

Организационно-технологические принципы мониторинга состояния здания на этапе эксплуатации жизненного цикла

Сергей Викторович Федосов¹, Азарий Абрамович Лapidус¹,
Александр Борисович Петрухин², Борис Евгеньевич Нармания¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Ивановский государственный политехнический университет (ИВГПУ); г. Иваново, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В имеющейся нормативной и научно-технической литературе отсутствует понятие «жизненный цикл строительной конструкции (строительного материала)». Поскольку продолжительность жизненного цикла (ЖЦ) объекта недвижимости в значительной степени зависит от долговечности строительных конструкций и материалов, из которых он построен, целесообразно проводить изучение изменения прочностных параметров строительных конструкций в период их ЖЦ. Графическое моделирование ЖЦ строительной конструкции (строительного материала) отражает прочностные показатели конструкции на всех этапах эксплуатации.

Материалы и методы. Методология исследования основана на графическом моделировании ЖЦ строительной конструкции. В качестве показателя долговечности бетонной конструкции выбрано относительное значение коэффициента прочности на сжатие. Изменение прочности на сжатие бетона строительных конструкций может определяться по логарифмическому закону. Математический оператор задачи Коши, заключающейся в нахождении решения обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка, может быть использован для установления состояния бетонной конструкции в любой период ЖЦ.

Результаты. Представлены графические модели поведения прочности на сжатие во времени ЖЦ конструкции (здания), отображающие периоды формирования структуры бетона. Графическая модель дополнена периодом времени до момента, соответствующего достижению критического значения прочности бетона, при котором происходит разрушение конструкции. Графически изображены варианты изменения ЖЦ конструкции под влиянием внешних и внутренних факторов.

Выводы. Предложено определение ЖЦ строительной конструкции (материала). Обоснована целесообразность введения в нормативную документацию и научно-техническую литературу понятия «жизненный цикл строительной конструкции (строительного материала)».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жизненный цикл, показатели долговечности, процессы массопереноса, прогнозирование долговечности, прочность бетона, деструкция бетона, уравнения массопроводности, графическое моделирование, анализ состояния конструкции, долговечность конструкций

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федосов С.В., Лapidус А.А., Петрухин А.Б., Нармания Б.Е. Организационно-технологические принципы мониторинга состояния здания на этапе эксплуатации жизненного цикла // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 128–137. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.128-137

Автор, ответственный за переписку: Борис Евгеньевич Нармания, borisfablee@gmail.com.

Organizational and technological principles of building condition monitoring at the stage of life cycle operation

Sergey V. Fedosov¹, Azariy A. Lapidus¹, Alexsander B. Petrukhin², Boris E. Narmaniya¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU); Ivanovo, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. There is no concept of “life cycle of a building structure (building material)” in the available regulatory and scientific and technical literature. Since the duration of the life cycle of a real estate object largely depends on the durability of building structures and materials, it is reasonable to study the changes in the strength parameters of building structures during their life cycle. Graphical modelling of the life cycle of a building structure (building material) reflects the strength parameters of the structure at all stages of operation.

Materials and methods. The methodology of the work is based on graphical modelling of the life cycle of a building structure. The relative value of compressive strength coefficient was chosen as an indicator of the concrete structure durability. The change of the compressive strength of concrete building structures can be determined according to the logarithmic law.

The mathematical operator of the Cauchy problem, which consists in finding a solution to an ordinary differential equation of the first order, can be used to establish the state of a concrete structure at any period of the life cycle.

Results. Graphical models of compressive strength behavior in time of the life cycle of a structure (building) are presented, showing the periods of formation of the concrete structure. The graphical model is supplemented with the period of time up to the moment corresponding to the achievement of the critical value of concrete strength, at which the structure collapses. The variants of changing the life cycle of the structure under the influence of external and internal factors are graphically depicted.

Conclusions. The definition of the life cycle of a building structure (material) is proposed. The expediency of introducing the concept of “life cycle of a building structure (building material)” into regulatory documentation and scientific and technical literature is substantiated.

KEYWORDS: life cycle, durability indicators, mass transfer processes, durability prediction, concrete strength, concrete destruction, mass conductivity equations, graphical modelling, structural condition analysis, structural durability

FOR CITATION: Fedosov S.V., Lapidus A.A., Petrukhin A.B., Narmaniya B.E. Organizational and technological principles of building condition monitoring at the stage of life cycle operation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(1):128-137. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.128-137 (rus.).

Corresponding author: Boris E. Narmaniya, borisfablee@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Федеральным законом от 30.12.2009 № 384-ФЗ¹ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» впервые вводится понятие «жизненный цикл объекта строительства», которое нашло дальнейшее внедрение в нормативные документы². Указывается, что «жизненный цикл здания или сооружения — это период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения». Очевидно, что продолжительность жизненного цикла (ЖЦ) объекта недвижимости в значительной степени зависит от долговечности строительных конструкций и материалов, из которых он построен. Однако до настоящего времени ни одним нормативным документом не определено понятие «жизненный цикл строительной конструкции (строительного материала)» и в научном сообществе этот момент активно не обсуждается.

Неизвестен автор слов: «История строительной науки написана кровью». Однако сколько бы ни прошло времен, эпох, сколько бы ни сменилось поколений, не проходит дня, чтобы средства массовой информации не сообщали о катаклизмах природы, в результате которых гибнут люди.

С начала своего появления человек не прекращал думать о том, как защитить себя и свою семью от непогоды и хищников, в результате он стал строить жилища. Развивались интеллект человека, общество, приобретался опыт строительства. Этот процесс не прекращается и теперь. Как не прекращаются

и катаклизмы природы, а с ними и гибель людей в результате аварий и разрушений зданий и сооружений.

Негативными факторами, влияющими на долговечность и работоспособность строительных конструкций, являются воздействия окружающей среды (среды эксплуатации). В основном это легко определяемые стандартными приборами такие характеристики жизненной среды обитания человека, как температура и влажность.

Живые существа тонко реагируют на вариации температурно-влажностных параметров своим поведением: болезнями, продолжительностью жизни. Но, так же тонко, хотя порой и не замечаемые человеком, реагируют и природа, и «неживые» элементы конструкций зданий и сооружений.

Необходимо отметить еще один, неприметный, на первый взгляд, но очень важный момент: память — величайшее качество человека, она присутствует и неживой природе. Например, построено здание, в нем долго живет человек. Внезапно произошла стихия, частично разрушилось здание. Провели ремонтные работы, восстановили конструкции и через какое-то время вновь происходит обрушение. Возникает вопрос — почему? Ответ — потому что воздействие стихии нанесло вред элементам конструкции. Они это «запомнили», оставшись в усиленном напряженно-деформированном состоянии. И под воздействием, казалось бы, незначительных внешних факторов вдруг наступает превышение «предела устойчивости», которое и приводит к обрушению конструкций.

Нормативная документация² определяет факторы деструкционного изменения элементов конструкций зданий как промышленного, так и гражданского назначения.

В первую очередь, это коррозия материалов конструкций: бетона [1–6], арматуры [7, 8], железобетона [9, 10], древесины [11], а также биокоррозия [11–15] и т.д. В реальных условиях эксплуатации на конструкцию могут оказывать влияние не один какой-либо определенный вид коррозии, а их совокупность. Поэтому очень важно отслеживать

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ. Ст. 2. Основные понятия.

² СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла. 2020. 195 с.

динамику определяющих характеристик не только здания, но и несущих конструкций на всех этапах их ЖЦ; фиксировать появление негативных признаков и находить пути их устранения. Этот процесс можно обозначить таким термином, как «управление жизненным циклом здания и его основных несущих конструкций». Процесс мониторинга состояния как здания в целом, так и его основных конструктивных элементов до настоящего времени недостаточно изучен.

С позиций физико-химической теории большинство деструктивных процессов разрушения строительных конструкций зданий и сооружений определяется закономерностями диффузионных процессов, которые с математической точки зрения описываются дифференциальными уравнениями нестационарной теплопроводности параболического типа [16–26].

В нормативной² и научной литературе [1, 3, 5, 6, 9, 11, 13, 14, 22, 26] уделяется большое внимание анализу работы ограждающих конструкций как силовых, так и теплоизоляционных элементов, во многом определяющих как условия комфортного проживания человека, так и условия долговечности эффективного существования конструкций зданий и сооружений.

Поэтому тепловая задача стала предметом тщательного изучения специалистов, экспертов и ученых в области строительной теплофизики [22, 26–29], поскольку эффект влияния температуры («тепло» и «холод») воздействует на условия жизни человека. Последующее развитие строительных технологий выявило важность воздействия *влажностного* состояния среды эксплуатации на состояние конструкций и условия комфортного проживания человека. Появляется термин и утверждение, что конструкция должна «дышать». Вопросы диффузии газов, паров и жидкостей в ограждающих конструкциях, представляющих собой твердые тела, имеющие пористую структуру, становятся также предметом исследования научного сообщества [30–35].

В основе этих процессов, именуемых как *процессы массопереноса* (массопроводности в твердом теле), лежит дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности [13, 16, 19, 22, 26]:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} = D_i \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где C_i — концентрация переносимого i -го компонента, распределенная в координатном пространстве конструкции и изменяющаяся во времени; D_i — коэффициент диффузии компонента.

Установлено [22, 26, 27], что коэффициенты переноса теплоты (теплофизические характеристики) и массы вещества (диффузионные параметры) зависят как от параметров внешней среды эксплуатации (среди основных из них — температура T , влажность U , давление P), так и от структурно-ме-

ханических характеристик материала конструкции (плотность ρ , прочность $R_{сж}$ и др.).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор тематики исследования обусловлен необходимостью расширения и совершенствования методологических подходов к прогнозированию долговечности строительной конструкции на всех этапах ее ЖЦ.

Методология исследования основана на графическом описании изменения прочностных характеристик на разных этапах ЖЦ строительной конструкции. Авторы считают необходимым особенно внимание уделить периоду ЖЦ конструкции, когда начинается снижение прочности бетона вплоть до достижения критического значения, при котором происходит необратимое разрушение конструкции.

В рамках настоящей статьи авторами определен объектом исследования этап эксплуатации здания производственного назначения. Предмет исследования — изучение изменения прочностных параметров строительных конструкций в период их ЖЦ с использованием инструмента графического моделирования. Под графическим моделированием применительно к специфике предмета исследования подразумеваем отображение в графическом объектно-пространственном виде установленной последовательности процессов изменения прочностных характеристик строительных конструкций в период их ЖЦ.

Агрессивные компоненты, находящиеся в той или иной мере практически всегда в среде, в которой работает конструкция, участвуют в химических реакциях с материалом конструкции. В результате этого взаимодействия происходит снижение показателей прочностных структурно-механических характеристик. Это является прямой причиной будущих катастроф.

В качестве показателя долговечности строительной конструкции можно выбрать относительное значение коэффициента прочности на сжатие:

$$R_{сж} = \frac{R_{сж}(t)}{R_{сж}(100)}, \quad (2)$$

где $R_{сж}(t)$ — значение прочности на сжатие в момент времени t ; $R_{сж}(100)$ — максимальное значение прочности.

Графической моделью поведения этого показателя во времени ЖЦ конструкции (здания) может быть иллюстрация, приведенная на рис. 1.

В соответствии с современными представлениями [36, 37] расчетные периоды структурообразования в бетонной смеси показаны на рис. 1.

Обозначены три периода формирования структуры бетона: I — период образования первоначальной структуры; II — период упрочнения структуры; III — период стабилизации структуры.

Границей между первым и вторым периодами служит точка A , которая функционально характе-

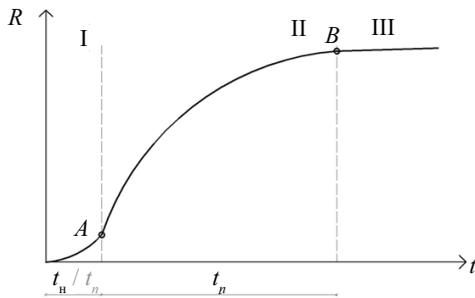


Рис. 1. Графическая модель поведения прочности на сжатие $R_{ск}$ во времени жизненного цикла конструкции (здания)

Fig. 1. Graphical model of the behavior of compressive strength R_c during the life cycle of a structure (building)

ризуется момент образования первоначальной структуры бетона. В дальнейшем происходит лишь ее упрочнение. Полагается, что во втором периоде происходит нарастание прочности структуры по так называемому логарифмическому закону:

$$R_n = R_{28} \frac{\lg(n)}{\lg(28)}, \quad (3)$$

где R_n — прочность бетона на сжатие в возрасте n суток, МПа; R_{28} — прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток.

Разумеется, в процессе твердения происходит изменение всех теплофизических, физико-механических, реологических характеристик, сначала бетонной смеси, а в последующем — структуры твердеющего бетона, но именно величина $R_{ск}$ может быть принята за определенный интегральный показатель оценки качества бетона строительной конструкции в соответствующий момент времени.

В этих условиях для мониторинга состояния системы и прогнозирования ее поведения в определенные периоды ЖЦ возможно описание системы с математической точки зрения. Таковым может быть выбран математический оператор задачи Коши [38].

Задача Коши формулируется как проблема нахождения решения обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad (4)$$

где $y(x)$ — функция, удовлетворяющая начальному условию:

$$y_0 = y(x_0), \quad (5)$$

где y_0 и x_0 — заданные числа (начальные значения). При этом $x_0 \in (a, b)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заметим, что исторически в теоретическом и практическом аспектах исследователей всегда интересовали процессы, происходящие на I и II пери-

одах структурообразования. Участок стабилизации становился «скучным» и неинтересным, на нем все процессы считались «вялотекущими».

Между тем пришло время, когда с позиций анализа ЖЦ строительных конструкций полезно приглядеться к процессам, все-таки в нем происходящим, на более длительный период времени, на весь срок эксплуатации здания.

И первое, на что необходимо обратить внимание, так это на структуру вяжущего: цемента, поскольку именно он является основным компонентом, обеспечивающим прочность конструкции. Одна из его особенностей — полидисперсность состава, характеризующаяся функцией вероятности распределения частиц по размерам. Существует множество подходов для их описания, которые без труда можно найти в специальной литературе [31]. Но в любом спектре частиц существуют минимальный и максимальный размеры частиц (d_{\min} , d_{\max}). В соответствии с современными представлениями о кинетике гетерогенных химических процессов [39], скорость процессов взаимодействия компонентов цемента с водой будет определяться закономерностями физико-химических превращений в частичках твердой фазы. При этом мелкие частицы реагируют быстрее, в силу более высоких значений удельной поверхности контакта фаз. Реакции в более крупных частицах замедляются вследствие того, что жидкому реагенту (воде) со временем приходится преодолевать слой образующихся продуктов реакции, что и приводит к замедлению процессов гидратации.

В соответствии с изложенными положениями представляется целесообразным рис. 1 дополнить периодом времени до момента, когда наступает критическое значение прочности, при котором наступает неизбежное разрушение конструкции (рис. 2).

Согласно этим физическим представлениям, кривая на рис. 2 является лишь одним из теоретически возможных вариантов. Целесообразно рассмотреть и другие, между характерными отметками 2 и 5, т.е. период времени, который определяет ряд состояний строительной конструкции.

С геометрической и математической точек зрения плоскость зон II и III (начиная со стадии стабилизации и до момента стадии завершения эксплуатации конструкции) может быть рассмотрена как цепь участков $[a_i, b_i]$, на каждом из которых в процессе эксплуатации возникают те или иные воздействия, влияющие на функционирование системы. Авторы настоящей статьи планируют в последующих исследованиях провести анализ этих воздействий. В настоящей работе полагают возможным ограничиться изложенным.

Отметим, что, выбрав для примера отрезок времени периода ЖЦ $[a_0, b_0]$ и принимая начальные условия для точки a_0 , всегда можно построить решения задачи Коши для двух типов задач: прямой и обратной.

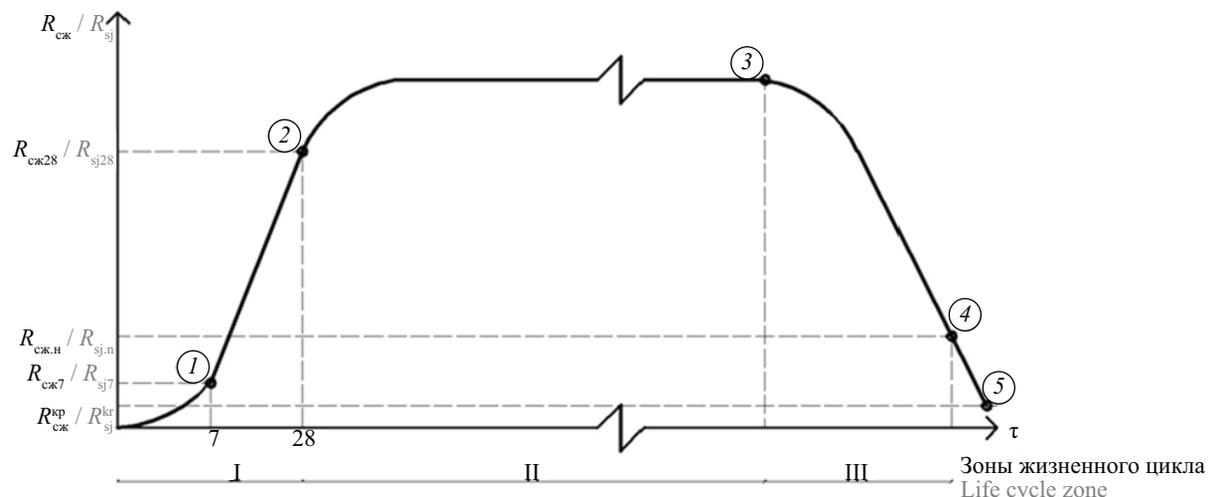


Рис. 2. Графическая модель изменения прочности на сжатие $R_{сж}$ во времени жизненного цикла конструкции в период эксплуатации здания; I — зона нарастания прочности; 7, 28 суток — характерные отметки 1 и 2; II — зона эффективной (нормативной) эксплуатации — характерные отметки 2 и 3; III — зона снижения (потери) прочности — характерные отметки 3, 4 и 5; $R_{сж,н}$ — нормативное значение прочности, при котором конструкция признается аварийной и требуется срочная ее замена; $R_{сж,кр}$ — критическое значение прочности, при котором наступает неизбежное обрушение конструкции — характерная отметка 5

Fig. 2. Graphical model of the change in the compressive strength R_c during the life cycle of the structure during the operation of the building: I — the zone of strength growth; 7, 28 days — characteristic marks 1 and 2; II — the zone of effective (normative) operation — characteristic marks 2 and 3; III — the zone of reduction (loss) of strength — characteristic marks 3, 4 and 5; R_{cn} is the normative value of strength at which the structure is recognized as an emergency and its urgent replacement is required; R_{crr} is the critical value of strength at which the inevitable collapse of the structure occurs — a characteristic mark 5

Прямая задача — прогнозирование ситуации в точке b_0 при наложении внешних воздействий на функцию $R_{сж} = f(t)$. Это дает возможность предсказать, с каким прочностным показателем конструкция подойдет к следующему этапу ЖЦ.

Обратная задача — имея данные результатов предварительных исследований по воздействию внешних факторов на состояние конструкции (во многом, кстати, определяемое свойствами материала конструкции), предложить комплекс мероприятий, предупреж-

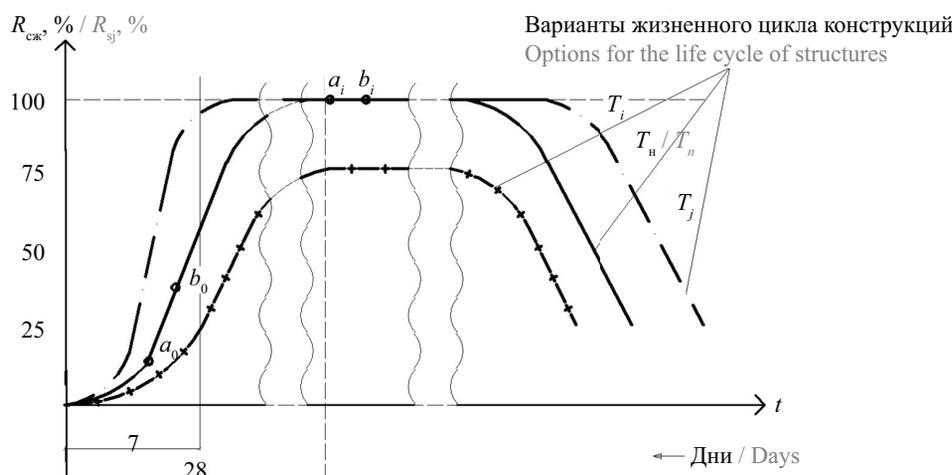


Рис. 3. Варианты изменения жизненного цикла конструкции под влиянием внешних и внутренних факторов: T_n — нормативная продолжительность жизненного цикла конструкции; T_i, T_j — варианты фактической продолжительности жизненного цикла конструкции в результате воздействия внешних и внутренних факторов

Fig. 3. Options of changes in the life cycle of a structure under the influence of external and internal factors: T_n is the normative duration of the life cycle of the structure; T_i, T_j are variants of the actual duration of the life cycle of the structure as a result of the influence of external and internal factors

дающих развитие негативных событий, способных привести к катастрофическим последствиям.

Изложенные положения можно представить графически следующим образом (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя представленные графики (рис. 1–3), следует отметить: если зона I нарастания прочности конструкции достаточно изучена, то II и III зоны до настоящего времени недостаточно исследованы и требуют дальнейшего глубокого научного изучения. В соответствии с изложенным, авторы настоящей статьи считают, что II и III зоны являются не менее важными с точки зрения обеспечения безопасной эксплуатации

здания. В качестве рабочего варианта предлагается следующее определение жизненного цикла строительной конструкции (материала): это период, включающий зону нарастания прочности конструкции, зону эффективной (нормативной) ее эксплуатации и зону снижения (потери) прочности строительной конструкции (строительного материала).

Поэтому авторы считают, что по результатам этих исследований действующие нормативные документы целесообразно дополнить формулировками понятия ЖЦ строительных конструкций (строительных материалов), учитывающих характер изменения их прочностных параметров во времени с точным количественным определением прочностных характеристик, обеспечивающих их безопасную работу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Москвин В.М. Коррозия бетона. М. : Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1952. 344 с.
2. Римшин В.И., Варламов А.А., Курбатов В.Л., Анпилов С.М. Развитие теории деградации бетонного композита // Строительные материалы. 2019. № 6. С. 12–17. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-12-17. EDN AWEKIX.
3. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М. : ФГУП ЦПП, 2006. 520 с.
4. 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. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72. EDN UZLDLW.
5. Федосов С.В., Базанов С.М. Сульфатная коррозия бетона. М. : Изд-во АСВ, 2003. 191 с. EDN QNKJWJ.
6. Федосов С.В., Алоян Р.М., Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Аксаковская Л.Н. Промерзание влажных грунтов, оснований и фундаментов. М. : Изд-во АСВ, 2005. 277 с.
7. Konovalova V., Rumyantseva V., Korinchuk M. Intensity of mass transfer processes in concrete with inhibitors in chloride corrosion // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. P. 01009. DOI: 10.1051/e3s-conf/202341001009
8. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Проблемы хлоридной коррозии стальной арматуры // Вестник НИЦ Строительство. 2022. № 4 (35). С. 174–185. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-4(35)-174-185. EDN MQVBIV.
9. Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. М. : Стройиздат, 1976. 205 с.
10. Селяев В.П., Селяев П.В., Хамза Е.Е. Основы теории деградации и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций с учетом фрактального строения структуры материала // Эксперт: теория и практика. 2022. № 1 (16). С. 23–36. DOI: 10.51608/26867818_2022_1_23. EDN BPDPMZ.
11. Федосов С.В., Степанова В.Ф., Румянцева В.Е., Котлов В.Г., Степанов А.Ю., Коновалова В.С. Коррозия строительных материалов: проблемы, пути решения. М. : Изд-во АСВ, 2022. 400 с.
12. Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Влияние микроорганизмов на физико-механические свойства бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 10. С. 90–98. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-90-98. EDN NQOOZC.
13. Erofeev V., Smirnov V., Dergunova A., Bogatov A., Letkina N. Development and research of methods to improve the biosustainability of building materials // Materials Science Forum. 2019. Vol. 974. Pp. 305–311. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.305
14. Смирнов В.Ф., Светлов Д.А., Зоткина М.М., Светлов Д.Д., Бажанова М.Е., Вильдяева М.В., Захарова Е.А. Экологические аспекты биокоррозии и повышение биостойкости строительных материалов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. № 4. С. 14–26. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.14. EDN ZSDKVA.
15. Kochina T.A., Kondratenko Y.A., Shilova O.A., Vlasov D.Yu. Biocorrosion, biofouling, and advanced methods of controlling them // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2022. Vol. 58. Issue 1. Pp. 129–150. DOI: 10.1134/S2070205122010129
16. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Математическое моделирование процессов коррозии бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 68–75. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.68-75. EDN UDAXDI.
17. Чернышов Е.М., Федосов С.В., Румянцева В.Е. Развитие методов прогнозирования долго-

вечности строительных конструкций на основе разработки теории и моделей коррозии бетонов с учетом явлений тепломассопереноса и формирования градиентных состояний // *Academia. Архитектура и строительство*. 2023. № 1. С. 89–100. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-89-100. EDN LUOBRF.

18. 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-2022-799-1-2-134-140. EDN SIGNGF.

19. Vromans A., Muntean A., van de Ven F. A mixture theory-based concrete corrosion model coupling chemical reactions, diffusion and mechanics // *Pacific Journal of Mathematics for Industry*. 2018. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1186/s40736-018-0039-6

20. Fedosov S.V., Aleksandrova O.V., Lapidus A.A., Kuzmina T.K., Topchiy D.V. An engineering method of analyzing the dynamics of mass transfer during concrete corrosion processes in offshore structures // *Materials*. 2023. Vol. 16. Issue 10. P. 3705. DOI: 10.3390/ma16103705

21. Zhu X., Meng Z., Liu Y., Xu L., Chen Z. Entire Process Simulation of Corrosion due to the Ingress of Chloride Ions and CO₂ in Concrete // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2018/9254865

22. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии : монография. Иваново : ПресСто, 2010. 363 с. EDN QNOQOV.

23. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S. Physical and mathematical modelling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. P. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039

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. No. 7 (83). Pp. 198–207. DOI: 10.18720/MCE.83.18. EDN SIZQZP.

25. Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Narmania B.E. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. Issue 2. Pp. 45–49. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-2-45-49

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, 2022. 244 с. EDN QRKKFL.

27. Федосов С.В., Анисимова Н.К. Тепломассообмен : учеб. пособие. Иваново : ИГАСА, 2004. 103 с. EDN QMIMUL.

28. Salihu F., Guri Z., Cvetkovska M., Pllana F. Fire resistance analysis of two-way reinforced concrete slabs // *Civil Engineering Journal*. 2023. Vol. 9. Issue 5. Pp. 1085–1104. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-05-05

29. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., Новикова У.А., Касьяненко Н.С. Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 1 (42). С. 24–31. EDN UKZZCT.

30. Liu Q., Wei D., Zhang H., Zhai C., Gan Y. A numerical investigation on effective diffusion in cement-based composites: the role of aggregate shape // *Transport in Porous Media*. 2022. Vol. 143. Issue 3. Pp. 681–702. DOI: 10.1007/s11242-022-01804-5

31. Федосов С.В., Мизонов В.Е. Основы теории и математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов. Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2020. 256 с. EDN LGOFPZ.

32. Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. М. : Ленанд, 2018. 1078 с.

33. Brett G., Ceseri M., Natalini R. A moving boundary problem for reaction and diffusion processes in concrete: Carbonation advancement and carbonation shrinkage // *Discrete and Continuous Dynamical Systems – S*. 2022. Vol. 15. Issue 8. P. 2033. DOI: 10.3934/dcds.2022092

34. 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. EDN VEQJNB.

35. Коровкин Д.И., Низина Т.А., Балыков А.С., Володин В.В. Влияние температурно-влажностного режима на трещиностойкость модифицированных и немодифицированных мелкозернистых бетонов // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2019. № 1. С. 15–21. EDN WIFPJT.

36. Федосов С.В., Петрухин А.Б., Федосеев В.Н., Овчинников А.Н. Особенности организационной структуры на этапах жизненного цикла строительного проекта. Анализ взаимодействия подразделений на этапах жизненного цикла строительного объекта // *Строительное производство*. 2023. № 3. С. 63–68. DOI: 10.54950/26585340_2023_3_63. EDN RZFXRJ.

37. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ, 2002. 500 с.

38. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения. Теоремы. Формулы / пер. И.Г. Арамановича (ред. пер.) и др. СПб. : Лань, 2003. 831 с.

39. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технология: Химические процессы и реакторы. Промышленные химико-технологические процессы. М. : Ленанд, 2022. 512 с.

Поступила в редакцию 8 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 4 декабря 2023 г.

Об авторах: **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор кафедры технологий и организации строительного производства, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

Азарий Абрамович Лapidус — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и организации строительного производства; советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru;

Александр Борисович Петрухин — кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор кафедры организации производства и городского хозяйства; **Ивановский государственный политехнический университет (ИВГУ)**; 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, д. 21; SPIN-код: 7136-4796, Scopus: 56625618700, ORCID: 0000-0003-1397-996X; a.petruhin@mail.ru;

Борис Евгеньевич Нармания — аспирант кафедры технологий и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 7486-8316, Scopus: 57215532142, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Moskvina V.M. *Corrosion of concrete*. Moscow, State publishing house of literature on construction and architecture, 1952; 344. (rus.).
2. Rimshin V.I., Varlamov A.A., Kurbatov V.L., Anpilov S.M. Development of the theory of concrete composite degradation. *Construction Materials*. 2019; 6:12-17. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-12-17. EDN AWEKIX. (rus.).
3. Rozental N.K. *Corrosion resistance of cement concretes of low and especially low permeability*. Moscow, FGUP CPP, 2006; 520. (rus.).
4. Stepanova V.F., Rozental N.K., Chekhny G.V., Baev S.M. Determination of corrosion resistance of shotcrete as a protective coating of concrete and reinforced concrete structures. *Construction Materials*. 2018; 8:69-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72. EDN UZLDLW. (rus.).
5. Fedosov S.V., Bazanov S.M. *Sulfate corrosion of concrete*. Moscow, ASV Publ., 2003; 192. EDN QNKJWJ. (rus.).
6. Fedosov S.V., Aloyan R.M., Ibragimov A.M., Gnedina L.Yu., Aksakovskaja L.N. *Freezing of wet soils, foundations and foundations*. Moscow, ASV Publ., 2005; 277. (rus.).
7. Konovalova V., Romyantseva V., Korinchuk M. Intensity of mass transfer processes in concrete with inhibitors in chloride corrosion. *E3S Web of Conferences*. 2023; 410:01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202341001009
8. Rozental N.K., Chekhny G.V. Chloride corrosion of reinforcing steel. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022; 35(4):174-185. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-4(35)-174-185. EDN MQVBIB. (rus.).
9. Alekseev S.N., Rozental N.K. *Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1976; 205. (rus.).
10. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Khamza Y.E. Foundations of the theory of degradation and prediction of the durability of reinforced concrete structures, taking into account the fractal structure of the structure. *Expert: Theory and Practice*. 2022; 1(16):23-36. DOI: 10.51608/26867818_2022_1_23. EDN BPDPMZ. (rus.).

11. Fedosov S.V., Stepanova V.F., Rummyantseva V.E., Kotlov V.G., Stepanov A.Yu., Konovalova V.S. *Corrosion of building materials: problems, solutions*. Moscow, ASV Publ., 2022; 400. (rus.).
12. Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Kasiyanenko N.S. The influence of microorganisms on the physical and mechanical properties of concrete. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021; 10:90-98. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-10-90-98. EDN NQOOZC. (rus.).
13. Erofeev V., Smirnov V., Dergunova A., Bogatov A., Letkina N. Development and research of methods to improve the biosustainability of building materials. *Materials Science Forum*. 2019; 974:305-311. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.974.305
14. Smirnov V.F., Svetlov D.A., Zotkina M.M., Svetlov D.D., Bazhanova M.E., Vildiaeva M.V., Zakharova E.A. Environmental aspects of biocorrosion and improvement of biostability of building materials materials. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies"*. 2021; 4(20):14-26. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.4.14. EDN ZSDKVA. (rus.).
15. Kochina T.A., Kondratenko Y.A., Shilova O.A., Vlasov D.Yu. Biocorrosion, biofouling, and advanced methods of controlling them. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022; 58(1):129-150. DOI: 10.1134/S2070205122010129
16. Gusev B.V., Faivusovich A.S. Mathematical modeling of concrete corrosion processes. *Industrial and Civil Engineering*. 2022; 11:68-75. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.68-75. EDN UDAXDI. (rus.).
17. Chernyshov E., Fedosov S., Rummyantseva V. Development of methods for predicting the durability of building structures based on the development of the theory and models of concrete corrosion taking into account the phenomena of heat and mass transfer and the formation of gradient states. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 1:89-100. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-89-100. EDN LUOBRF. (rus.).
18. Fedosov S.V., Rummyantseva 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. *Construction Materials*. 2022; 1-2:134-140. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-134-140. EDN SIGNGF. (rus.).
19. Vromans A., Muntean A., van de Ven F. A mixture theory-based concrete corrosion model coupling chemical reactions, diffusion and mechanics. *Pacific Journal of Mathematics for Industry*. 2018; 10(1). DOI: 10.1186/s40736-018-0039-6
20. Fedosov S.V., Aleksandrova O.V., Lapidus A.A., Kuzmina T.K., Topchiy D.V. An engineering method of analyzing the dynamics of mass transfer during concrete corrosion processes in offshore structures. *Materials*. 2023; 16(10):3705. DOI: 10.3390/ma16103705
21. Zhu X., Meng Z., Liu Y., Xu L., Chen Z. Entire process simulation of corrosion due to the ingress of chloride ions and CO₂ in concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018; 2018:1-12. DOI: 10.1155/2018/9254865
22. Fedosov S.V. *Heat and mass transfer in the technological processes of the construction industry*. Ivanovo, PresSto Publ., 2010; 364. EDN QNOQOV. (rus.).
23. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S. Physical and mathematical modelling of the mass transfer process in heterogeneous systems under corrosion destruction of reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012039. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012039
24. Fedosov S.V., Rummyantseva 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):198-207. DOI: 10.18720/MCE.83.18. EDN SIZQZP.
25. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Narmania B.E. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(2):45-49. DOI: 10.22337/2587-9618-2017-13-2-45-49
26. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V. *Methods of mathematical physics in applications to the problems of concrete corrosion in liquid aggressive media*. Moscow, ASV, 2022; 244. EDN QRKKFL. (rus.).
27. Fedosov S.V., Anisimova N.K. *Heat and mass transfer*. Ivanovo, ISUAC, 2004; 103. EDN QMIMUL. (rus.).
28. Salihu F., Guri Z., Cvetkovska M., Pilana F. Fire resistance analysis of two-way reinforced concrete slabs. *Civil Engineering Journal*. 2023; 9(05):1085-1104. DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-05-05
29. Rummyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A., Novikova U.A., Kasiyanenko N.S. Research of the effect of temperature on the intensity of mass transfer in the process corrosion of the first type of cement concrete. *The journal Modern problems of civil protection*. 2022; 1(42):24-31. EDN UKZZCT. (rus.).
30. Liu Q., Wei D., Zhang H., Zhai C., Gan Y. A numerical investigation on effective diffusion in cement-based composites: The role of aggregate shape. *Transport in Porous Media*. 2022; 143(3):681-702. DOI: 10.1007/s11242-022-01804-5
31. Fedosov S.V., Mizonov V.E. *Fundamentals of theory and mathematical modeling of mechanical and thermal processes in the production of building materials*. Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2020; 256. EDN LGOPFPZ. (rus.).

32. Kartashov E.M., Kudinov V.A. *Analytical methods of the theory of thermal conductivity and its application*. Moscow, Lenand Publ., 2018; 1078. (rus.).
33. Bretti G., Ceseri M., Natalini R. A moving boundary problem for reaction and diffusion processes in concrete: Carbonation advancement and carbonation shrinkage. *Discrete and Continuous Dynamical Systems — S*. 2022; 15(8):2033. DOI: 10.3934/dcdss.2022092
34. 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. *The Journal Modern Problems of Civil Protection*. 2022; 4(45):142-152. EDN VEQJHB. (rus.).
35. Korovkin D.I., Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V. The influence of temperature and humidity on crack resistance of the modified and non-modified fine-grained concretes. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series “Materials. Constructions. Technologies”*. 2019; 1:15-21. EDN WIFPJT. (rus.).
36. Fedosov S.V., Petrukhin A.B., Fedoseev V.N., Ovchinnikov A.N. Features of the Organizational Structure at the Stages of the Life Cycle of a Construction Project Analysis of the interaction of departments at the stages of the life cycle of a construction object. *Construction Production*. 2023; 3:63-68. DOI: 10.54950/26585340_2023_3_63. EDN RZFXRJ. (rus.).
37. Bazhenov Yu.M. *Concrete technology*. Moscow, ASV Publ., 2002; 500. (rus.).
38. Korn G., Korn T. *Handbook of Mathematics for Researchers and Engineers: Definitions. Theorems. Formulas*. St. Petersburg, Lan Publ., 2003; 831. (rus.).
39. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarten M.G. *General chemical technology: Chemical processes and reactors. Industrial chemical and technological processes*. Moscow, Lenand Publ., 2022; 512. (rus.).

Received November 8, 2023.

Adopted in revised form on December 1, 2023.

Approved for publication on December 4, 2023.

B I O N O T E S : **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Academician of Russian Academy of Architectural and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; ID RSCI: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosovsv@mgsu.ru;

Azariy A. Lapidus — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Adviser to the Russian Academy of Architectural and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; SPIN-code: 8192-2653, Scopus: 57192378750, ResearcherID: B-4104-2016, ORCID: 0000-0001-7846-5770; lapidus58@mail.ru;

Alexander B. Petrukhin — Candidate of Technical Sciences, Doctor of Economic Sciences, Professor of the Department of Organization of Production and Urban Economy; **Ivanovo State Polytechnic University (IVSPU)**; 21 Sheremetevskiyt ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; SPIN-code: 7136-4796, Scopus: 56625618700, ORCID: 0000-0003-1397-996X; a.petruhin@mail.ru;

Boris E. Narmaniya — postgraduate student of the Department of Building Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; SPIN-code: 7486-8316, Scopus: 57215532142, ORCID: 0000-0002-4644-6353; borisfablee@gmail.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflicts of interest.