

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 117–127.
Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 117–127.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 691-4
DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-117-127

Сопротивление строительных композитов агрессивным физико-химическим и биологическим средам и теоретические основы его прогнозирования и повышения. Часть 1. Сопротивление строительных композитов агрессивным физико-химическим и биологическим средам и теоретические основы его прогнозирования

Федорцов Анатолий Петрович (Москва). Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: antolij.fedortsov@mail.ru

Богатов Андрей Дмитриевич (Саранск). Кандидат технических наук, доцент. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва (Россия, 430005, Саранск, ул. Большевикская, д. 68. МГУ им. Н.П. Огарева). Эл. почта: bogatovad@list.ru

Федорцов Владислав Анатольевич (Москва). Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН).

Ерофеев Владимир Трофимович (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ); Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: erofeevvt@bk.ru

Аннотация. В статье приводится обобщение экспериментальных и теоретических исследований по прогнозированию свойств и повышению стойкости строительных композитов, отличающихся активностью связующих веществ, агрессивным средам.

Различное соотношение скоростей массопереноса среды и химических реакций в композите может приводить к потере его прочности неравномерно по объёму в течение значительного промежутка времени с постепенным выравниванием (реализуется переходная кинетическая область), равномерно по всему объёму почти сразу после воздействия среды (внутренняя кинетическая область), с поверхности (диффузионная кинетическая область). Приведённые закономерности позволяют упрощать выражения для прогнозирования показателя физико-химического и биологического сопротивления строительных композитов.

Показаны зависимости соотношения скоростей массопереноса и химических реакций, для прогнозирования физико-химического сопротивления строительных композитов.

Ключевые слова: строительные композиты, проницаемость, диффузия, реакция, коррозия, массоперенос, агрессивная среда, прогнозирование

Для цитирования. Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А., Ерофеев В.Т. Сопротивление строительных композитов агрессивным физико-химическим и биологическим средам и теоретические основы его прогнозирования и повышения. Часть 1. Сопротивление строительных композитов агрессивным физико-химическим и биологическим средам и теоретические основы его прогнозирования // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 3. – С. 117–127. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-117-127.

Resistance of Building Composites Aggressive Environments and Theoretical Bases for Its Forecasting and Increase. Part 1. Resistance of Building Composites to Aggressive Physical, Chemical and Biological Environments and Theoretical Foundations for Its Prediction

Fedortsov Anatolii P. (Moscow). Candidate of Sciences in Technology, Docent, Senior researcher. The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN). E-mail: antolij.fedortsov@mail.ru

Bogatov Andrei D. (Saransk). Candidate of Sciences in Technology, Docent. National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St, Saransk. 430005, Russia. MRSU). E-mail: bogatovad@list.ru

Fedortsov Vladislav A. (Moscow). The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN).

Erofeev Vladimir T. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Academician of RAACS. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU); The Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAASN). E-mail: erofeevt@bk.ru.

Abstract. The article summarizes experimental and theoretical studies on predicting the resistance of building composites to physical, chemical, and biological aggressive environments. Different ratios of the rates of mass transfer and chemical reactions in the composite can lead to a loss of its strength unevenly over time, with a gradual leveling (transition kinetic region), or evenly over the entire volume almost immediately after exposure to the environment (internal kinetic region), or from the surface (diffusion kinetic region). The given patterns allow to simplify the expressions for predicting the indicator of physical-chemical and biological resistance of construction composites. The dependences of the ratio of mass transfer rates and chemical reactions for predicting the physical-chemical, biological resistance of construction composites are shown.

Keywords: building composites, permeability, diffusion, reaction, corrosion, mass transfer, aggressive environment, forecasting

For citation. Fedortsov V.A., Fedortsov A.P., Bogatov A.P., Erofeev V.T Resistance of Building Composites Aggressive Environments and Theoretical Bases for Its Forecasting and Increase. Part 1. Resistance of Building Composites to Aggressive Physical, Chemical and Biological Environments and Theoretical Foundations for Its Prediction. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025, no. 3, pp. 117–127, doi: 10.22337/2077-9038-2025-3-117-127.

Под сопротивлением строительных композитов воздействию агрессивных сред понимается их способность сопротивляться изменениям с сохранением в установленных пределах основных показателей качества, размеров и формы. Анализ тепловых эффектов физических и химических превращений показывает, что при воздействиях на систему (материал) возникают процессы сопротивления, направленные на сохранение её (его) состояния (природы – в случаях химических превращений), а соответственно и внутренней энергии [1]. Образовавшиеся в данных условиях материалы изначально стремятся к самосохранению, а не к разложению. Изменение условий окружающей среды в сторону агрессивности для материала приводит к возникновению на нём процессов сопротивления, направленных на сохранение прежнего состояния.

Следствием сопротивления систем, в том числе строительных композитов, воздействиям извне является известный принцип Ле Шателье-Брауна, согласно которому, если на

систему, находящуюся в термодинамическом равновесии, воздействовать извне, изменяя какой-либо из параметров, определяющих положение равновесия, то в системе усилится то из направлений процесса, которое ослабляет влияние произведённого воздействия [2]. Положение равновесия также сместится в направлении ослабления эффекта внешнего воздействия.

В отечественной литературе (прежде всего) опубликовано значительное количество работ по исследованию коррозии строительных материалов и в том числе основных строительных композитов – цементных бетонов. Известны, например, работы С.Н. Алексеева, В.И. Бабушкина, В.В. Кинда, В.М. Москвина, А.Ф. Полака, В.И. Соломатова, В.В. Яковлева и др. [3–9]. Однако значительно меньше исследований по определению влияния процессов коррозии на эксплуатационные характеристики строительных изделий и конструкций, то есть на длительность их сопротивления в зависимости от вида и размеров. Вместе с тем следует отметить, что работы по

коррозии строительных композитов явились необходимой предпосылкой перехода к определению длительности сопротивления изготовленных на их основе изделий и конструкций, поскольку без такой оценки исследования беспредметны.

Ещё в 70-е годы прошлого столетия В.И. Соломатов отмечал, что для практических целей необходимы количественные зависимости, по которым можно было бы прогнозировать технические характеристики строительных композитов, подвергнутых воздействию агрессивных сред, то есть, по сути, определять длительность их сопротивления без предельной потери качества. Первые работы такого вида в СССР появились лишь в 1981 году [10–11]. В них приведены выражения (функции стойкости), позволяющие прогнозировать прочностные характеристики материала изделий различных размеров и форм в зависимости от особенностей агрессивной среды. В последнее время это направление получило развитие в работах, выполненных под руководством В.Т. Ерофеева [12–17; 26].

В предлагаемой работе приводится обобщение экспериментальных и теоретических исследований по прогнозированию и повышению сопротивления строительных композитов агрессивным средам, отличающихся активностью связующих веществ. В качестве таких композитов были приняты: композиты на стеклощелочных связующих, цементные бетоны и полимербетоны [10–15; 26]. При этом для решения поставлены следующие задачи:

- систематизировать исследования по применению выражений (функций сопротивления), полученных при решении задач массопереноса с разным соотношением скоростей диффузии и химических реакций, для прогнозирования физико-химического сопротивления строительных композитов различной проницаемости и химической активности;
- показать, что в случаях, когда скорость массопереноса больше скорости химического взаимодействия, можно с достаточной для практики точностью определять отдельно потери показателя сопротивления от физического и химического воздействий среды, а затем их складывать.

Сопротивление материалов названо нами физико-химическим, поскольку изменение их характеристик под воздействием окружающей среды может произойти в общем случае при действии как физических, так и химических факторов, а не только химических (химическое сопротивление в публикациях других авторов). Эти факторы (физические и химические) являются также основными при действии на материалы биологически активных сред.

В общем случае зависимость сопротивления строительных композитов воздействию агрессивных сред от наиболее распространённых факторов определяется выражением [10–15]:

$$R_{ф.х.} = f(V_m, V_p, L, t), \quad (1)$$

где $R_{ф.х.}$ – функция физико-химического сопротивления; V_m – скорость массопереноса; V_p – скорость химических ре-

акций; L – характерный размер тела; t – время воздействия агрессивной среды.

Любой строительный материал, в том числе и композит, характеризуется составом и структурой. Очевидно, что воздействие на композиты агрессивных сред из-за различия их природы и концентрации а также состава и структуры самих строительных материалов, будет приводить к различным соотношениям скоростей массопереноса и химических реакций.

При действии агрессивных сред на строительные композиты потеря их показателя сопротивления может быть обусловлена [1; 10–16, 25–27]:

- физическими процессами, когда нет химических взаимодействий или они протекают с незначительной скоростью;
- химическими реакциями в случае незначительного влияния физических факторов;
- комбинированным действием среды, приводящим к изменению показателя сопротивления в результате как физического, так и химического воздействия.

Предложенная классификация потерь показателя сопротивления композитов позволяет упрощать выражения для его оценки и прогнозирования.

Принимая во внимание, что всегда проникновение опережает химическое взаимодействие, то в целях определения количества разрушенных связей в результате протекания взаимодействий, необходимо знать концентрации агрессивных сред (продуктов метаболизма и др.) в каждой точке тела в любой момент времени. Для чего необходимо решение уравнений массопереноса, чаще – второго уравнения Фика [12]:

$$D_3 \frac{d^2 C_A}{dx^2} = \frac{dC_A}{dt}, \quad (2)$$

где D_3 – коэффициент эффективной диффузии; C_A – концентрация агрессивной среды; x – координата точки ($-R < x < +R$); t – время; R – половина толщины пластины.

При решении уравнений массопереноса важным фактором является правильный выбор начальных и граничных условий. При этом, если начальные условия для облегчения решения задачи мы можем принять нулевыми, то граничные условия будут определяться закономерностью изменения на поверхности материала агрессивной среды. В большинстве случаев с достаточным для практики приближением при оценке и прогнозировании сопротивления на границе материала принимается постоянная концентрация. При действии микроорганизмов это, как правило, случаи, когда имеет место быстрое их поселение и выделение продуктов метаболизма, и можно принять, что концентрация агрессивной среды на поверхности материала с самого начала биокоррозии является постоянной величиной, то есть $C_A^II = const$.

При действии микроорганизмов агрессивность среды может увеличиваться со временем [12; 13]. Если это время значительно, то возникает необходимость определения изменения концентрации среды на границе. Очевидно, что изменение агрессивной среды на поверхности материала

(граничное условие) будет определяться развитием на ней микроорганизмов как органической системы и выражаться логической кривой (рис.1).

В настоящее время имеются решения уравнения (2) для тел различной формы при граничных условиях первого и третьего родов, удовлетворяющих массообмену поверхностей строительных изделий и конструкций с окружающей средой [10; 21; 22]. Так, для нахождения концентрационного поля и количества поглощённого вещества внутри пластин при начальном условии (3) и граничных условиях (4)

$$C(x,0) = 0, \tag{3}$$

$$\left. \begin{aligned} C(+R,t) &= C_n = const, \\ C(-R,t) &= C_n = const. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

применяются выражения [10; 21]:

$$C_A(x,t) = C_A^0 \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0) \right], \tag{5}$$

$$Q_t = Q_{max} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0) \right], \tag{6}$$

где $C_A(x,t)$ – концентрация агрессивной среды в любой момент времени t в точке x ; C_n – концентрация агрессивной среды на поверхности пластины, равновесная с окружающей средой; C_A^0 – равновесная концентрация агрессивной среды ($C_A^0 = C_n$), $A_n = \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1}$; $B_n = \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2}$; $\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$; $F_0 = \frac{Dt}{R^2}$ – критерий Фурье; Q_t – количество поглощенной материалом среды или вымытых веществ; Q_{max} – максимальное количество поглощённой материалом среды или вымытых веществ, R – половина толщины пластины.

Следует отметить, что решение задач массопереноса применительно к параллелепипеду и брусу, в большинстве случаев по форме соответствующим строительным изделиям и конструкциям, сводится к задаче для неограниченной пластины.

Для определения функции необходимо выбрать наиболее характерный показатель физико-химического сопротивления

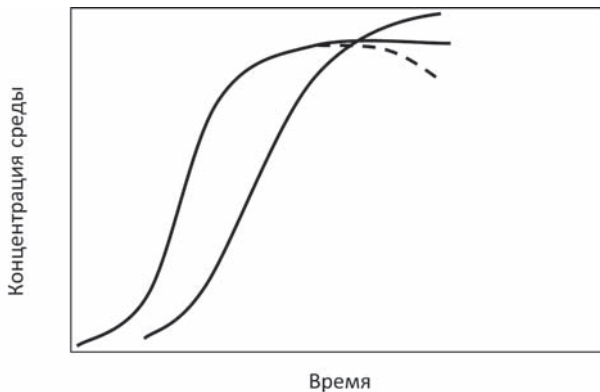


Рис. 1. Изменение концентрации агрессивной среды на поверхности материала в зависимости от длительности воздействия микроорганизмов (источник: [12])

и найти характер его изменения при действии различных факторов. Определяющим критерием, как показали наши исследования [1; 10–19; 25–27], является показатель прочности, выражающий непосредственную связь механических и физико-химических свойств материала. Для определения функции физико-химического сопротивления материала необходимо знать изменение его прочности за любой промежуток времени в результате физического и химического воздействия среды на его структуру, то есть $\Delta\sigma(V_M, V_P, L, t)$. Определяя функцию как изменяемый во времени относительный показатель прочности можем записать [1; 10–19; 23]:

$$R_{ф.х.} = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 \pm \Delta\sigma(V_M, V_P, L, t)}{\sigma_0} = 1 \mp \Delta_t^\phi \mp \Delta_t^x, \tag{7}$$

где σ_t – показатель прочности материала в момент времени t ; σ_0 – первоначальный показатель прочности; $\Delta_t^\phi, \Delta_t^x$ – изменение показателя физико-химического сопротивления за время t в результате соответственно физического и химического воздействия среды.

Знак + в выражении объясняется тем, что при эксплуатации материала в агрессивной среде возможна не только его деградация, но и может наблюдаться временное упрочнение.

Рассмотрим случай, когда на материалы действует лишь физически активная среда и наиболее вероятны следующие физические процессы и связанные с ними трансформации, влияющие на их прочность: поглощение среды и ослабление связей [1; 10], растворение и вымывание связующего вещества или его составляющих [14; 19; 20]; адсорбционное понижение прочности (эффект П.А. Ребиндера) и пластификация связующего вещества [24]; обводнение и нарушение контакта связующих веществ с заполнителями и наполнителями, что обуславливает уменьшение прочности композита.

Процессы адсорбции и проникновения среды, а также поселение микроорганизмов всегда опережают химические взаимодействия и продуцирование продуктов метаболизма. В этой связи основная потеря прочности материала в начальный период взаимодействия с агрессивной средой будет происходить не от разложения составляющих веществ (химической реакции), а от физического воздействия среды. Очевидно, что чем больше насыщение материала средой, в том числе и микроорганизмами, или вымывание веществ, тем интенсивнее протекают и другие процессы, способствующие разрушению материала.

Обозначим через Q_t количество веществ, поглощённых или вымытых из материала за время t . Принимая во внимание, установленную прямую зависимость снижения прочности от Q_t , находим [10; 14; 25]:

$$\Delta_t^\phi = \alpha Q_t, \tag{8}$$

$$\Delta_{max}^\phi = \alpha Q_{max}, \tag{9}$$

где α – коэффициент пропорциональности; Δ_{\max}^{ϕ} – максимальное снижение относительной прочности под воздействием физически активных сред; Q_{\max} – максимальное количество веществ, поглощённых или вымытых из материала.

Определив из выражения (9) α и подставив его в (8), получим:

$$\Delta_t^{\phi} = \Delta_{\max}^{\phi} Q_t / Q_{\max}, \quad (10)$$

где $Q_t / Q_{\max} = F$ – функция завершенности процесса насыщения или вымывания.

Отсутствие химического взаимодействия или когда оно протекает с незначительной скоростью в прогнозируемый период для определения функции сопротивления необходимо знать закономерности проникновения агрессивной среды (в том числе микроорганизмов) в структуру композита и определение в этой связи изменения показателя прочности. Установлено, чем больше поглощение среды или вымывание веществ, тем больше и снижение прочности. Тогда при $\Delta_t^x = 0$ применительно к параллелепипеду, при граничном условии первого рода, выражение для функции сопротивления физическому воздействию среды (R_{ϕ}) будет иметь следующий вид [10–14; 25]:

$$R_{\phi}^{\text{пар}} = 1 - \Delta_{\max}^{\phi} \{1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} B_n B_m B_l \exp[-(\mu_n^2 / K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_l^2 K_3^2) F_0]\}, \quad (11)$$

где $B_n = 2 / \mu_n^2$; $B_m = 2 / \mu_m^2$; $B_l = 2 / \mu_l^2$; $\mu_n = (2n - 1)\pi / 2$; $\mu_m = (2m - 1)\pi / 2$; $\mu_l = (2l - 1)\pi / 2$; $F_0 = \frac{Dt}{R^2}$ – число Фурье; R – обобщённый размер, $\frac{1}{R^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_3^2}$, $K_i = \frac{R}{R_i}$ ($i = 1, 2, 3$). $2R_1, 2R_2, 2R_3$ – размеры элементов.

Выражение (11) было использовано для прогнозирования водостойкости стеклощелочных связующих веществ с добавкой смолы ЭД-16 в количестве 3 мас. ч., а также мела [14] (рис. 2).

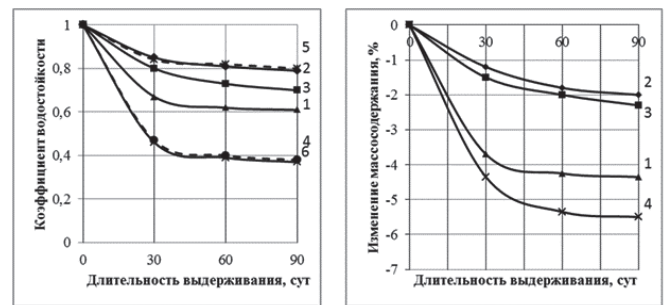
Характерной особенностью в данном случае являлось растворение и вымывание веществ, влияющих на прочность

материала. Испытанию в среде подвергали образцы размером $2 \times 2 \times 2$ см. Коэффициент диффузии D был рассчитан по кривым потери массы. Он составил для материала с добавкой ЭД-16 $3 \cdot 10^{-5}$ см²/ч, а с добавкой мела – $2,27 \cdot 10^{-4}$ см²/ч. Максимальное снижение Δ_{\max}^{ϕ} было найдено экспериментально и оказалось равным соответственно 0,3 и 0,63. Его можно прогнозировать также по кривым потери прочности.

Из рисунка 2 видно, что расчёт сопротивления по (11) достаточно точно описывает результаты экспериментального исследования. При этом потери прочности образцов согласуются с потерей их массы.

Выражение (11) было применено также для прогнозирования показателя сопротивления полимербетонных образцов состава (% по массе): смола ПН-1 – 16,3; кварцевый песок – 81,9; гипериз – 0,6; нафтенат кобальта – 1,2; размером $2 \times 2 \times 7$ см, при эксплуатации в воде (табл. 1). В этом случае, в отличие от ранее рассмотренного, снижение прочности материала было в зависимости от количества поглощённой воды.

Было принято во внимание, что в прогнозируемый период снижение показателя сопротивления происходит в основном за счёт физических воздействий среды [25]. Поглощение



1, 2, 3, 4 – по эксперименту, 5, 6 – по функции (11), 1 – состав связующего вещества с керамзитовой пылью; 2, 5 – состав с добавкой ЭД-16 в количестве 3 мас.ч., 3 – состав связующего вещества с бинарной добавкой (керамзит + известняк в соотношении 1 : 1), 4, 6 – состав с мелом

Рис. 2. Водостойкость стеклощелочных связующих веществ, отверждённых тепловлажностной обработкой (источник: [14])

Таблица 1. Результаты сравнения расчётов по оценке сопротивления полиэфирного полимербетона воздействию воды (по данным [25])

Время выдержки в воде, сут	Значение критерия Фурье (F_0) для образца $2 \times 2 \times 7$ см	Показатель сопротивления по эксперименту	Показатель сопротивления по формулам, отн. ч.	
			По (11) 1 член разложения	По (11) 5 членов разложения
2	0,01	0,95	0,732	0,89
3	0,013	0,95	0,73	0,88
7	0,03	0,92	0,71	0,85
14	0,06	0,81	0,69	0,785
35	0,15	0,577	0,64	0,68
54	0,24	0,550	0,6	0,62
150	0,67	0,484	0,49	0,498

воды материалом приводит к ослаблению его структурных связей, а соответственно – к потере прочности.

Коэффициент диффузии D был рассчитан сорбционным способом и составил $2,5 \times 10^{-8}$ см²/сек. Максимальное снижение показателя сопротивления Δ_{\max}^{Φ} было найдено экспериментально и оказалось равным 0,56. При этом для определения Δ_{\max}^{Φ} можно применять образцы меньших размеров, если возникает необходимость прогноза сопротивления строительных изделий, так как при полном насыщении снижение показателя сопротивления примерно одинаково для различных по размерам, но подобных элементов.

Из таблицы 1 видно, что показатели сопротивления материала, определённые по выражению (11) с пятью членами разложения с достаточной для практики точностью описывают экспериментальные данные при всех значениях критерия Фурье. При значениях критерия Фурье $F_0 \geq 0,15$ (см. табл. 1) для прогнозирования сопротивления композита по (11) является достаточным использование первого члена разложения.

Таким образом, когда отсутствуют химические реакции либо их скорость значительно меньше скорости проникновения агрессивной среды и снижение прочности в прогнозируемый период происходит в основном из-за физического воздействия среды, для прогнозирования сопротивления можно применить функцию, в которой не учтена роль химического взаимодействия.

При наличии химических реакций в материале, оказывающих значительное влияние на изменение его прочности, необходимо исходить из общих положений химической кинетики. В зависимости от соотношения скоростей массопереноса и химических реакций разрушение материалов под воздействием агрессивных сред, включая и продукты жизнедеятельности микроорганизмов, может протекать в следующих трёх основных кинетических областях [1; 10–16; 26–27].

1. Внутренняя кинетическая область. Реализуется в случаях проницаемых строительных композитов, когда агрессивные среды или микроорганизмы и их продукты жизнедеятельности ввиду большой пористости материала быстро насыщают весь его объём и подвергают деструкции. При этом условия благоприятствуют большей скорости проникновения среды, чем реакции.

2. Диффузионная кинетическая область. Реализуется в случаях, когда имеются условия, благоприятствующие большей скорости реакции, чем проникновения. Материал разрушается с поверхности с постепенным смещением зоны реакции вглубь изделия. Поверхностный слой не имеет связей, которые не подверглись бы коррозии.

3. Переходная кинетическая область. Реализуется в случаях, когда скорости проникновения среды и её взаимодействия с составляющими материала сопоставимы между собой. В области композита, подвергнутого коррозии, в этом случае остаются ещё неразорванные связи.

Поскольку снижение характеристики прочности в результате химических реакций вызвано разрывом химических связей, то Δ_t^x в (7) можно определить как

$$\Delta_t^x = \frac{n_t}{n_0}, \tag{12}$$

где n_t – количество разорванных связей в композите; $n_0 = C_k^0 V_0$ – первоначальное количество связей в композите, способных к разрыву; C_k^0 – первоначальная концентрация связей в композите, способных к разрыву; V_0 – объём элемента из композита.

Количество разорванных связей в композите при испытании материала после выдержки в агрессивной среде на сжатие можно определить из выражения:

$$n_t = \overline{C_k(t)} V_0, \tag{13}$$

где $\overline{C_k(t)} = \frac{1}{R} \int_0^R C_k(x, t)$ – средняя концентрация разорванных связей в материале в виде пластины в любой момент времени t ; $C_k(x, t)$ – концентрация разорванных связей в точке пластины в любой момент времени t .

Как уже было отмечено, решение задач массопереноса применительно к параллелепипеду и брусу, в большинстве случаев по форме соответствующим строительным изделиям и конструкциям, сводится к задаче для неограниченной пластины.

В свою очередь $C_k(x, t)$ находится из решения уравнения:

$$w_x = \frac{dC_k(x, t)}{dt} = k[C_k^0 - C_k(x, t)] C_A(x, t), \tag{14}$$

где w_x – скорость химической реакции; k – константа скорости распада химических связей; $C_A(x, t)$ – концентрация агрессивной среды в точке пластины в любой момент времени t [находится по (5)].

Рассмотрим частный случай решения уравнения (14), когда концентрация агрессивной среды не меняется с течением времени, то есть $C_A(x, t) = \text{const}$. Имеет место внутренняя кинетическая область деструкции. Концентрация разорванных связей не меняется по сечению, а будет зависеть только от времени действия среды. $C_k(x, t) = \overline{C_k(t)}$. Решение уравнения (14) относительно концентрации разорванных связей значительно упрощается. Для показателя сопротивления композитов агрессивным средам, определяемого протеканием химических реакций по всему объёму изделия, получим выражение [12; 14; 26]:

$$R_x = 1 - \frac{\overline{C_k(t)}}{C_k^0} = \exp(-K_{\text{эф}} t), \tag{15}$$

где R_x – функция сопротивления химическому воздействию среды; $K_{\text{эф}} = kC_A(x, t)$ – эффективная константа скорости распада связей.

Для проницаемых композитов, подверженных коррозии, можно считать, что в первое же время снижение показателя сопротивления от физического воздействия среды $\Delta_t^{\Phi} = \Delta_{\max}^{\Phi}$, то есть $F = Q_t/Q_{\max} = 1$ [см. (10)]. Тогда для функции физико-химического сопротивления будем иметь [27]:

$$R_{\phi,x} = \exp(-K_{\phi,t}) - \Delta_{\max}^{\phi} \quad (16)$$

Выражение (16) было применено для прогнозирования разупрочнения полимербетонов с добавками, способствующими повышению их проницаемости, состава (% по массе): полиэфирная смола ПН-1 – 16,2; кварцевый песок – 80,4; гипериз – 0,6; нафтенат кобальта – 1,2; добавка – 1,6, в 30% серной кислоте (табл. 2). В качестве добавок были применены универсальный катионит (КУ-2-20) и перекись бария (BaO_2). Ввиду большой проницаемости полимербетонов, Δ_{\max}^{ϕ} определяли по истечение одних суток выдержки их в среде. Эффективные константы скорости распада связей определяли с применением коэффициентов стойкости без учёта физического воздействия среды. Они равны: для полимербетона с КУ-2-20 $K_{\phi,t} = 0,0032 \text{ сут}^{-1}$, для полимербетона с BaO_2 $K_{\phi,t} = 0,0025 \text{ сут}^{-1}$.

Из таблицы видно, что функция (16) применительно соответственно к полимербетонам с добавками КУ-2-20 и BaO_2 с достаточной точностью определяет их разупрочнение в агрессивной среде.

Если имеют место условия, благоприятствующие большей скорости реакции, чем диффузии, то для определения показателя сопротивления находят глубину проникновения фронта реакции. Для этих целей применяют решения диффузионного уравнения, которые сводятся к виду [10–14]:

$$x = A\sqrt{Dt}, \quad (17)$$

где x – координата фронта проникновения реакции; A – постоянная для данного материала и агрессивной среды величина.

При $D \approx \text{const}$ решение (17) принимает вид

$$x = K_{\text{пр}}\sqrt{t}, \quad (18)$$

где $K_{\text{пр}} = A\sqrt{D}$ – константа проникновения среды.

Зная координату фронта проникновения реакции, можно оценить количество разорванных связей в материале в любой момент времени, а соответственно и его прочность. Тогда для функции химического сопротивления элемента (R_x) в виде прямоугольной призмы получим [10–14]:

$$R_x = 1 - \Delta_t^x = 1 - \frac{K_{\text{пр}}\sqrt{t} S_{\text{пов}}^5 - 4hK_{\text{пр}}^2 t}{V_0}, \quad (19)$$

Таблица 2. Результаты определения и прогнозирования физико-химического сопротивления полимербетонов с добавками, повышающими их проницаемость, в 30% H_2SO_4 [27]

Вид добавки	σ^0 , МПа	Δ_{\max}^{ϕ}	$K_{\text{ст}}$ и $R_{\phi,x}$ в зависимости от времени выдержки в среде, сут							
			17		27		33		140	
			$K_{\text{ст}}$	$R_{\phi,x}$	$K_{\text{ст}}$	$R_{\phi,x}$	$K_{\text{ст}}$	$R_{\phi,x}$	$K_{\text{ст}}$	$R_{\phi,x}$
КУ-2-20	40,8	0,22	0,73	0,73	0,7	0,70	0,63	0,68	0,5	0,42
BaO_2	66,4	0,20	0,76	0,76	0,67	0,73	0,68	0,72	0,5	0,50

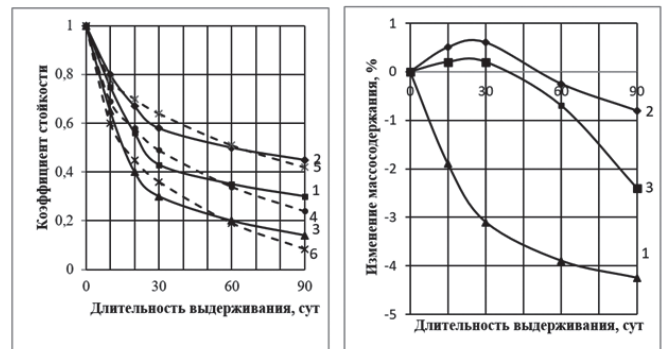
где $S_{\text{пов}}^5$ – площадь боковой поверхности призмы; h – высота призмы.

Выражение (19) было применено для определения стойкости стеклощелочных связующих веществ, отверждённых тепловлажностной обработкой, в 10-процентном растворе едкого натра [14]. На рисунке 3 приводятся результаты испытания стеклощелочных связующих веществ в 10% растворе едкого натра. Видно, что под действием среды происходят значительные потери прочности, кривые которых имеют незатухающий характер для всех исследованных составов.

При действии щелочей стабилизация прочности не происходит, так как в структуре материала нет, например, связей, способных длительное время противостоять их воздействию. Видно также, что изменение массосодержания не согласуется с изменением прочности, что говорит о сочетании протекающих взаимодействий, которое не наблюдалось нами при действии на материал воды (см. рис. 2 и 3).

Диффузионная область, то есть разрушение с поверхности, реализуется и при действии растворов неорганических и органических кислот на цементные композиты [1; 12; 15; 20]. Отмечается [20], что при действии на цементные бетоны растворов кислот их разрушение идёт в поверхностных слоях и процесс может достичь полного развития при сохранении в прилегающих слоях материала почти без изменения всех элементов цементного камня.

В последнем случае (при наличии переходной области) необходимо:



1, 2, 3 – по эксперименту; 4, 5, 6 – по функции (19); 1 – состав связующего вещества с керамзитовой пылью, 2 – состав связующего вещества с бинарной добавкой (керамзит + известняк в соотношении 1 : 1), 3 – то же с мелом, 4 – связующее с керамзитовой пылью, 5 – то же с бинарной добавкой, 6 – то же с мелом

Рис. 3. Стойкость стеклощелочных связующих веществ, отверждённых тепловлажностной обработкой, в 10% растворе едкого натра (источник: [14])

– решать уравнение (14) при заданных начальных и граничных условиях. При этом найденное общее решение позволит переходить при изменении условий среды к частным решениям. Возможно также следующее упрощённое решение (14) [1; 14]. Так, для композитов с $[C_k^0 - C_k(x, t)] \gg C_A(x, t)$ можно записать [20]:

$$k[C_k^0 - C_k(x, t)] = K, \quad (20)$$

где K – обобщенная константа скорости распада химических связей.

Тогда уравнение (14) примет следующий вид:

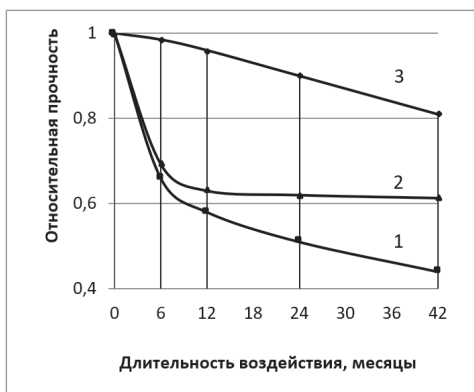
$$w_x = \frac{dC_k(x, t)}{dt} = KC_A(x, t). \quad (21)$$

Решив уравнение (21) относительно концентрации разорванных связей в точках параллелепипеда в любой момент времени и найдя среднее их значение по объёму элемента, можно определить изменение показателя сопротивления Δ_x^x , а затем и функцию химического сопротивления $R_x = 1 - \Delta_x^x$ [1]:

$$R_x = 1 - K_{и.с.} t \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} B_n B_m B_l \frac{1 - \exp(-a_{n,m,l} t)}{a_{n,m,l} t} \right], \quad (22)$$

где $K_{и.с.} = K C_A^0 / C_k^0$ – константа изменения сопротивления; C_A^0 – равновесная концентрация агрессивной среды; C_k^0 – первоначальная концентрация связей в композите, способных к разрыву; $B_n = 2/(\mu_n^2)$; $B_m = 2/(\mu_m^2)$; $B_l = 2/(\mu_l^2)$; $\mu_n = (2n - 1)\pi/2$; $\mu_m = (2m - 1)\pi/2$; $\mu_l = (2l - 1)\pi/2$; t – время; $a_{n,m,l} = \pi^2 D/4 [(2n - 1)^2/R_1^2 + (2m - 1)^2/R_2^2 + (2l - 1)^2/R_3^2]$; $2R_1, 2R_2, 2R_3$ – размеры элемента.

Выражение (22) было применено для прогнозирования химического сопротивления полимербетона состава (процент по массе): ПН-1 – 16,3; кварцевый песок – 81,9; гипериз – 0,6; нафтенат кобальта – 1,2, с начальным пределом прочности при сжатии 44,5 МПа, при воздействии на него 30-процентной серной кислоты (рис. 4).



1 – по опыту; 2 – по выражению (11); 3 – по (22)

Рис. 4. Кривые сопротивления полимербетона при воздействии на него 30-процентным раствором серной кислоты при температуре (20 ± 2) °С (источник [1])

При этом константа $K_{и.с.}$ была определена по кривым сопротивления, представленным на рисунке 4, как отношение падения относительного показателя сопротивления в единицу времени на прямолинейном участке экспериментальной зависимости и составила $1,8 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Коэффициент диффузии серной кислоты, взятый для расчёта по (22), вычислен индикаторным способом и равен $5,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 \times \text{с}^{-1}$.

Очевидно, что, если сложить потери прочности композита от физического и химического воздействия среды, то в общем они близки к экспериментальным показателям (рис. 4).

Из анализа кривых сопротивления, представленных на рисунке 4, следует, что снижение показателя сопротивления композитов в 30-процентном растворе серной кислоты в общем случае определяется физическими и химическими факторами. Физическое воздействие и снижение за счёт его показателя сопротивления, развитого в первые месяцы выдержки в среде, постепенно затухает и, наоборот, химическое воздействие со временем возрастает и становится максимальным при насыщении композита. Данное обстоятельство позволяет отдельно определять показатели от физического и химического воздействия среды, а затем их складывать.

Для композиционных изделий небольших толщин или при длительной их эксплуатации в агрессивных средах переходная кинетическая область может переходить во внутреннюю область. Так, если размер $R \rightarrow 0$ или $t \rightarrow \infty$,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} B_n B_m B_l [1 - \exp(-t a_{n,m,l})] / t a_{n,m,l} \rightarrow 0,$$

а функция химического сопротивления (22) стремится быть линейной, не зависит от параметров массопереноса, размеров и может быть определена как

$$R_x = 1 - K_{и.с.} t. \quad (23)$$

Таким образом, общим для всех трёх областей деструкции материала является опережающее проникновение агрессивной среды в зону реакции. Нет проникновения среды, а значит, и нет снижения показателя сопротивления от её физических и химических воздействий.

Выводы

На основании результатов исследований, представленных в статье, сформулированы следующие выводы.

1. При действии агрессивных сред на строительные композиты потеря сопротивления может быть обусловлена:
 - физическими процессами, когда нет химических взаимодействий или они протекают с незначительной скоростью;
 - химическими реакциями в случае незначительного влияния физических факторов;
 - комбинированным действием среды, приводящим к изменению показателя сопротивления в результате как физического, так и химико-биологического воздействия.
2. Различное соотношение скоростей массопереноса среды и химических реакций в композите может приво-

дуть к потере его прочности неравномерно по объёму в течение значительного промежутка времени с постепенным выравниванием (реализуется переходная кинетическая область), равномерно по всему объёму почти сразу же после воздействия среды (внутренняя кинетическая область), с поверхности (диффузионная кинетическая область). Приведённые закономерности позволяют упрощать выражения для прогнозирования показателя физико-химического и биологического сопротивления строительных композитов.

3. При деструкции строительных композитов в условиях, когда скорость массопереноса больше скорости реакции, можно с достаточной для практики точностью определять отдельно потери сопротивления от физического и химико-биологического воздействия среды, а затем складывать.

Список источников

1. Федорцов, А.П. Физико-химическое сопротивление строительных композитов и способы его повышения : монография / А.П. Федорцов. – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2015. – 464 с. – Текст : непосредственный.
2. Химический энциклопедический словарь / гл. ред. И. Л. Кнунянц. – Москва : Советская энциклопедия, 1983. – 792 с. – Текст : непосредственный.
3. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – Москва : Стройиздат, 1976. – 205 с. – Текст : непосредственный.
4. Бабушкин, В.И. Физико-химические процессы коррозии бетона и железобетона / В.И. Бабушкин. – Москва : Стройиздат, 1968. – 187 с. – Текст : непосредственный.
5. Кинд, В.В. Коррозия цементов и бетона в гидротехнических сооружениях / В. В. Кинд. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1955. – 320 с. – Текст : непосредственный.
6. Москвин, В.М. Коррозия бетона / В.М. Москвин. – Москва : Госстройиздат, 1952. – 342 с. – Текст : непосредственный.
7. Полак, А.Ф. Коррозия железобетонных конструкций зданий нефтехимической промышленности / А.Ф. Полак, В.Б. Ратинов, Г.Н. Гельфман. – Москва : Стройиздат, 1971. – 176 с. – Текст : непосредственный.
8. Соломатов, В.И. Позитивная коррозия бетонов / В.И. Соломатов, А.П. Федорцов. – Текст : непосредственный // Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов. – Казань : КХТИ им. С.М. Кирова, 1982. – С. 10–13.
9. Яковлев, В.В. Кинетика коррозии портландцементного бетона в растворах кислот / В.В. Яковлев. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2003. – № 10. – С. 32 – 34.
10. Соломатов, В.И. Сопротивление полимербетонов воздействию агрессивных сред / В.И. Соломатов, Ю.Б. Потапов, А.П. Федорцов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Серия Строительство и архитектура. – 1981. – № 2. – С. 78 – 80.
11. Федорцов, А.П. Исследование химического сопротивления и разработка полиэфирных полимербетонов, стойких к электролитам и воде : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Федорцов. – Ленинград, 1981. – 20 с. – Текст : непосредственный.
12. Биокоррозия цементных бетонов, особенности её развития, оценки и прогнозирования / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, А.Д. Богатов, В.А. Федорцов. – Текст : электронный // Фундаментальные исследования – 2014. – № 12-4. – С. 708–716. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=36175> (дата обращения: 01.08.2025).
13. Биологическое сопротивление материалов / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов [и др.]. – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2001. – 196 с. – Текст : непосредственный.
14. Оценка и прогнозирование физико-химического сопротивления стеклощелочных композитов и методы его повышения / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, А.Д. Богатов, В.А. Федорцов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. – 2017. – № 6 (702). – С. 5–14.
15. Биологическая коррозия бетонов / В.Т. Ерофеев, Д.С. Аль, А.П. Федорцов, В.А. Федорцов. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2020. – № 11. – С. 13–23.
16. Erofeev, V.T. Simulation of a Biological Degradation / V.T. Erofeev, E.A. Morozov. – Текст : электронный // Biotechnology and the Ecology of Big Cities. – Январь 2011. – С. 29– 36. – URL: <https://clck.ru/3Nn5Re> (дата обращения 01.08.2025).
17. Биоповреждения – биологический фактор коррозии материалов на основе нефтяного битума / Д.А. Петрунин, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов [и др.]. – Текст : непосредственный // Материалы второй международной научно-технической конференции «Биоповреждения и биокоррозия в строительстве». – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2006. – С. 200–205.
18. Моделирование биодеградации строительных материалов / В.Т. Ерофеев, Е.А. Морозов, Е.В. Завалишин, Д.А. Губанов. – Текст : непосредственный // Материалы международной научно-технической конференции «Биоповреждения и биокоррозия в строительстве». – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2004. – С. 73–84.
19. Гусев, Б.В. Прогнозирование долговечности бетона при выщелачивании / Б.В. Гусев, А.С. Файвусович. – Москва : Научный мир, 2014. – 69 с. – Текст : непосредственный.
20. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 536 с. – Текст : непосредственный.
21. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с. – Текст : непосредственный.
22. Степанов, Р.Д. Расчёт на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах / Р.Д. Степанов, О.Д. Шленский. – Москва : Машиностроение, 1981. – 136 с. – Текст : непосредственный.

23. Федорцов, А.П. Позитивная коррозия бетонов как предпосылка улучшения их свойств агрессивными воздействиями / А.П. Федорцов. – Текст : непосредственный // Вестник Мордовского университета – 2002. – № 1-2. – С. 152–156.

24. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформирования и разрушения / П.А. Ребиндер, Е.Д. Шукин // Физико-химическая механика : избранные труды – Москва : Наука, 1979. – С. 203–268. – Текст : непосредственный.

25. Федорцов, А.П. Оценка сопротивления строительных композитов в физически активных средах графоаналитическим способом / А.П. Федорцов. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы Международной научно-технической конференции – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2021. – С. 354–358.

26. Основы математического моделирования биокоррозии полимербетонов / В.Т. Ерофеев, А.П. Федорцов, А.Д. Богатов, В.А. Федорцов. – Текст : электронный // Фундаментальные исследования. – 2014, № 12-4. – С. 701–707. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=36174> (дата обращения: 01.08.2025).

27. Федорцов, А.П. Прогнозирование физико-химического сопротивления полимербетонов при протекании процессов коррозии во внутренней кинетической области / А.П. Федорцов. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы Тринадцатой Международной научно-технической конференции. – Саранск : Издательство Мордовского университета, 2014. – С. 109–113.

References

1. Fedortsov A.P. Fiziko-khimicheskoe soprotivlenie stroitel'nykh kompozitov i sposoby ego povysheniya [Physicochemical Resistance of Building Composites and Methods for Its Improvement], Monograph. Saransk, Publishing House of the Mordovian University, 2015, 464 p. (In Russ.)

2. Knunyants I.L. (ch.ed.). Khimicheskii entsiklopedicheski slovar' [Chemical Encyclopedic Dictionary]. Moscow, Sovetskaya Encyclopediya Publ., 1983, 792 p. (In Russ.)

3. Alekseev S.N., Rozental'N.K. Korroziionnaya stoikost' zhelezobetonnykh konstruksii v agressivnoi promyshlennoi srede [Corrosion Resistance of Reinforced Concrete Structures in an Aggressive Industrial Environment]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1976, 205 p. (In Russ.)

4. Babushkin V.I. Fiziko-khimicheskie protsessy korrozii betona i zhelezobetona [Physicochemical Processes of Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1968, 187 p. (In Russ.)

5. Kind V.V. Korroziya tsementov i betona v gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh [Corrosion of Cements and Concrete in Hydraulic Structures]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1955, 320 p. (In Russ.)

6. Moskvina V.M. Korroziya betona [Corrosion of Concrete]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1952, 342 p. (In Russ.)

7. Polak A.F., Ratinov V.B., Gel'fman G.N. Korroziya zhelezobetonnykh konstruksii zdaniy neftekhimicheskoi promyshlennosti [Corrosion of Reinforced Concrete Structures of Buildings of the Petrochemical Industry]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1971, 176 p. (In Russ.)

8. Solomatov V.I. Fedortsov A.P. Pozitivnaya korroziya betonov [Positive Corrosion of Concrete]. In: *Rabotosposobnost' kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov v usloviyakh vozdeystviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov* [Performance of Composite Building Materials under the Influence of Various Operational Factors]. Kazan', KKhTI named after S.M. Kirov, 1982, pp. 10–13. (In Russ.)

9. Yakovlev V.V. Kinetika korrozii portlandtsementnogo betona v rastvorakh kislot [Kinetics of corrosion of portland cement concrete in acid solutions]. In: *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2003, no. 10, pp. 32–34. (In Russ.)

10. Solomatov V.I., Potapov Yu.B., Fedortsov A.P. Soprotivlenie polimerbetonov vozdeystviyu agressivnykh sred [Resistance of polymer concrete to aggressive environments]. In: *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture], 1981, no. 2, pp. 78–80. (In Russ.)

11. Fedortsov A. P. Issledovanie khimicheskogo soprotivleniya i razrabotka poliefirnykh polimerbetonov, stoikikh k elektrolitam i vode [Study of Chemical Resistance and Development of Polyester Polymer Concretes Resistant to Electrolytes and Water], abstract. dis. ... cand. of technical sciences. Leningrad, 1981, 20 p. (In Russ.)

12. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biokorroziya tsementnykh betonov, osobennosti ee razvitiya, otsenki i prognozirovaniya [Biocorrosion of cement concretes, features of its development, assessment and forecasting]. In: *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 12-4, pp. 708–716. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=36175> (Accessed 08/01/2025). (In Russ.)

13. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Semicheva A.S., Morozov E.A. Biologicheskoe soprotivlenie materialov [Biological Resistance of Materials]. Saransk, Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta [Publishing House of Mordovian University], 2001, 196 p. (In Russ.)

14. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Otsenka i prognozirovaniya fiziko-khimicheskogo soprotivleniya stekloshchelochnykh kompozitov i metody ego povysheniya [Assessment and Forecasting of Physical and Chemical Resistance of Glass Alkali Composites and Methods of Its Increase]. In: *Izvestiya vuzov. Seriya Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture], 2017, no. 6 (702), pp. 5–14. (In Russ., abstr. in Engl.)

15. Erofeev V.T., Al' D.S.D.S., Fedortsov A.P., Fedortsov V.A. Biologicheskaya korroziya betonov [Biological Corrosion of

- Concrete]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2020, № 11, pp. 13–23. (In Russ., abstr. in Engl.)
16. Erofeev V.T., Morozov E.A. Simulation of a Biological Degradation. In: *Biotechnology and the Ecology of Big Cities*, January 2011, pp. 29–36. URL: <https://clck.ru/3Nn5Re> (Accessed 08/01/2025). (In Engl.)
17. Petrunin D.A., Erofeev V.T., Smirnov V.F., Morozov E.A. Bogatov A.D. Biopovrezhdeniya – biologicheskii faktor korrozii materialov na osnove neftyanogo bituma [Biodeterioration – a Biological Factor of Corrosion of Materials Based on Petroleum Bitumen]. In: *Materialy vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve» [Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference "Biodeterioration and Biocorrosion in Construction"]*. Saransk, Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta [Publishing House of Mordovian University], 2006, pp. 200–205. (In Russ.)
18. Erofeev V.T., Morozov E.A., Zavalishin E.V., Gubanov D.A. Modelirovanie biodegradatsii stroitel'nykh materialov [Modeling of Biodegradation of Building Materials]. In: *Materialy vtoroi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve» [Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference "Biodeterioration and Biocorrosion in Construction"]*. Saransk, 2004, pp. 73–84. (In Russ.)
19. Gusev B.V., Faivusovich A.S. Prognozirovanie dolgovechnosti betona pri vyshchelachivanii [Forecasting the Durability of Concrete during Leaching]. Moscow, Nauchn mir, 2014, 69 p. (In Russ.)
20. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete, Methods of Their Protection]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1980, 536 p. (In Russ.)
21. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of Thermal Conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 599 p. (In Russ.)
22. Stepanov R.D., Shlenskii O.D. Raschet na prochnost' konstruksii iz plastmass, rabotayushchikh v zhidkikh sredakh [Strength Calculation of Plastic Structures Operating in Liquid Environments]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 136 p. (In Russ.)
23. Fedortsov A.P. Pozitivnaya korroziya betonov kak predposylka uluchsheniya ikh svoystv agressivnymi vozdeistviyami [Positive Corrosion of Concrete as a Prerequisite for Improving Their Properties by Aggressive Effects]. In: *Vestnik of the Mordovian University*, 2002, no. 1-2, pp. 152–156. (In Russ.)
24. Rebinder P.A., Shchukin E.D. Poverkhnostnye yavleniya v tverdykh telakh v protsessakh ikh deformirovaniya i razrusheniya [Surface Phenomena in Solids during Their Deformation and Destruction]. In: *Fiziko-khimicheskaya mekhanika : izbrannye trudy [Physicochemical Mechanics: Selected Works]*. Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 203–268. (In Russ.)
25. Fedortsov A.P. Otsenka soprotivleniya stroitel'nykh kompozitov v fizicheski aktivnykh sredakh grafoanaliticheskim sposobom [Evaluation of Resistance of Building Composites in Physically Active Environments by a Graph-Analytical Method]. In: *Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva [Actual Issues of Architecture and Construction]*, Materials of the International scientific and technical conference. Saransk, Publishing House of the Mordovian University, 2021, pp. 354–358. (In Russ.)
26. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., V.A. Fedortsov. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya biokorrozii polimerbetonov [Fundamentals of Mathematical Modeling of Biocorrosion of Polymer Concretes]. In: *Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]*, 2014, no. 12-4, pp. 701–707. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=36174> (Accessed 08/01/2025). (In Russ.)
27. Fedortsov A. P. Prognozirovanie fiziko-khimicheskogo soprotivleniya polimerbetonov pri protekani protsessov korrozii vo vnutrennei kineticheskoi oblasti [Forecasting the Physicochemical Resistance of Polymer Concrete during Corrosion Processes in the Internal Kinetic Region]. In: *Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva [Actual Issues of Architecture and Construction]*, Materials of the Thirteenth International scientific and technical conference. Saransk Publishing House of the Mordovian University, 2014, pp. 109–113. (In Russ.)