

УДК 666.972.16:66.018.8

DOI 10.47367/0021-3497_2023_2_218

**ИЗМЕНЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**CHANGING THE BEARING CAPACITY OF BUILDING STRUCTURES
OF TEXTILE AND LIGHT INDUSTRY ENTERPRISES**

В.Е. РУМЯНЦЕВА^{1,2}, И.В. КРАСИЛЬНИКОВ¹, И.А. КРАСИЛЬНИКОВА³, У.А. НОВИКОВА⁴, К.Б. СТРОКИН⁴

V.E. RUMYANTSEVA^{1,2}, I.V. KRASILNIKOV^{2,3}, I.A. KRASILNIKOVA⁴, U.A. NOVIKOVA⁵, K.B. STROKIN⁵

¹Ивановский государственный политехнический университет,
²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
³Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
⁴Сахалинский государственный университет)

(Ivanovo 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,
³Vladimir State University,
⁴Sakhalin State University)

E-mail: varrym@gmail.com; korasb@mail.ru; irinanebukina@rambler.ru;
uliana.a.novikova@gmail.com; strokin07@rambler.ru

В данной публикации демонстрируются результаты исследований, позволившие прогнозировать изменение прочностных характеристик строительных конструкций, учитывающих особенности агрессивной среды на предприятиях текстильной и легкой промышленности. Описано влияние "свободного гидроксида кальция" на устойчивость минералов цементного камня, показано относительное изменение прочности бетона в зависимости от безразмерной концентрации гидроксида кальция. Представлены необходимые уравнения для выполнения расчетов по прогнозированию изменения прочностных характеристик строительных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных газовых средах.

This publication demonstrates the results of research that made it possible to predict changes in the strength characteristics of building structures that take into account the characteristics of the aggressive environment at textile and light industry enterprises. The effect of "free calcium hydroxide" on the stability of cement stone minerals is described, the relative change in the strength of concrete depending on the dimensionless concentration of calcium hydroxide is shown. The necessary equations for performing calculations for predicting changes in the

strength characteristics of building structures operated in aggressive gas environments are presented.

Ключевые слова: газовая коррозия, долговечность, массоперенос, метод "микропроцессов", безразмерные переменные, цементный бетон.

Keywords: gas corrosion, durability, mass transfer, the method of "micro-processes", dimensionless variables, cement concrete.

Современные рыночные условия требуют повышения эффективности и капиталоотдачи всех инвестиционных проектов на всех этапах жизненного цикла, в том числе строительства и реконструкции предприятий текстильной и легкой промышленности [1].

Общая стоимость недвижимости предприятий текстильной и легкой промышленности складывается не только из затрат непосредственного ее возведения, но и из стоимостей эксплуатации, ремонта и утилизации. Возникает необходимость в новых методах более точного определения проектной долговечности конструкций.

Проектирование долговечности железобетонных конструкций традиционно основывается на установившихся правилах и требованиях к характеристикам материалов, к качеству их составляющих, к условиям работы конструкции с учетом требований, отраженных в действующих отечественных нормативных документах и ряде документов зарубежных стран. Очевидна естественная связь между качеством сооружения и его сроком службы [2, 3].

Основным подходом, определяющим жизненный цикл зданий и сооружений в целом, является безотказность работы конструкций, сохранность проектных эксплуатационных свойств в течение определенного срока службы. Несмотря на то, что в Техническом регламенте "О безопасности зданий и сооружений" (ФЗ № 384) прямо упоминается необходимость такого подхода, нормативная и доказательная база его в Российской Федерации пока не разработана, что затрудняет переход на применение инновационной продукции и заключение контрактов с учетом "жизненного цикла" в рамках государственно-частного партнерства [4], [5].

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

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), подвергаются периодическому воздействию проливов технологических растворов, представляющих собой сильноагрессивные растворы кислот и щелочей;

- конструкции, расположенные в грунте (фундаменты, подвалы, каналы), подвергаются 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 действию осадков;

- второстепенные конструктивные элементы, предназначением которых является защита 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], [6], [7].

Анализ результатов натуральных обследований, проектных материалов и экспертный опрос специалистов позволяет заключить, что интенсивному воздействию агрессивных, в том числе хлоридсодержащих, сред подвергается до 75 % инженерных конструкций предприятий текстильной промышленности [6].

Крашение текстильных изделий (ткани, пряжа, волокно, трикотаж, швейные нити) является одним из основных этапов производства текстильной продукции. В процессе мокрой обработки тканей используются растворы кислот, окислителей и органических веществ. Наличие большого числа циклов влажно-тепловых обработок (пропитка, запаривание, промывка, сушка и т.д.) приводит к циклическому изменению температурно-влажностного режима цеха.

В табл. 1 приведены характеристики воздушной среды цехов отделочного производства предприятий текстильной промышленности [7] (представлена лишь часть наименования агрессивных газов, необходимая для определения степени агрессивности среды).

Т а б л и ц а 1

Температура, °С		Относительная влажность, %		Агрессивные газы, пары, аэрозоли, пыль	
в рабочей зоне	под потолком	в рабочей зоне	под потолком	Наименование	Концентрация, мг/м ³
16...26	18...30	50...75	55...80	Углекислый газ	до 20,0
				Аммиак (NH ₃)	0,5...50,0
				Сернистый ангидрид (SO ₂)	0,5...10,0
				Сероводород (H ₂ S)	2,0...5,0
				Окислы азота (NO, NO ₂)	0,3...18,0
				Хлор (Cl ₂)	0,1...20,0
				Хлористый водород (HCl)	до 5,0
				Пыль красителей	следы

Согласно Приложениям Б, Р и Х СП 28.13330.2012 "Защита строительных конструкций от коррозии" газовые среды помещений с влажным режимом эксплуатации и концентрациями газов, представленными в табл. 1, являются средне- и сильно-агрессивными для железобетонных и стальных конструкций, слабо- и среднеагрессивными для деревянных конструкций.

Взаимодействие газовых агрессивных сред с бетоном представляет собой гетерогенный физико-химический процесс, протекающий между газом и твердым пористым телом – бетоном [8...12]. Данный процесс сопровождается следующими этапами или подпроцессами, протекающими последовательно и(или) параллельно:

- диффузия газа из объема окружающей газовой среды к поверхности бетона;
- массоперенос газа вглубь бетона по порам и капиллярам, заполненным воздухом;

- растворение газа в жидкой фазе пор бетона с образованием кислоты;

- диффузия раствора образовавшейся кислоты в жидкой фазе порового пространства бетона;

- химическое взаимодействие кислоты с гидроксидом кальция с последующим образованием соли;

- диффузия гидроксида кальция в зону химических реакций;

- кристаллизация образовавшихся солей из раствора.

Общая схема моделируемых процессов показана на рис. 1.

На рисунке и в последующих выражениях обозначено: $C_{Ca(OH)_2}(x, \tau)$ – концентрация гидроксида кальция в поровой структуре бетона в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг Ca(OH)₂/кг бетона; $C_{A, \text{воз.}}$ – концентрация агрессивного газа в воздухе, кг/м³; $C_{A, \text{бет.}}(x, \tau)$ – распре-

деление концентраций кислоты (агрессивного компонента – АК), образовавшейся в результате растворения газа в жидкой фазе пор бетона, кг АК / кг бетона; $C_{A,p}$ – равновесная концентрация агрессивного компонента на поверхности бетона, кг АК / кг бетона. При моделировании процесса будем считать, что жидкости в порах бетона на поверхности достаточно для растворения газа в ней и образования кислоты, которая в дальнейшем будет диффундировать в теле бетона и вступать в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция.

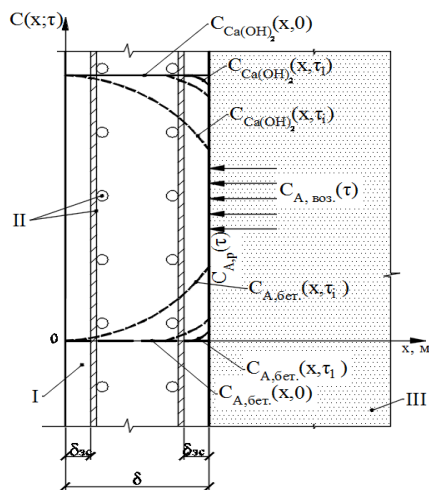


Рис. 1

Исходя из вышесказанного, математическая модель процесса коррозии для системы "железобетон – воздушная агрессивная среда" должна включать в себя совокупность аналитических решений распределения полей концентраций агрессивного компонента (кислоты, образовавшейся в результате растворения газа в жидкой фазе пор бетона) $C_{A,бет.}(x, \tau)$ и гидроксида кальция $C(x, \tau)$. Поглощение (выделение) в результате химического взаимодействия данных компонентов в уравнениях массопереноса учитывается внутренним источником выделения (поглощения) массы и определяется химической кинетикой [11]. Потoki массы гидроксида кальция на границах взаимодействия с воздушной окружающей средой отсутствуют.

Взаимосвязь между равновесной концентрацией агрессивного компонента на поверхности бетона и концентрацией

агрессивного газа в воздухе определяется на основании уравнений равновесия [13].

Коррозия бетона почти всегда начинается с цементного камня, стойкость которого обычно меньше, чем каменных заполнителей. Цементный камень состоит из соединений, образовавшихся в процессе его твердения [16]. В нем содержатся также негидратированные зерна цемента, так как гидратация наиболее крупных частиц, развивающаяся от поверхности, вглубь этих частиц идет медленно и практически может не закончиться даже через несколько лет или десятилетий. Кроме того, в цементном камне имеются открытые и закрытые поры и капиллярные ходы, заполненные воздухом или водой. Таким образом, затвердевший цемент представляет собой микроскопически неоднородную систему. В цементном камне всегда имеется в большем или меньшем количестве свободная известь, образующаяся главным образом при частичном гидролизе трехкальциевого силиката [15].

Все минералы цементного камня поддерживают стабильное существование только в растворах гидроксида кальция определенных концентраций [15], [17]. Концентрации гидроксида кальция, необходимые для поддержания стабильного существования минералов цементного камня на вяжущем из простого портландцемента, приведены в табл. 2.

Как видно по табл. 2, вначале гидролизу и разрушению подвергаются высокоосновные соединения, получаемые на основе трехкальциевого и двухкальциевого силикатов, составляющих большую часть цементного камня. Выход из устойчивого положения структуры цементного камня начинается уже при малейшем снижении концентрации "свободного гидроксида кальция" в растворе пор бетона, так как самый неустойчивый из гидросиликатов, образующихся при гидратации цемента, – белит, существование которого возможно только в насыщенном растворе гидроксида кальция [15]. А дальнейшее снижение концентрации гидроксида кальция на 15 % спровоцирует начало разложения минерала, занимающего наибольший объем цементного камня – алита.

Минерал цементного камня	Химическая формула	Содержание в цементном камне, %	Граничные значения равновесной концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$, мг/л (в пересчете на CaO)	
			от	до
Трехкальциевый силикат (алит)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	37 - 60	1100	1290
Двухкальциевый силикат (белит)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	15 - 37	1290	1290
Однокальциевый силикат	$\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$	2 - 5	310	520
Четырехкальциевый алюминат	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0,1 - 4	1060	1080
Трехкальциевый алюминат	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	7 - 15	415	560
Двухкальциевый алюминат	$2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,1 - 4	160	360
Четырехкальциевый гидроферрит (целит)	$4\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$	1 - 8	1060	1290
Двухкальциевый гидроферрит	$2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$	0,5 - 6	640	1060
Гидросульфалюминат кальция	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\times 3\text{CaSO}_4\cdot 30\text{H}_2\text{O}$	0,1 - 2	45	1290

По мере постепенного снижения концентрации гидроксида кальция в растворе, соприкасающемся с цементным камнем, происходит разрушение (гидролиз) гидросиликатов. В результате гидролиза гидросиликатов в раствор, находящийся в порах бетона, выделяется гидроксид кальция [15], [18]. Таким образом, при дальнейшем снижении концентрации гидроксида кальция в растворе пор бетона силикаты полностью разрушаются. Однако задолго до этого цементный камень, а значит, и бетон теряют значительную часть механической прочности и разрушаются. По данным профессора В.М. Москвина, после удаления из цемента 20 % CaO (от его общего содержания) происходит потеря прочности на 20 % от исходной, а при потере 30 % CaO механическая прочность снизится до 33 % от первоначальной, что, скорее всего, приведет к полному разрушению конструкции.

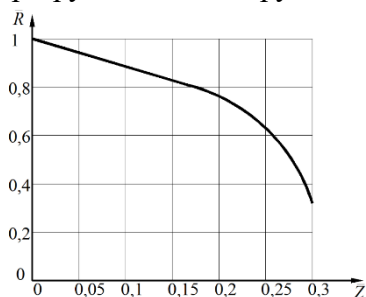


Рис. 2

Изменение безразмерной прочности цементного камня в зависимости от безразмерной концентрации гидроксида кальция при выщелачивании показано на рис. 2 [12]. Безразмерные координаты введены ввиду особенностей разработанных физико-математических моделей массопереноса коррозии бетона в жидких агрессивных средах.

Для удобства использования полученных данных можно провести их аппроксимацию любой математической функцией. Наиболее простым вариантом нелинейной математической функции является парабола. В таком случае для определения математической зависимости необходимо решить систему уравнений с тремя неизвестными [16], [17]:

$$\begin{cases} 1 = a \cdot 0^2 + b \cdot 0 + c \\ 0,8 = a \cdot 0,2^2 + b \cdot 0,2 + c \\ 0,33 = a \cdot 0,3^2 + b \cdot 0,3 + c \end{cases} \quad (1)$$

Решив систему уравнений (1), получаем аналитическое уравнение, описывающее взаимосвязь безразмерной концентрации удаленного массообменными процессами из структуры бетона гидроксида кальция с относительной прочностью бетона:

$$\bar{R} = \frac{R}{R_0} = -12,3\bar{Z}^2 + 1,47\bar{Z} + 1. \quad (2)$$

Полученные данные можно использовать в реальных практических расчетах при прогнозировании изменения несущей способности железобетонных конструкций. Уравнение (2) имеет возможность совместного применения с физико-математическими моделями, прогнозирующими изменение в структуре пор бетона гидроксида кальция, и в совокупности они могут быть использованы для создания имитационных моделей жизненного цикла строительных конструкций при их эксплуатации в окружающей среде различной степени агрессивности.

Согласно теории массопереноса А.В. Лыкова в общем случае для коррозии первого и второго вида диффузия "свободного гидроксида кальция" в пористой структуре бетона описывается нелинейным дифференциальным уравнением массопроводности параболического типа с источником членом [19], [20]:

$$\frac{\partial C(x,\tau)}{\partial \tau} = \text{div}[k(x,\tau)\text{grad}C(x,\tau)] + \frac{q_v(x,\tau)}{\rho_{\text{бет}}}, \quad (3)$$

где $k(x,\tau)$ – коэффициент массопроводности (диффузии), изменяющийся по толщине стенки по заданному математическому закону от координаты и времени, $\text{м}^2/\text{с}$; $C(x,\tau)$ – распределение концентраций "свободного гидроксида кальция" в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , $\text{кг Са(ОН)}_2/\text{кг}$ бетона; $q_v(x,\tau)$ – мощность объемного источника массы вследствие химических или фазовых превращений, $\text{кг Са(ОН)}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; $\rho_{\text{бет}}$ – плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Уравнение массопроводности в виде (3) позволяет производить расчеты при изменяющихся по времени и координате параметрах процесса: коэффициентах массопроводности и массоотдачи, мощности объемного источника массы вследствие фазовых и химических превращений, что

очень важно для большинства практических расчетов физической картины процессов массопереноса и конечных результатов расчетов. Одно из решений гетерогенного физико-химического процесса массопереноса в структуре бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в газовой среде, приведено в работе [14].

Диффузия агрессивных компонентов и "свободного гидроксида кальция" обязательно сопровождается их химическим взаимодействием. Такое взаимодействие, помимо снижения содержания "свободного гидроксида кальция" в зоне химических реакций, вызывает его диффузию из зон с большей концентрацией в зоны с меньшей концентрацией [21].

Расчет полей концентраций "свободного гидроксида кальция" можно проводить методом микропроцессов. При этом между микропроцессами можно изменять распределение мощности источника объемного выделения (поглощения) гидроксида кальция по толщине конструкции и значению коэффициента массопроводности [22]. В рамках каждого микропроцесса считаем коэффициент массопроводности постоянным, а мощность объемного выделения (поглощения) агрессивного компонента вследствие фазовых и химических превращений описываем определенной математической функцией. Математически задача массопереноса "свободного гидроксида кальция" в капиллярно-пористой структуре бетона при газовой коррозии аналогична модели жидкостной коррозии бетона второго вида с отличием на границах взаимодействия с агрессивной окружающей средой [23]. При газовой коррозии отсутствует поток массы "свободного гидроксида кальция" в окружающую среду. В таком случае динамика массопереноса "свободного гидроксида кальция" по толщине конструкции будет описана уравнением:

$$\begin{aligned}
Z(\bar{x}, Fo_m) = & \int_0^1 Z_0(\xi) d\xi + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\mu_m \bar{x}) \exp(-\mu_m^2 Fo_m) \int_0^1 Z_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi - \\
& - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x})}{\mu_m^2} \exp(-\mu_m^2 Fo_m) \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi + \\
& + \left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 - 1}{6} \right) \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) (1-\xi)^2 d\xi.
\end{aligned} \tag{4}$$

где $Fo_m = k \tau / \delta^2$ – массообменный критерий подобия Фурье; $Po_m^* = q_v \delta^2 / C_0 k_{бет}$ – модифицированный массообменный критерий подобия Померанцева.

Для определения изменения прочности бетона при эксплуатации конструкций перекрытия отбельного цеха отделочного производства тканей считаем, что воздушная среда содержит Cl_2 концентрации 10 мг/м^3 при относительной влажности воздуха 80%. При этом, как показано в работе [14], сначала рассчитывались поля концентраций агрессивного компонента, затем в зависимости от концентраций Cl_2 в поровой структуре бетона пересчитывалась мощность внутреннего источника массы. Результаты расчетов приведены на рис. 3 (изменение полей концентраций "свободного гидроксида кальция" в безразмерных переменных через 1 – 2 года, 2 – 10 лет, 3 – 20 лет; 4 – 30 лет; 5 – 40 лет эксплуатации).

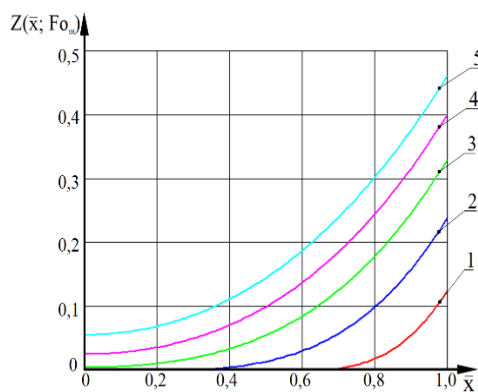


Рис. 3

Полученное выражение (2) позволяет проследить относительное изменение прочности бетона и во времени, и по толщине конструкции. Результаты расчетов приведены на рис. 4 (относительное изменение прочности бетона по толщине кон-

струкции через 1 – 2 года, 2 – 10 лет, 3 – 20 лет; 4 – 30 лет; 5 – 40 лет эксплуатации).

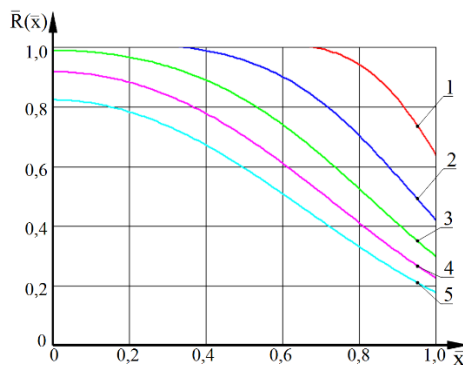


Рис. 4

Расчеты показывают значительное снижение прочности бетона в области, близкой к границе раздела фаз "бетон-воздушная агрессивная среда". Используя в совокупности выражения (2) и (3), можно построить кинетические кривые изменения концентраций "свободного гидроксида кальция" и прочности бетона, определив для этого необходимую координату [24]. Проследим кинетику процесса на поверхности конструкции, взаимодействующей с агрессивной средой, а также на границе защитного слоя арматуры.

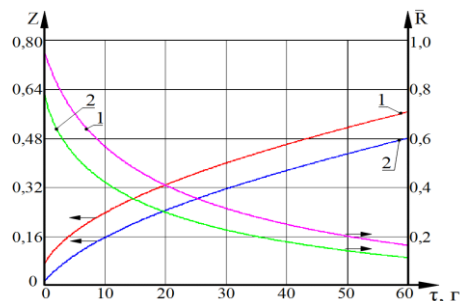


Рис. 5

Результаты данных расчетов приведены на рис. 5 (кинетические кривые изме-

нения концентрации "свободного гидроксида кальция" и прочности бетона: 1 – на границе раздела фаз; 2 – на границе защитного слоя).

Результаты расчетов показывают, что уже через 10 лет эксплуатации прочность рассматриваемых сечений снизится практически в 2 раза, а через 60 лет эксплуатации будет составлять менее 20% от проектной.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ проблемы долговечности бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде предприятий текстильной и легкой промышленности.

2. Установлено, что наибольшие значения концентраций агрессивных веществ в воздухе достигаются в отделочных цехах.

3. Получены аналитические зависимости изменения относительной прочности бетона от концентрации "свободного гидроксида кальция" в жидкости пор бетона (2), которая, в свою очередь, нестационарна и изменяется по уравнению (3) при взаимодействии "свободного гидроксида кальция" с агрессивными компонентами.

4. Приведен пример расчета изменения несущей способности бетона при эксплуатации конструкции в отбельном цехе отделочного производства тканей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алоян Р.М., Федосов С.В., Матвеева Н.Ю., Красильников И.В., Андреева О.Р., Летиция Гарсия Крус, Давид Валеро, Висенте Монтиэль, Иисус Иньеста. Инженерный и экономический анализ энергосберегающих мероприятий / под общей ред. Федосова С.В. Тамбов: Изд-во ИП Першина Р.В., 2014.

2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Логинова С.А. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах // Строительные материалы. 2017. № 12. С. 52...57.

3. 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.

4. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Федосова Н.Л. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 99-104.

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

6. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Караваев И.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 6. С. 268...276.

7. 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

8. Овчинников И.И. Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №2. С. 46...60.

9. Руководство по проектированию антикоррозионной защиты строительных конструкций производственных зданий предприятий текстильной промышленности. М., 1980.

10. Розенталь Н.К. Проблемы коррозионного повреждения бетона // Бетон и железобетон. 2007, №6. С. 55...59.

11. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С. и др. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М.: Стройиздат, 1990.

12. Ma H., Cheng X., Li G., Chen S., Ouan Z., Zhao S. and Niu L. The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions. Corrosion Science. 2000. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1669-1683. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00003-2)

13. Федосов С.В., Булгаков Б.И., Красильников И.В., Нго Суан Хунг, Танг Ван Лам. Прогноз долговечности береговых сооружений из железобетона // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 1. С. 55...63.

14. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., Касьяненко Н.С. Гетерогенные физико-химические процессы массопереноса агрессивных веществ в структуре бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в газовой среде с изменяющимися параметрами // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 142...152.

15. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н. и др. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / под общей ред. В.М. Москвина. М.: Стройиздат, 1980.

16. Yang Zhenghong, Li Qiang, Liu Meichen, Xue Nannan, Yu Long, Xu Linglin, Send mail to Xu L.; Wu, Kai. 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

17. Zhang Y., Xu M., Song J., Wang Ch., Wang X., Hamad B.A. 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

18. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Красильников И.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 44...47.

19. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954.

20. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963.

21. Smirnova N.N., Krasil'nikov 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

22. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Красильников И.В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. Малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 1. С. 97...99.

23. Fedosov S., Rumyantseva V., Krasilnikov I., Krasilnikova I. 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

24. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 7 (83). С. 198...207. DOI: 10.18720/MCE.83.18

REFERENCES

1. Engineering and economic analysis of energy-saving measures / Aloyan R.M., Fedosov S.V., Matveeva N.Yu., Krasilnikov I.V., Andreeva O.R., Letitia Garcia Cruz, David Valero, Vicente Montiel, Jesus Iniesta; under the general ed. Fedosova S.V. Tambov: Publishing house of IP Per-shinaR.V., 2014. 165 p.

2. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Loginova S.A. Investigation of the influence of mass transfer processes on the reliability and durability of reinforced concrete structures operated in liquid aggressive media // *Construction Materials*. 2017. No. 12. Pp. 52...57.

3. 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. Pp. 69...73.

4. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Fedosova N.L. Investigation of diffusion processes of mass transfer during liquid corrosion of the first type of cement concretes // *Izvestia of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2015. Vol. 58. No. 1. Pp. 99...104.

5. Travush V.I. About the concept of development of the regulatory and technical base of construction objects during their operation / Travush V.I., Guryev V.V., Dmitriev A.N., Dorofeev V.M., Volkov Yu.S. // *Academia. Architecture and construction*. 2021. No. 1. Pp. 121...133.

6. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Determination of the resource of safe operation of concrete structures containing hydrophobic additives // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2017. No. 6 (372). Pp. 268...276.

7. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. Studies of physico-chemical processes in the system "cement concrete – liquid aggressive medium" // *Izv. universities. Chemistry and chemical technology*. 2022. Vol. 65. Issue 7. Pp. 61...70.

8. Ovchinnikov I.I. Current state of the problem of calculation of reinforced structures exposed to aggressive media // *Construction of unique buildings and structures*. 2012. No.2. Pp.46...60.

9. Guidelines for the design of anticorrosive protection of building structures of industrial buildings of textile industry enterprises. M., 1980. P. 89.

10. Rosenthal N.K. Problems of corrosion damage of concrete // *Concrete and reinforced concrete*. 2007. No. 6. Pp. 55-59.

11. Alekseev S.N. Durability of reinforced concrete in aggressive environments / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry et al. M.: Stroyizdat, 1990. 320 p.

12. Ma H., Cheng X., Li G., Chen S., Ouan Z., Zhao S. and Niu L. The influence of hydrogen sulfide on corrosion of iron under different conditions. *Corrosion Science*. 2000. Vol. 42. Issue 10. Pp. 1669-1683. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00003-2)

13. Fedosov S.V., Bulgakov B.I., Krasilnikov I.V., Ngo Xuan Hung, Tang Van Lam. Forecast of durability of shore structures made of reinforced concrete // *Technika i tekhnologiya silicates*. 2022. Vol. 29. No. 1. Pp. 55...63.

14. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A., Kasyanenko N.S. Heterogeneous physico-chemical processes of mass transfer of aggressive substances in the concrete structure of reinforced concrete structures operated in a gas environment with varying parameters // *Modern problems of civil protection*. 2022. No. 4 (45). Pp. 142...152.

15. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., etc. Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection / Under the general editorship of V.M. Moskvina. M.: Stroyizdat, 1980. 536 p.

16. Yang Zhenghong, Li Qiang, Liu Meichen, Xue Nannan, Yu Long, Xu Linglin, Send mail to Xu L.; Wu, Kai. Efflo-rescence inhibition and microstructure evolu-tion of Portland cement-based artifi-cial stone induced by mineral additives // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. Vol. 17. e01509. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01509
17. Zhang Y., Xu M., Song J., Wang Ch., Wang X., Hamad B.A. 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
18. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Kasyanenko N.S., Krasilnikov I.V. Theoretical and experimental studies of corrosion processes of the first type of cement concrete in the presence of an internal mass source // *Building materials*. 2013. No. 6. Pp. 44...47.
19. Lykov A.V. Transfer phenomena in capillary-porous bodies. M.: Gostekhizdat, 1954. 296 p.
20. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Theory of heat and mass transfer. M.; L.: Gosenergoizdat, 1963. 536 p.
21. Smirnova N.N. An effect of the nature of immobilized components on the adsorption and mass transfer properties of ultrafiltration membranes based on sulphonate-containing polyamide / Smirnova N.N., Krasil'nikov I.V. // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. Vol. 92. No. 11. Pp. 1570...1580. DOI: 10.1134/S1070427219110144
22. Fedosov S.V. Unsteady mass transfer in corrosion processes of the second type of cement concretes. small values of Fourier numbers, with an internal mass source / S.V. Fedosov, V.E. Rummyantseva, N.S. Kasyanenko, I.V. Krasil'nikov // *Izvestia of Higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*. 2015. Vol. 58. No. 1. Pp. 97...99.
23. Fedosov S. Research of the engagement of liquid aggressive environment and concrete / S. Fedosov, V. Rummyantseva, I. Krasilnikov, I. Krasilnikova // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 403 LNNS. Pp. 1362...1370. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_152
24. Fedosov S.V. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion / S.V. Fedosov, V.E. Rummyantseva, I.V. Krasilnikov, V.S. Konovalova, A.S. Evsyakov // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 7 (83). Pp. 198...207. DOI: 10.18720/MCE.83.18
- Рекомендована кафедрой естественных наук и техносферной безопасности ИВГПУ. Поступила 14.01.23.
-