

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ НА ПРОТЯЖЕНИИ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ ОТРАСЛИ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГРИБКОВЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ**

**INDUSTRIAL SAFETY MANAGEMENT DURING THE LIFE CYCLE
OF TEXTILE INDUSTRY CONSTRUCTION FACILITIES UNDER THE INFLUENCE
OF FUNGAL MICROORGANISMS**

В.Е. РУМЯНЦЕВА^{1,2}, И.В. КРАСИЛЬНИКОВ^{1,5}, А.А. ГАЛЬЦЕВ^{3,4}, К.Б. СТРОКИН^{3,5}, И.А. КРАСИЛЬНИКОВА⁶

V.E. RUMYANTSEVA^{1,2}, I.V. KRASILNIKOV^{1,5}, A.A. GALTSEV^{3,4}, K.B. STROKIN^{3,5}, I.A. KRASILNIKOVA⁶

¹Ивановский государственный политехнический университет,

²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

³Сахалинский государственный университет,

⁴Тамбовский государственный технический университет,

⁵Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,

⁶Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых)

(¹Ivanovo State Polytechnic University,

²Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters,

³Sakhalin State University,

⁴Tambov State Technical University,

⁵Scientific Research Institute of Construction Physics RAASN,

⁶Vladimir State University)

E-mail: varrym@gmail.com; korasb@mail.ru; galts.alexey@gmail.com;
strokin07@rambler.ru; irinanebukina@rambler.ru

*Статья посвящена исследованию влияния микробиологических процессов на долговечность железобетонных конструкций в условиях агрессивной среды, типичной для предприятий текстильной и легкой промышленности. Основное внимание уделено механизмам жидкостной и биологической коррозии бетона, обусловленным деятельностью грибов *Aspergillus niger*. Рассмотрено влияние добавления в бетон стеарата кальция на процессы коррозии. Представлена математическая модель для прогнозирования кинетики и динамики нестационарного массопереноса в условиях одновременного протекания жидкостной и биологической коррозий бетона. Кроме того, приведены результаты математического моделирования, которые демонстрируют, что использование стеарата кальция позволяет существенно снизить интенсивность вымывания кальция из поверхностного слоя бетона и ингибировать процессы его разрушения.*

*The article is devoted to the study of the influence of microbiological processes on the durability of reinforced concrete structures in aggressive environments typical for textile and light industry enterprises. The main attention is paid to the mechanisms of liquid and biological corrosion of concrete caused by the activity of *Aspergillus niger* fungi. The effect of adding calcium stearate to concrete on corrosion processes is considered. A mathematical model is presented for predicting the kinetics and dynamics of non-stationary mass transfer under conditions of simultaneous liquid and biological corrosion of concrete. In addition, the results of mathematical*

modeling are presented, which demonstrate that the use of calcium stearate can significantly reduce the intensity of calcium leaching from the surface layer of concrete and inhibit the processes of its destruction.

Ключевые слова: жизненный цикл, влажный микроклимат, биологическая коррозия, защита бетона, долговечность конструкций, массоперенос, критерии подобия, гидрофобизация, продукты жизнедеятельности микроорганизмов, метод микропроцессов.

Keywords: life cycle, humid microclimate, biological corrosion, concrete protection, durability of structures, mass transfer, similarity criteria, hydrophobization, microorganism waste products, microprocess method.

В технологических процессах производства изделий текстильной и легкой промышленности, в особенности прядения натуральных волокон, крашения и отделки тканей, устанавливаются параметры микроклимата в цехах предприятий с избыточной влажностью и температурой [1].

Проведенные нами обследования производственных зданий текстильной промышленности Ивановской и Сахалинской областей [2...4] выявили на бетонной поверхности полов, стеновых панелей, ригелей, плит перекрытия и покрытия различные микроорганизмы, большинство из которых являлись грибами *Aspergillus niger*. Проведенные ранее исследования и анализ научной литературы показали целесообразность проектирования и внедрения первичной защиты бетона от биообрастания и биоповреждения. Особенно интенсивно деструктивные процессы биологической коррозии происходят в конструкциях цехов с влажным воздухом, сооружениях, подверженных воздействию агрессивных жидкостей, подземных конструкциях [5].

После длительной эксплуатации в агрессивных условиях при поражении грибковыми микроорганизмами на поверхности конструкции образуется биопленка, а защитный слой железобетонных конструкций разрушается (рис. 1).

К строительным конструкциям всех предприятий текстильной и легкой промышленности предъявляются высокие требования по коррозионной стойкости применяемых материалов [6]. Данное условие необходимо для обеспечения прежде всего

требуемого уровня промышленной безопасности данных объектов [7]. Проектирование долговечности железобетонных конструкций традиционно основывается на установившихся правилах и требованиях к характеристикам материалов, качеству их составляющих, условиям работы конструкции, отраженных в действующих отечественных нормативных документах и ряде документов зарубежных стран. Очевидна естественная связь между качеством сооружения и его сроком службы [8].

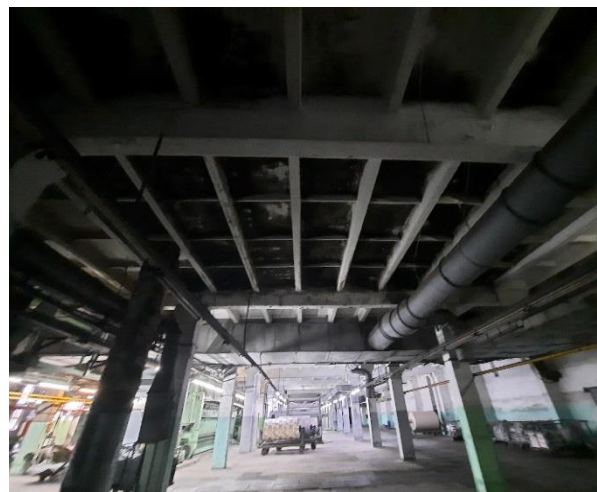


Рис. 1

Жизненный цикл объектов строительства определяется периодом поддержания запроектированных механических, физических и химических свойств, обеспечивающих безотказность работы строительных конструкций [9...11].

В аспекте прогнозирования долговечности конструкции предприятий текстильной

и легкой промышленности, по нашему мнению, можно разделить на условные группы:

- конструкции, расположенные ниже уровня технологического оборудования (полы, перекрытия), подвергающиеся периодическому воздействию проливов технологических жидкостей, представляющих собой сильноагрессивные растворы кислот и щелочей;

- конструкции, расположенные в грунте (фундаменты, подвалы, каналы), подвергающиеся воздействию грунтовых вод, насыщенных технологическими растворами;

- конструкции основного каркаса зданий (колонны, ригели, балки, фермы), подверженные воздействию газовой среды с повышенной влажностью, содержащей аэрозоли серной кислоты или хлор;

- ограждающие конструкции (конструкции фонарей, покрытия, стеновые ограждения), подверженные внутри здания воздействию газовых сред с высокой влажностью, обуславливающей выпадение конденсата, и снаружи здания периодическому воздействию осадков;

- второстепенные конструктивные элементы, предназначенные для защиты от воздействия воды основных конструкций (отмостки, козырьки).

Кроме промышленных зданий на предприятиях текстильной и легкой промышленности существует ряд сооружений, которые ввиду своего основного назначения находятся в постоянном контакте с жидкостями, вызывающими жидкостную коррозию бетона: резервуары, сооружения канализации и водоочистки и т. п.

Отметим, что расчеты долговечности конструкций, подверженных жидкостной коррозии бетона, в том числе и на предприятиях текстильной и легкой промышленности, приведены нами в работах [2...4, 12, 13].

Массоперенос при жидкостной биологической коррозии развивается от границы раздела фаз и постепенно продвигается вглубь. Интенсивность массопереноса на границе раздела фаз «цементный бетон – жидкая среда» определяет коэффициент массоотдачи. Результаты исследований показали, что в отсутствие добавки стеарата

кальция микроорганизмы оказывают существенное влияние на коэффициент массоотдачи [17].

Наличие микроорганизмов определяет параметры массопереноса, а вырабатываемые микроорганизмами кислоты вступают в химические реакции со свободным гидроксидом кальция, провоцируя активные и пассивные кислотные атаки [18].

При воздействии грибковых микроорганизмов на железобетонные элементы в условиях жидкостной коррозии с точки зрения массопереноса последовательно или параллельно происходят следующие физико-химические процессы: выделение грибковыми микроорганизмами в поровый раствор цементного камня органических кислот, диффузия кислот вглубь конструкции (по ее толщине); массоперенос целевого компонента бетона (гидроксида кальция) по толщине изделия к поверхности, контактирующей с жидкостью, с последующим переходом в жидкую фазу; гетерогенные химические реакции растворов органических кислот с целевым компонентом бетона – гидроксидом кальция; последующая кольматация порового пространства либо диффузия продуктов реакции по толщине конструкции с возможным переходом во внешнюю жидкую среду [14].

Рассматриваемый процесс жидкостной коррозии бетона, осложненный воздействием микроорганизмов, с точки зрения теории тепломассопереноса следует рассматривать как нестационарный массоперенос в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса [15], поскольку на протяжении процесса изменяются коэффициенты массопроводности и массоотдачи, а также концентрации продуктов жизнедеятельности грибковых микроорганизмов – органические кислоты.

Решение задачи по прогнозированию кинетики и динамики процесса нестационарного массопереноса в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса для систем «цементный бетон – биопленка – жидкость» научной школой академика РААСН С.В. Федосова предложено выполнить комбинацией следующих методов: микропроцессов, зонального и инте-

грального преобразования Лапласа, а также теории подобия [16].

При математическом моделировании массопереноса в условиях жидкостной коррозии бетона необходимо использовать следующие критерии подобия [14...16]:

- массообменный критерий Фурье:

$$Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}; \quad (1)$$

- массообменный критерий Био:

$$Bi_m = \frac{\beta}{k} \delta; \quad (2)$$

- модифицированный массообменный критерий Померанцева:

$$Po_m^* = \frac{q_v \cdot \delta^2}{k\rho_{бет} \cdot C_0}; \quad (3)$$

- модифицированный массообменный критерий Кирпичева:

$$Ki_m^* = \frac{q_m \cdot \delta}{k\rho_{бет} \cdot C_0}, \quad (4)$$

где k – коэффициент массопроводности гидроксида кальция в бетоне, m^2/c ; β – коэффициент массоотдачи гидроксида кальция в жидкой среде, m/c ; q_v – мощность объемного выделения (поглощения) гидроксида кальция вследствие фазовых и химических превращений, $kg CaO/(m^3 \cdot c)$; q_m – плотность потока массы свободного гидроксида кальция, $kg CaO/(m^2 \cdot c)$; C_0 – начальное равномерно распределенное значение концентраций свободного гидроксида кальция в бетоне, $kg CaO/kg$ бетона; δ – толщина рассматриваемой конструкции, m ; τ – время, c ; $\rho_{бет}$ – плотность бетона, kg/m^3 .

При математическом моделировании массопереноса целевого компонента в структуре гидрофобизированного стеаратом кальция цементного бетона следует учитывать, что коэффициенты массопроводности у образцов бетона без добавки и со стеаратом кальция различаются на два порядка и имеют значения в интервалах $0,5...2 \cdot 10^{-9} m^2/c$ и

$3...7 \cdot 10^{-11} m^2/c$ соответственно. Диффузионные процессы в структуре гидрофобизированного стеаратом кальция цементного бетона протекают с малой интенсивностью [17].

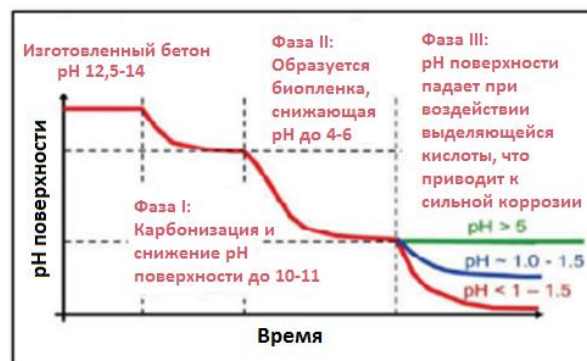


Рис. 2

Бетон под воздействием микроорганизмов подвержен многоступенчатой деградации. Процесс воздействия микроорганизмов на бетон был разделен на три отдельных этапа на основе теоретической модели [18]. На рис. 2 показана соответствующая схема. Первый этап включает в себя абиотическое снижение pH бетонного изделия, которое происходит в результате карбонизации и воздействия кислот, являющихся продуктами жизнедеятельности микроорганизмов. На данном этапе нет заметных потерь материала. На втором этапе бетонное покрытие испытывает дальнейшее снижение pH на поверхности. В основном это происходит из-за прикрепления и роста биопленки на поверхности. Третья стадия относится к состоянию, при котором снижение уровня pH поверхности достигает таких минимумов, что бетон может подвергнуться кислотному воздействию. Это стадия, на которой происходит массовая потеря материала со скоростью коррозии более 10 мм в год.

Под воздействием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов происходят изменения прочностных характеристик бетона [19]. Моделирование действия биогенных кислот показало, что снижение прочности на сжатие бетона в молочной кислоте более значительное, чем в случае воздействия сернистой кислоты [20]. Из этого можно полагать, что грибковые микроорга-

низмы, вырабатывающие органические кислоты, наносят больший вред цементным бетонам по сравнению с бактериями.

Физическое проникновение и разрастание бактериальных и грибковых гиф в зазоры, поры, трещины и границы камней также представляют большую угрозу для биофизического и биомеханического повреждения. Физическое проникновение гиф вдоль кристаллической плоскости дестабилизирует текстуру камня и увеличивает по-

ристость, что вызывает биомеханическое разрушение камней [21, 22].

Перед выбором граничных условий определим лимитирующие факторы диффузии. Соотношение внутри- и внешнедиффузионных сопротивлений при массопереносе с участием твердой фазы определяет массообменный критерий Био [23]. Результаты его расчета для моделируемой системы при различных толщинах конструкций представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Толщина конструкции, мм	Критерий Био при жидкостной коррозии образцов бетона					
	не зараженных грибками			зараженных грибками		
	Количество добавки стеарата кальция					
	0	0,5%	1%	0	0,5%	1%
30	19,00	302,61	251,61	15,65	327,69	349,09
50	31,67	504,35	419,35	26,09	546,15	581,82
70	44,33	706,09	587,10	36,52	764,62	814,55
100	63,33	1008	838,71	52,17	1092,31	1163,64
150	95,00	1513	1258	78,26	1638,46	1745,45
200	126,7	2017	1677	104,3	2184,6	2327,2
250	158	2521	2096	130	2730	2909
300	190	3026	2516	156	3276	3490,9
400	253,3	4034,78	3354,84	208,70	4369,23	4654,5
500	316,7	5043,4	4193,5	260,8	5461,5	5818

Из табл. 1 видно, что даже при небольших толщинах конструкций значения критерия Био существенно больше единицы. Следовательно, жидкостная коррозия бетона, осложненная воздействием микроорганизмов, преимущественно лимитируется внутренней диффузией. В таком случае на границе раздела фаз допустимо применять граничные условия первого рода [16].

В соответствии с методологией расчета нестационарных массообменных процессов при одновременной жидкостной и биологической коррозии в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса по толщине конструкции расчет полей концентраций целевого компонента следует производить с разделением на две зоны:

- по толщине первой зоны происходит поглощение свободного гидроксида кальция в результате химических реакций с органическими кислотами, а на ее границе с жидкостью – массоотдача свободного гидроксида кальция;

- по толщине второй зоны происходит только диффузия гидроксида кальция к границе с первой зоной.

Математическое моделирование динамики нестационарного массопереноса при одновременной жидкостной и биологической коррозии в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса по толщине конструкции проводим методом микропроцессов, разбивая весь период эксплуатации на небольшие временные интервалы $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$. В каждом микропроцессе считаем параметры среды и коэффициент массопроводности постоянными. Две выделенные зоны между собой будут отличаться численными значениями граничных условий, коэффициента массопроводности и наличием в первой зоне мощности объемного поглощения гидроксида кальция вследствие химических реакций с органическими кислотами. Расчетная схема массопереноса в условиях жидкостной и биологической коррозии бе-

тона показана на рис. 3. В последующих расчетах и на рис. 3 обозначено: C_p – равновесная концентрация гидроксида кальция в жидкости у границы раздела фаз, кг СаО/кг бетона; $C_ж$ – концентрация гидроксида кальция в объеме жидкой фазы, $C(x, \tau)$ – распределение концентраций свободного гидроксида кальция в поровой структуре бетона в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг СаО/кг бетона; δ – общая толщина рассчитываемого железобетонного элемента; δ_1 – толщина первой зоны, в которой происходит поглощение свободного гидроксида кальция в результате химических реакций с органическими кислотами и его массоперенос к границе раздела фаз; δ_2 – толщина второй зоны, в которой происходит только диффузия гидроксида кальция к границе первой зоны. В настоящем исследовании приняты единицы измерения (кг СаО/кг бетона), соответствующие общепринятым в теории и практике прогнозирования долговечности бетона [8, 14, 20].

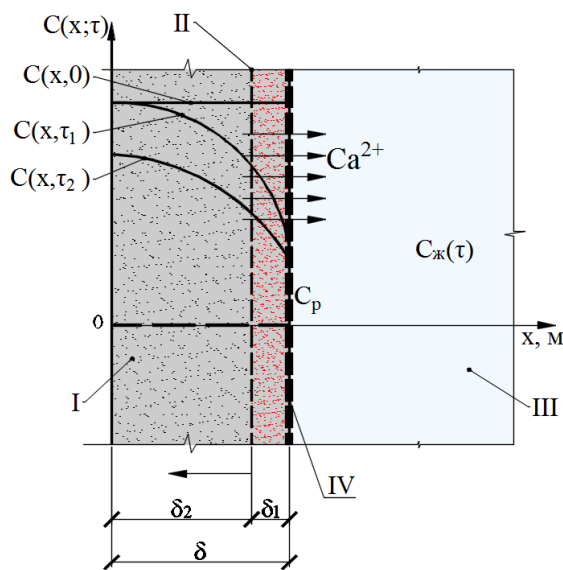


Рис. 3

Отметим, что в начале процесса первая зона отсутствует: $\tau = 0$, $\delta_1 = 0$, а затем по мере размножения микроорганизмов и выделения ими органических кислот на поверхности элемента начинают происходить химические реакции. Граница между выделяемыми зонами массопереноса при одно-

временной жидкостной и биологической коррозии ввиду нестационарной диффузии органических кислот от поверхности биопленки внутрь железобетонного элемента перемещается (в соответствии с расчетной схемой рис. 3 справа налево), т. е. δ_1 в течение процесса увеличивается, а δ_2 уменьшается. Изменение соотношений между толщинами выделяемых зон можно выполнять на границах микропроцессов.

Рассмотрим физико-химические процессы выделяемых зон по толщине конструкции с точки зрения математического моделирования массопереноса. В первой зоне параллельно протекают массоперенос свободного гидроксида кальция от левой границы зоны к правой посредством градиента концентраций с последующим переходом переносимого компонента из капиллярно-пористой структуры цементного бетона во внешнюю жидкую среду, лимитируемый внутренней диффузией, и поглощение свободного гидроксида кальция в результате его химических реакций с продуктами жизнедеятельности бактерий. Для первой зоны i -го микропроцесса задача нестационарного массопереноса, осложненная наличием внутреннего источника массы, расчетная схема которого – неограниченная пластина, запишется следующей системой уравнений [16, 24]:

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x, \tau)}{\rho_{бет}}, \tau > 0, \delta_2 \leq x \leq \delta_1, \quad (5)$$

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, \tau) = C_{0,1}(x), \quad (6)$$

$$C_1(\delta_1, \tau) = C_{\delta_1}, \quad (7)$$

$$C_1(\delta, \tau) = C_p. \quad (8)$$

Соотношения (6) – начальное условие, по которому в начале рассматриваемого i -го микропроцесса описывается распределение концентраций свободного гидроксида кальция. При моделировании численные значения распределений концентраций могут быть аппроксимированы [25] некоторыми несложными для анализа математическими функциями. Граничное условие на левой границе первой зоны (7) определяет

фиксированное значение концентрации на i -м микропроцессе, вычисляемое по расчету второй зоны. Одновременно на правой границе устанавливается равновесное значение концентраций гидроксида кальция, описываемое граничным условием первого рода (8). Численные значения концентраций на границах первой зоны изменяются при переходе между микропроцессами.

В конце i -го микропроцесса на левой границе первой зоны можно определить значение плотности потока массы гидроксида кальция:

$$\rho_{\text{бет}} k_1 \left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_2} = -q_{m1}. \quad (9)$$

Рассчитанное по формуле (9) значение плотности потока массы переходит для определения динамики массопереноса второй выделенной зоны, в которой в соответствии с расчетной схемой рис. 3 протекает только массоперенос свободного гидроксида кальция от левой границы зоны к правой посредством градиента концентраций, что описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (10)$$

$$C_1(\bar{x}_1, Fo_{m1}) = (C_{\delta_1} - C_p) \left[(1 - \bar{x}_1) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \pi m \bar{x}_1}{m} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m1}) \right] + C_p +$$

$$+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin \pi m \bar{x}_1 \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m1}) \int_0^1 (C_{0,1}(\xi_1) - C_p) \sin(\pi m \xi_1) d\xi_1 +$$

$$+ \bar{x} C_p \int_0^1 Po_m^*(\xi_1) (1 - \xi_1) d\xi_1 - \frac{2C_p}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \pi m \bar{x}_1}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m1}) \int_0^1 Po_m^*(\xi_1) \sin(\pi m \xi_1) d\xi_1, \quad (14)$$

$$C_2(\bar{x}_2, Fo_{m2}) = C_0 - \frac{K_{1m}^*}{6} (6Fo_m + 3\bar{x}_2^2 - 1) C_0 + \int_0^1 (C_{0,2}(\xi_2) - C_0) d\xi_2 +$$

$$+ \frac{2C_0 K_{1m}^*}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} \cos(\pi m \bar{x}_2) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m2}) +$$

$$+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \pi m \bar{x}_2 \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m2}) \int_0^1 (C_{0,2}(\xi_2) - C_0) \cos(\pi m \xi_2) d\xi_2, \quad (15)$$

$$C_2(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = C_2(x, \tau) = C_{0,2}(x), \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (12)$$

$$\rho_{\text{бет}} k_2 \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_2} = -q_{m1}. \quad (13)$$

В соответствии с расчетной схемой движение вещества спровоцировано на правой границе второй зоны, т. е. при решении линейного дифференциального уравнения (10) применяем граничное условие второго рода (13). Краевое условие на левой границе второй зоны – условие проляции (частный случай граничного условия второго рода), математически отражающее отсутствие потока свободного гидроксида кальция.

Решение систем дифференциальных уравнений получено в безразмерных переменных методом интегрального преобразования Лапласа научной школой академика РААСН С.В. Федосова [26]. Принимая во внимание особенности расчета полей концентраций в числах с учетом разных методов перевода в безразмерные величины при решении систем уравнений первой и второй зоны, приведем аналитические решения распределения концентраций по зонам:

где $\bar{x}_1; \bar{x}_2; \xi_1; \xi_2$ – относительные безразмерные координаты в пределах рассматриваемой зоны и отнесенные к ее толщине на i -м микропроцессе; ξ – безразмерная координата абсцисс начального распределения концентраций или источника массы.

По приведенным выражениям (14) и (15), основываясь на принципах и допущениях метода микропроцессов, смоделировали массоперенос целевого компонента в структуре гидрофобизированного стеаратом кальция цементного бетона при воздействии грибковых микроорганизмов в условиях жидкостной коррозии на железобетонную стенку толщиной 250 мм.

Моделирование выполнено для различной интенсивности действия вырабатыва-

емых микроорганизмами кислот: при активных и пассивных кислотных атаках. Весь расчетный период эксплуатации в биологически активной среде разделялся на микропроцессы продолжительностью 60 суток, на первом микропроцессе первая зона не выделялась. Между каждым микропроцессом корректировались граничные условия, значения коэффициента массопроводности и мощность источника поглощения гидроксида кальция при химическом взаимодействии с органическими кислотами. При моделировании пассивной кислотной атаки принималось, что действие кислот чередуется через 1 микропроцесс. Результаты моделирования показаны на рис. 4...6.

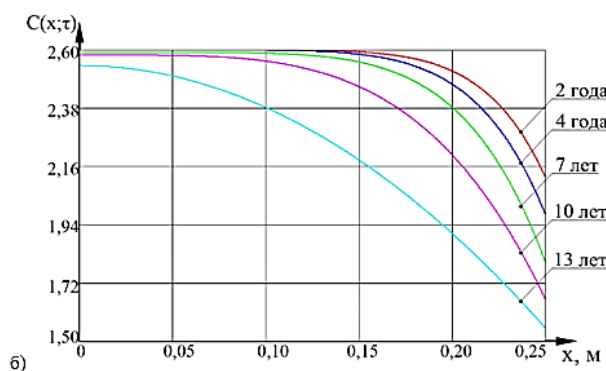
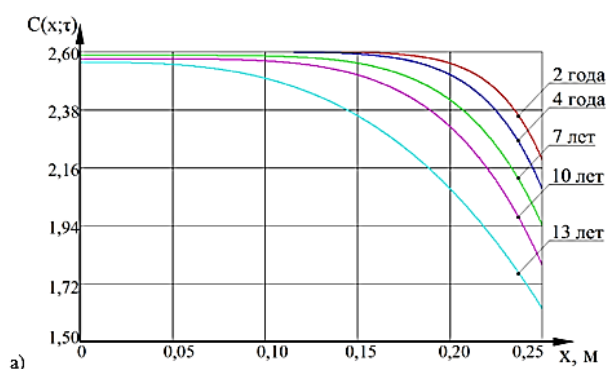


Рис. 4

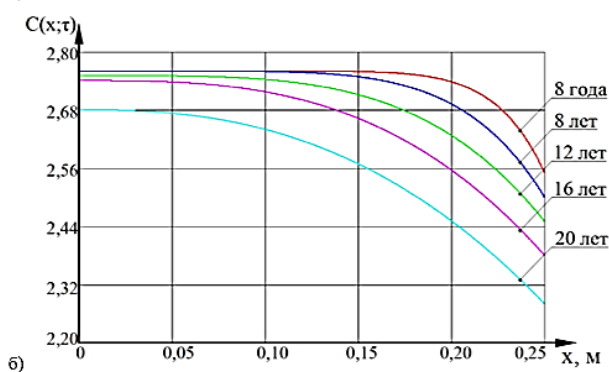
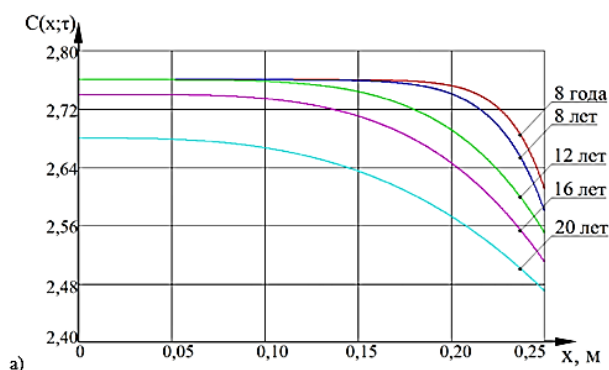


Рис. 5

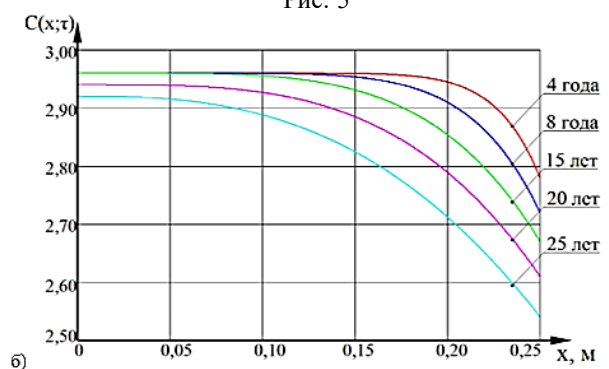
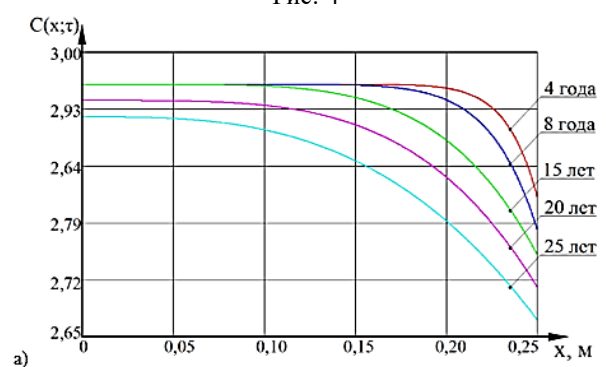


Рис. 6

Прогноз на длительный срок показывает, что основные повреждения от грибкового воздействия будут не только сконцентрированы на поверхности бетона, но и по его толщине начнутся деструктивные процессы. В бетоне с добавками стеарата кальция наиболее интенсивное вымывание кальция из поверхностного слоя произойдет в течение 4 лет биоповреждения, затем процессы замедлятся аналогично той картине, что была установлена экспериментально на начальном этапе коррозии [27, 28].

В бетоне без добавок разложение кальцийсодержащих фаз в поверхностном слое начнется после 4 лет грибковой деструкции при увлажнении и уже к 10 годам эксплуатации бетона в этих условиях распространится на всю толщину [29]. Исходя из профилей на рис. 4 можно ожидать, что нарушение целостности структуры бетона вследствие разрушения связей между компонентами и потери прочности произойдет через 15 лет после биообрастания [30...35].

Сроки возникновения подобных состояний разрушения гидросиликатов кальция в бетоне с добавками стеарата кальция [36...41] составляют 12...15 лет (рис. 5 и рис. 6). Можно считать, что за это время выделяемые грибами вещества проникнут через поровую структуру бетонного покрытия к поверхности арматуры [41...47]. Развитие деструктивных процессов продлится и после 20...25 лет эксплуатации, а снижение прочности бетона достигнет опасных значений через 30...35 лет, когда повреждения будут распространены по всему объему бетона [18, 48...50].

ВЫВОДЫ

1. Микроорганизмы, особенно грибковые *Aspergillus niger*, активно влияют на процессы коррозии и биологического обрастания конструкций с бетонной поверхностью в условиях повышенной влажности и температуры, характерных для предприятий текстильной и легкой промышленности.

2. Под воздействием микроорганизмов происходит многоступенчатая деградация бетона, начиная с изменения рН и заканчи-

вая массовой потерей материала. Эти процессы приводят к снижению прочностных характеристик бетона и увеличению его пористости.

3. Для обеспечения требуемого уровня промышленной безопасности и долговечности конструкций необходимо учитывать коррозионную стойкость применяемых материалов. Традиционно проектирование долговечности железобетонных конструкций основывается на установленных правилах и требованиях к материалам и условиям их эксплуатации.

4. Применение методов математического моделирования позволяет прогнозировать динамику и кинетику нестационарного массопереноса в средах с переменными потенциалами и коэффициентами переноса. Использование критериев подобия помогает оценить интенсивность массопереноса и выявить лимитирующие факторы диффузии.

5. Добавление стеарата кальция в состав бетона способствует уменьшению интенсивности массопереноса и снижает скорость выщелачивания кальция из бетона, тем самым увеличивая его долговечность. Однако даже с такими добавками полное предотвращение коррозии невозможно.

6. Полученные результаты позволяют разработать рекомендации по проектированию и защите бетонных конструкций на предприятиях текстильной и легкой промышленности с учетом воздействия агрессивных сред и биологических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Циркина О.Г., Салихова А.Х., Сырбу С.А. и др. Разработка огнезащитных композиций для обивочных мебельных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. № 1 (409). С. 122...130.
2. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. и др. Изменение несущей способности строительных конструкций предприятий текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 2 (404). С. 218...227.
3. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В. и др. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // Изв. вузов. Техноло-

гия текстильной промышленности. 2017. № 6 (372). С. 268...276.

4. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Исследования физико-химических процессов в системе «цементный бетон - жидкая агрессивная среда» // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 61...70.

5. Король Е.А., Кустикова Ю.О., Шенберева А.В. Эксплуатационная безопасность кирпичных наружных стен предприятий текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3 (405). С. 201...208.

6. Травуш В.И., Гурьев В.В., Дмитриев А.Н. и др. О концепции развития нормативно-технической базы строительных объектов в период их эксплуатации // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 1. С. 121...133.

7. Римшин В.И., Лукин М.В., Рева Д.В., Рощина С.И. Повышение энергоэффективности вспомогательных зданий текстильной промышленности за счет продления цикла жизнедеятельности сборных композитных стеновых панелей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2023. № 6 (408). С. 203...213.

8. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Баев С.М. Определение коррозионной стойкости торкрет-бетона как защитного покрытия бетонных и железобетонных конструкций // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 69...73.

9. Гусев Б.Н., Матрохин А.Ю., Грузинцева Н.А., Лысова М.А. Обеспечение качества технического текстиля для производства строительных изделий на различных этапах жизненного цикла // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 2 (404). С. 69...78.

10. Лысова М.А., Грузинцева Н.А., Гриценко Е.А., Гусев Б.Н. Обеспечение необходимого уровня качества технического текстиля с учетом требований специалистов строительной отрасли // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4 (406). С. 96...102.

11. Лысова М.А., Коробов Н.А., Грузинцева Н.А., Гусев Б.Н. Компьютерное исследование процесса кольтмации нетканых геотекстильных полотен при дренировании объектов строительства // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 2 (392). С. 113...117.

12. Rakhmonov B.S., Sagdiev Kh.S., Ter-Martirosyan A.Z. etc. Energy-based evaluation of dynamic soil-structure interaction process under seismic impact from explosion // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2024. Т. 20. № 6. Р. 613...627.

13. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 403 LNNS. С. 1362...1370. – DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_152

14. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V. etc. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // Magazine of Civil

Engineering. 2018. № 7 (83). Р. 198...207. – DOI: 10.18720/MCE.83.18

15. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Математическое моделирование нестационарного массопереноса в системе "цементный бетон - жидкая среда", лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей // Строительные материалы. 2022. № 1-2. С. 134...140. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-79-9-1-2-134-140

16. Федосов С.В., Красильников И.В., Румянцева В.Е., Красильникова И.А. Физические особенности проблем жидкостной коррозии железобетона с позиций теории тепломассопереноса // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 4. С. 392...409. – DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-392-409

17. Aimenov Zh.T., Aimenov A.Z., Erofeev V.T. etc. The effect of modifying additives on the performance properties of slag-alkali binders and concretes // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Т. 20. № 1. С. 162...170.

18. Dubey R.S., Yaman S. Microbiologically influenced corrosion of concrete: a review // International Journal of Current Research. 2019. Vol. 11. Issue 06. Р. 4282...4287.

19. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Новикова У.А. и др. Трансформация прочности бетона при эксплуатации конструкции в агрессивной воздушной среде с изменяющимися параметрами // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 158...168.

20. Erbehtas A.R., Isgor O.B., Weiss W.J. Comparison of Chemical and Biogenic Acid Attack on Concrete // ACI Materials Journal. 2020. Vol. 117. No. 1. Рр. 255...264.

21. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. и др. Определение влияния вязкости насыщающей жидкости на физико-механические характеристики цементного камня различной пористости // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 2 (43). С. 143...152.

22. Ma H., Cheng X., Li G. etc. The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions. Corrosion Science. 2000. Vol. 42. Issue 10. Р. 1669...1683. – [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00003-2)

23. Yang Z., Li Q., Liu M. etc. Efflorescence inhibition and microstructure evolution of Portland cement-based artificial stone induced by mineral additives // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. e01509. – DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01509

24. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Новикова У.А. и др. Моделирование массопереноса агрессивных растворов солей в торкрет-бетонном покрытии // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 116...128.

25. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. и др. Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов // Современ-

ные проблемы гражданской защиты. 2022. № 1 (42). С. 24...31.

26. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В. Методы математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких агрессивных средах. М.: Изд-во АСВ, 2021. 244 с.

27. Zhang Y., Xu M., Song J. *etc.* Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO₂ corrosion in ultra-high-temperature acid gas wells // *Construction and Building Materials*, 2022, 323, 125879. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125879

28. Smirnova N.N., Krasilnikov I.V. An effect of the nature of immobilized components on the adsorption and mass transfer properties of ultrafiltration membranes based on sulfonate-containing copolyamide // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. Т. 92. № 11. С. 1570...1580. – DOI: 10.1134/S1070427219110144

29. Chukhlanov V.Yu., Smirnova N.N., Katalevsky A.D. *etc.* Dielectric characteristics of the composition based on poly-m-phenylenizophthalamide and ceramic spheres // *AIP Conf. Proc.* 2024. 3102, 040025. – DOI: 10.1063/5.0200028

30. Monastyrev P.V., Elchishcheva T.F., Makarchuk M.V. *etc.* The effect of montmorillonite on the rheological and physico-mechanical properties of a thermo-setting polymer composite // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Т. 20. № 2. С. 109...117.

31. Zemskova O., Erofeev V., Samchenko S. *etc.* Biocidal properties of gypsum stone modified with reynoutria sachalinensis raw materials // *BioResources*. 2024. Т. 19. № 4. P. 8912...8919.

32. Rodin A., Ermakov A., Erofeeva I., Erofeev V. Effect of chlorides content on the structure and properties of porous glass ceramics obtained from siliceous rock // *Materials*. 2022. Т. 15. № 9, 3268. – DOI: 10.3390/ma15093268

33. Solodilova V.A., Dubrakova K.O., Bulgakov A.G. *etc.* Fire resistance of statically indeterminate steel systems // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. № 1 (99). P. 9901.

34. Rimshin V.Iv., Kurbatov V.L., Erofeev V.T., Ketsko E.S. Degradation damages survey of the silt reservoir structures // *Building and Reconstruction*. 2022. № 2 (100). P. 65...74.

35. Erofeev V.T., Vatin N.I., Maksimova I.N. *etc.* Powder-activated concrete with a granular surface texture // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Т. 18. № 4. P. 49...61.

36. Fedosov S.V., Bulgakov B.I., Hung N.X. *etc.* Forecast of the durability of shore structures made of reinforced concrete // *Solid State Phenomena*. 2022. Т. 334. P. 217...224. – DOI: 10.4028/p-8657j1

37. Sharafutdinov K.B., Saraykina K.A., Kasheva-rova G.G., Erofeev V.T. The use of copper nanomodified calcium carbonate as a bactericidal additive for concrete // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Т. 18. № 2. P. 143...155.

38. Erofeev V.T., Kaznacheev S.V., Pankratova E.V. *etc.* Physical and mechanical properties of pre-bound

aggregate composites // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Т. 18. № 5. P. 399...406.

39. Shafigullin L.N., Romanova N.V., Erofeev V.T. *etc.* Using products of polyethylene recycling for the production of holding tanks // *Materials Physics and Mechanics*. 2022. Т. 50. № 2. P. 266...274.

40. Rodin A., Ermakov A., Kyashkin V. *etc.* Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. № 5 (121). P. 12109. – DOI: 10.34910/MCE.121.9

41. Sharafutdinov K.B., Saraykina K.A., Kasheva-rova G.G. *etc.* Strength and durability of concretes with a super absorbent polymer additive // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023. Т. 19. № 2. P. 120...135.

42. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V. *etc.* Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂ // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Т. 51. № 5. P. 127...141.

43. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Vatin N.I. Deformation and heat-insulating characteristics of light concrete on porous burned binder under heating // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Т. 51. № 1. P. 33...41.

44. Булгаков А.Г., Ерофеев В.Т., Мальцев П.В. Электромагнитные отражающие свойства полиамидного полотна с серебряным напылением // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2023. № 6 (408). С. 134...142.

45. Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M. *etc.* High temperature ceramic-vermiculite thermal insulation with wollastonite binder // *Glass and Ceramics*. 2023. Т. 80. № 7-8. P. 283...289.

46. Il'ina V., Stroikova V., Erofeev V. *etc.* Photo-reactive acrylic-alkyd composition with biocide additive for wood protection coating development // *Architecture and Engineering*. 2024. Т. 9. № 3. P. 53...62.

47. Konovalova V.S. Investigation of the effect of volumetric hydrophobization on the kinetics of mass transfer processes occurring in cement concretes during corrosion // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 10. P. 3827.

48. Erofeev V., Gladkin S., Rodin A. *etc.* Chemical, physical, fresh and mechanical properties of modified biocidal cements // *Structures*. 2024. Т. 64. P. 106649.

49. Al-Dulaimi S.D.S., Badamshin R., Afonin V. *etc.* Investigation of the biostability of magnesia composites in the simulated environment of mycelial fungi found in construction materials // *Revue des Composites et des Materiaux Avances*. 2024. Т. 34. № 6. P. 707...717.

50. Shvetsova V., Soloviev V., Matiushin E., Erofeev V. The effects of combined use of sodium citrate and pce plasticizer on microstructure and properties of binary opc-cac binder // *Materials*. 2024. Т. 17. № 23. P. 5901.

REFERENCES

1. Tsirkina O.G., Salikhova A.Kh., Syrbu S.A. *etc.* Development of fire-retardant composition for upholstery furniture fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstilnoi Promyshlennosti*. 2024. No. 1 (409). P. 122...130.

2. *Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. etc.* Changing the bearing capacity of building structures of textile and light industry enterprises // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. № 2 (404). P. 218...227.
3. *Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V. etc.* Determination of safe service life of structures made of concrete containing hydrophobic additive // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2017. № 6 (372). P. 268...276.
4. *Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A.* Research of physical and chemical processes in the system "cement concrete - liquid aggressive environment" // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 61...70.
5. *Korol E.A., Kustikova Yu.O., Shenberova A.V.* Operational safety of brick exterior walls of textile industry enterprises // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. № 3 (405). P. 201...208.
6. *Travush V.I., Guryev V.V., Dmitriev A.N. etc.* About the concept of development of the regulatory and technical base of construction objects during their operation // *Academia. Architecture and construction*. 2021. No. 1. P. 121...133.
7. *Rimshin V.I., Lukin M.V., Reva D.V., Roshchina S.I.* Improving the energy efficiency of auxiliary buildings of the textile industry by extending the life cycle of prefabricated composite wall panels // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. № 6 (408). P. 203...213.
8. *Stepanova V.F., Rosenthal N.K., Chekhov G.V., Baev S.M.* Determination of corrosion resistance of shotcrete as a protective coating of concrete and iron-concrete structures // *Building materials*. 2018. No. 8. P. 69...73.
9. *Gusev B.N., Matrokhin A.Yu., Gruzintseva N.A., Lysova M.A.* Quality assurance of technical textile for the manufacture of building products at different stages of the life cycle // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. No. 2 (404). P. 69...78.
10. *Lysova M.A., Gruzintseva N.A., Gritsenko E.A., Gusev B.N.* Ensuring the required level of technical textile quality taking into account the requirements of specialists of construction industry // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. No. 4 (406). P. 96...102.
11. *Lysova M.A., Korobov N.A., Gruzintseva N.A., Gusev B.N.* Computer study of the process of colmatation of nonwoven geotextile fabrics during draining of construction objects // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. No. 2 (392). P. 113...117.
12. *Rakhmonov B.S., Sagdiev Kh.S., Ter-Martirosyan A.Z. etc.* Energy-based evaluation of dynamic soil-structure interaction process under seismic impact from explosion // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024. T. 20. № 6. P. 613...627.
13. *Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A.* Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. T. 403 LNNS. C. 1362...1370. – DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_152
14. *Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V. etc.* Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 7 (83). C. 198...207. – DOI: 10.18720/MCE.83.18
15. *Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A.* Mathematical modeling of unsteady mass transfer in the "cement concrete - liquid medium" system, limited by internal diffusion and external mass transfer // *Building materials*. 2022. No. 1-2. P. 134...140. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-79-9-1-2-134-140
16. *Fedosov S.V., Krasilnikov I.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikova I.A.* Physical features of the problems of liquid corrosion of reinforced concrete from the standpoint of the theory of heat and mass transfer // *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2023. Vol. 19. No. 4. P. 392...409. – DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-392-409
17. *Aimenov Zh.T., Aimenov A.Z., Erofeev V.T. etc.* The effect of modifying additives on the performance properties of slag-alkali binders and concretes // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. T. 20. № 1. P. 162...170.
18. *Dubey R.S., Yaman S.* Microbiologically influenced corrosion of concrete: a review // *International Journal of Current Research*. 2019. Vol. 11. Issue 06. Pp. 4282...4287.
19. *Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Novikova U.A. etc.* Transformation of concrete strength during construction operation in an aggressive air environment with changing parameters // *Modern problems of civil protection*. 2023. No. 3 (48). P. 158...168.
20. *Erbektas A.R., Isgor O.B., Weiss W.J.* Comparison of Chemical and Biogenic Acid Attack on Concrete // *ACI Materials Journal*. 2020. Vol. 117. No. 1. P. 255...264.
21. *Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. etc.* Determination of the influence of the viscosity of the drying liquid on the physico-mechanical characteristics of cement stone of various porosity // *Modern problems of civil protection*. 2022. No. 2 (43). P. 143...152.
22. *Ma H., Cheng X., Li G. etc.* The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions. *Corrosion Science*. 2000. vol. 42. issue 10. P. 1669...1683. – [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00003-2)
23. *Yang Z., Li Q., Liu M. etc.* Efflorescence inhibition and microstructure evolution of Portland cement-based artificial stone induced by mineral additives // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01509. – DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01509
24. *Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Novikova U.A. etc.* Modeling of mass transfer of aggressive salt solutions in shotcrete coating // *Modern problems of civil protection*. 2024. No. 2 (51). P. 116...128.
25. *Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. etc.* Investigation of the influence of temperature on the intensity of mass transfer during corrosion of

the first type of cement concrete // Modern problems of civil protection. 2022. No. 1 (42). P. 24...31.

26. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V. Methods of mathematical physics in applications to problems of concrete corrosion in liquid aggressive media. Moscow: Publishing house ASV, 2021. 244 p.

27. Zhang Y., Xu M., Song J. etc. Study on the corrosion change law and prediction model of cement stone in oil wells with CO₂ corrosion in ultra-high-temperature acid gas wells // Construction and Building Materials, 2022, 323, 125879. – DOI:10.1016 /j.conbuildmat. 2021.125879

28. Smirnova N.N., Krasilnikov I.V. An effect of the nature of immobilized components on the adsorption and mass transfer properties of ultrafiltration membranes based on sulfonate-containing copolyamide // Russian Journal of Applied Chemistry. 2019. Vol. 92. № 11. P. 1570...1580. – DOI: 10.1134 /S1070427219110144

29. Chukhlanov V.Yu., Smirnova N.N., Katalevsky A.D. etc. Dielectric characteristics of the composition based on poly-m-phenylenizophthalamide and ceramic spheres // AIP Conf. Proc. 2024. 3102, 040025. – DOI: 10.1063/5.0200028

30. Monastyrev P.V., Elchishcheva T.F., Makarchuk M.V. etc. The effect of montmorillonite on the rheological and physico-mechanical properties of a thermosetting polymer composite // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. № 2. P. 109...117.

31. Zemskova O., Erofeev V., Samchenko S. etc. Biocidal properties of gypsum stone modified with reynoutria sachalinensis raw materials // BioResources. 2024. Vol. 19. № 4. P. 8912...8919.

32. Rodin A., Ermakov A., Erofeeva I., Erofeev V. Effect of chlorides content on the structure and properties of porous glass ceramics obtained from siliceous rock // Materials. 2022. Vol. 15. № 9, 3268. – DOI: 10.3390/ma15093268

33. Solodilova V.A., Dubrakova K.O., Bulgakov A.G. etc. Fire resistance of statically indeterminate steel systems // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. № 1 (99). P. 9901.

34. Rimshin V.Iv., Kurbatov V.L., Erofeev V.T., Ketsko E.S. Degradation damages survey of the silt reservoir structures // Building and Reconstruction. 2022. № 2 (100). P. 65...74.

35. Erofeev V.T., Vatin N.I., Maksimova I.N. etc. Powder-activated concrete with a granular surface texture // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. № 4. P. 49...61.

36. Fedosov S.V., Bulgakov B.I., Hung N.X. etc. Forecast of the durability of shore structures made of reinforced concrete // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 334. P. 217...224. – DOI: 10.4028/p-8657j1

37. Sharafutdinov K.B., Saraykina K.A., Kashevarova G.G., Erofeev V.T. The use of copper nano-modified calcium carbonate as a bactericidal additive for concrete // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18. № 2. P. 143...155.

38. Erofeev V.T., Kaznacheev S.V., Pankratova E.V. etc. Physical and mechanical properties of pre-bound aggregate composites // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2022. Vol. 18. № 5. P. 399...406.

39. Shafigullin L.N., Romanova N.V., Erofeev V.T. etc. Using products of polyethylene recycling for the production of holding tanks // Materials Physics and Mechanics. 2022. Vol. 50. № 2. P. 266...274.

40. Rodin A., Ermakov A., Kyashkin V. etc. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks // Magazine of Civil Engineering. 2023. № 5 (121). P. 12109. – DOI: 10.34910/MCE.121.9

41. Sharafutdinov K.B., Saraykina K.A., Kashevarova G.G. etc. Strength and durability of concretes with a super absorbent polymer additive // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Vol. 19. № 2. P. 120...135.

42. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V. etc. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂ // Materials Physics and Mechanics. 2023. Vol. 51. № 5. P. 127...141.

43. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Vatin N.I. Deformation and heat-insulating characteristics of light concrete on porous burned binder under heating // Materials Physics and Mechanics. 2023. Vol. 51. № 1. P. 33...41.

44. Bulgakov A.G., Erofeev V.T., Maltsev P.V. Electromagnetic reflecting properties of silver-coated polyamide canvas // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstilnoi Promyshlennosti. 2023. № 6 (408). P. 134...142.

45. Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M. etc. High temperature ceramic-vermiculite thermal insulation with wollastonite binder // Glass and Ceramics. 2023. Vol. 80. № 7-8. P. 283...289.

46. Il'ina V., Strokova V., Erofeev V. etc. Photo-reactive acrylic-alkyd composition with biocide additive for wood protection coating development // Architecture and Engineering. 2024. Vol. 9. № 3. P. 53...62.

47. Konovalova V.S. Investigation of the effect of volumetric hydrophobization on the kinetics of mass transfer processes occurring in cement concretes during corrosion // Materials. 2023. Vol. 16. Iss. 10. P. 3827.

48. Erofeev V., Gladkin S., Rodin A. etc. Chemical, physical, fresh and mechanical properties of modified biocidal cements // Structures. 2024. Vol. 64. P. 106649.

49. Al-Dulaimi S.D.S., Badamshin R., Afonin V. etc. Investigation of the biostability of magnesia composites in the simulated environment of mycelial fungi found in construction materials // Revue des Composites et des Materiaux Avances. 2024. Vol. 34. № 6. P. 707...717.

50. Shvetsova V., Soloviev V., Matiushin E., Erofeev V. The effects of combined use of sodium citrate and pce plasticizer on microstructure and properties of binary opc-cac binder // Materials. 2024. Vol. 17. № 23. P. 5901.

Рекомендована кафедрой естественных наук и техноферной безопасности ИВГПУ. Поступила 10.02.25.