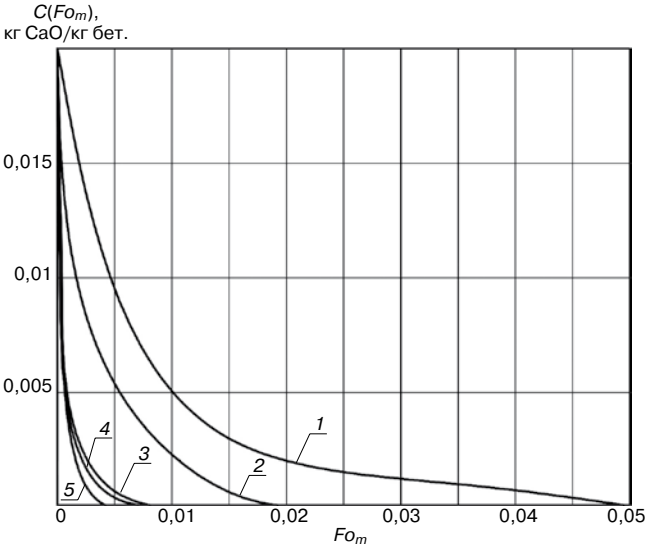

Рис. 2. Изменение концентрации гидроксида кальция на поверхности защитного слоя толщиной, мм: *1* – 30; *2* – 45, *3* – 60; *4* – 80; *5* – 90

$$Z(\bar{x},\ Fo_m)=\frac{C_0-C(x,\tau)}{C_0},\ \ \bar{x}=\frac{x}{\delta},\ \ Fo_m=\frac{k\tau}{\delta^2},\ \ Bi_m=\frac{\beta\delta}{k},$$
$$Z_{ж}(Fo_m)=\frac{C_0-mC_{ж}(\tau)}{C_0}. \qquad (7)$$

Обозначим также: $K_m=\frac{m\cdot S\cdot\delta}{V_{ж}}\cdot\frac{\rho_б}{\rho_ж}=\frac{m\cdot G_б}{G_ж}$, (8)

где K_m – коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $G_б$ – масса бетонного резервуара, кг; $G_ж$ – масса жидкости в резервуаре, кг.

Тогда краевая задача массопроводности в безразмерном виде может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial Z(\bar{x},\ Fo_m)}{\partial Fo_m}=\frac{\partial^2 Z(\bar{x},\ Fo_m)}{\partial\bar{x}^2},\ \ Fo_m>0,\ \ 0\le x\le 1. \qquad (9)$$

Начальное условие: $Z(\bar{x},\ 0)=0.$ (10)

Граничные условия: $\frac{\partial Z(0,\ Fo_m)}{\partial\bar{x}}=0;$ (11)

$$\frac{1}{Bi_m}\cdot\frac{\partial Z(1,\ Fo_m)}{\partial\bar{x}}=\left[Z_р(Fo_m)-Z(1,\ Fo_m)\right]. \qquad (12)$$

В уравнении (12) $Z_р(Fo_m)$ есть то же самое, что и $Z_ж(Fo_m)$.

Тогда условие массообмена бетона и жидкости окончательно примет вид:

$$-\frac{\partial Z_ж(Fo_m)}{\partial Fo_m}=K_m\cdot\frac{\partial Z(1,\ Fo_m)}{\partial\bar{x}}. \qquad (13)$$

Решение системы выполнялось методом интегрального преобразования Лапласа, т. е. исходная система уравнений отображалась в область комплексных чисел, в которых было получено решение системы, а затем был произведен перевод решения в область оригиналов.

При решении системы уравнений (9)–(12) для малых чисел Фурье, получены выражения, позволяющие рассчитать профиль безразмерных концентраций переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени (14) и концентрацию перенесенного компонента в жидкой фазе (15) на начальных этапах процесса коррозии первого вида [4]:

$$\frac{Z(\bar{x},\ Fo_m)}{Z_ж(0)}=-\frac{Bi_m}{\sqrt{Bi_m^2-4K_m}}\sum_{i=1}^{2}(-1)^i\exp\left[-a_i(1-\bar{x})+a_i^2Fo_m\right]\times$$
$$\times\operatorname{erfc}\left(\frac{1-\bar{x}}{2\sqrt{Fo_m}}-a_i\sqrt{Fo_m}\right). \qquad (14)$$

$$\frac{Z_ж(Fo_m)}{Z_ж(0)}=1-\frac{K_m Bi_m}{\sqrt{Bi_m^2-4K_m Bi_m}}\sum_{i=1}^{2}(-1)^{i+1}\left\{2\sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}}+\right.$$
$$\left.+a_i\int_0^{Fo_m}\exp\left(a_i^2Fo_m\right)\times\operatorname{erfc}\left(-a_i\sqrt{Fo_m}\right)dFo_m\right\}, \qquad (15)$$

где $a_i=\frac{-Bi_m\pm\sqrt{D}}{2}$, $i=1,\ 2.$

Полученные решения позволяют определять значение концентраций переносимого компонента (свободного гидроксида кальция) по толщине конструкции в начальных периодах коррозионного разрушения цементных бетонов и, кроме того, дают возможность расчета содержания этого вещества в жидкой фазе и среднее по толщине и объему конструкции, т. е. расчета кинетики процесса по твердой и жидкой фазам.

Теоретические расчеты по представленной математической модели показаны авторами в предыдущих публикациях [5–9]. В данной статье приводятся результаты ее практического применения при проведении обследования строительных конструкций резервуара воды для пожаротушения.

Резервуар имеет в плане прямоугольную форму с общими габаритными размерами 24×24 м. Каркас сооружения сборный железобетонный. Состоит из колонн и ригелей, объединенных жестким диском покрытия из ребристых плит размером 1,5×6 м. Стеновое ограждение – железобетонные панели толщиной 400 мм.

В результате обследования выявлены повреждения коррозионного характера: подтеки конденсата с признаками выщелачивания цементного камня (высолы), отсутствие защитного слоя бетона и коррозия арматуры.

Единственным условием для продления срока службы резервуара является создание эффективного защитного слоя бетона. Для практической оценки срока службы защитного слоя выполнены расчеты по разработанной математической модели.

В расчетах были приняты следующие толщины защитного слоя δ, мм: 30, 45, 60, 80 и 90.

Согласно результатам проведенных расчетов (рис. 1, 2) концентрация гидроксида кальция на поверхности защитного слоя достигнет значения, соответствующего началу разложения высокоосновных составляющих бетона, при массообменном критерии Fo_m, равном: 0,0495; 0,0192; 0,0808; 0,0709 и 0,0042.

Рассчитанным значениям массообменного критерия Фурье соответствуют временные значения: $Fo_m = 0{,}0495$ – 12 лет; $Fo_m = 0{,}0192$ – 7,7 лет; $Fo_m = 0{,}0808$ – 4,5 года; $Fo_m = 0{,}0709$ – 5 лет; $Fo_m = 0{,}0042$ – 3,5 года.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы. Долговечность защитного слоя толщиной 50–100 мм (не более 7,7 лет) недостаточна для обеспечения межремонтного срока службы резервуара, равного 10 годам согласно требованиям эксплуатационной организации. С другой стороны, срок защитного действия в 12 лет обеспечивается при толщине покрытия 30 мм. Необходимо отметить, что в течение этого срока будет отсутствовать необходимость в возобновлении или ремонте защитного слоя.

Применение разработанной математической модели при проведении обследования строительных конструкций резервуара позволило экономически обоснованно назначить средства защиты от коррозии и установить оптимальные сроки проведения ремонтно-восстановительных работ.

Список литературы

1. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Стройиздат, 1952. 342 с.
2. Федосов С.В., Алоян Р.М., Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Аксаковская Л.Н. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов. М.: АСВ, 2005. 277 с.
3. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Федосова Н.Л., Смельцов В.Л. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона первого вида // *Строительные материалы.* 2005. № 7. С. 60–62.
4. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Аксаковская Л.Н. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) // *Строительные материалы.* 2007. № 5. С. 70–71.
5. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Касьяненко Н.С., Смельцов В.Л. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона // *Вестник Волгоградского ГАСУ,* серия «Строительство и архитектура», раздел «Строительные материалы и изделия». 2009. № 14 (33). С. 117–122.
6. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. Вопросы прогнозирования долговечности строительных конструкций // *Строительство и реконструкция.* 2011. № 5 (37). С. 63–69.
7. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Хрунов В.А. Массоперенос в системе «бетон – агрессивная жидкая фаза», осложненный химической реакцией на границе раздела // *Вестник отделения строительных наук.* Орел–Москва–Курск. 2011. № 15. С. 216–219.
8. Федосова Н.Л., Румянцева В.Е., Шестеркин М.Е., Манохина Ю.В. О некоторых особенностях моделирования массопереноса в процессах коррозии первого вида бетона в замкнутой системе «резервуар–жидкость» // *Строительство и реконструкция.* 2013. № 1 (45). С. 86–94.
9. 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 Казанского государственного архитектурно-строительного университета.* 2013. № 4 (26). С. 343–348.

References

1. Moskvin V.M. Korroziya betona [Corrosion of concrete]. Moscow: Strojizdat. 1952. 342 p.
2. Fedosov S.V., Aloyan R.M., Ibragimov A.M., Gnedina L.Yu., Aksakovskaya L.N. Promerzanie vlazhnyh gruntov, osnovanij i fundamentov [Freezing wet soils, basements and foundations]. Moscow: ASV. 2005. 277 p.
3. Fedosov S.V., Rumyantceva V.E., Fedosova N.L., Smel'cov V.L. Modeling of mass transfer processes in liquid corrosion of the concrete of the first kind. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 7, pp. 60–62. (In Russian).
4. Fedosov S.V., Rumyantceva V.E., Hrunov V.A., Aksakovskaya L.N. Modeling of mass transfer in the processes of corrosion of the concrete of the first kind (small values of the number of Fourier). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 5, pp. 70–71. (In Russian).
5. Fedosov S.V., Rumyantceva V.E., Hrunov V.A., Kas'yanenko N.S., Smel'cov V.L. Prediction of structural durability with the positions of the calculated and experimental investigations of the processes of corrosion of concrete. *Vestnik Volgogradskogo GASU.* 2009. No. 14 (33), pp. 117–122. (In Russian).
6. Fedosov S.V., Rumyantceva V.E., Hrunov V.A., Shesterkin M.E. The issues of predicting the durability of building constructions. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya.* 2011. No. 5 (37), pp. 63–69. (In Russian).
7. Fedosov S.V., Rumyantceva V.E., Kas'yanenko N.S., Hrunov V.A. Mass transfer in the system «concrete – aggressive liquid phase», complicated chemical reaction at the interface. *Vestnik otdeleniya stroitel'nyh nauk* [Bulletin of the Department of construction Sciences]. 2011. No. 15, pp. 216–219. (In Russian).
8. Fedosova N.L., Rumyantceva V.E., Shesterkin M.E., Manohina Yu.V. About some features of the modeling of mass transfer in the processes of corrosion of the first type of concrete in a closed system «container-fluid». *Stroitel'stvo i rekonstrukciya.* 2013. No. 1 (45), pp. 86–94. (In Russian).
9. Kayumov R.A., Fedosov S.V., Rumyantceva V.E., Hrunov V.A., Manohina Yu.V., Krasil'nikov I.V. Mathematical modeling of corrosion mass transfer in heterogeneous systems «liquid corrosive environment – cement concrete». Special cases and solutions. *Izvestiya KGASU.* 2013. No. 4 (26), pp. 343–348. (In Russian).

ПОДПИСКА НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА

http://ejournal.rifsm.ru/