

**ОЦЕНКА КОРРОЗИИ СТЕКЛОЩЕЛОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ,
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
И СПОСОБЫ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ**

**EVALUATION OF CORROSION OF ALKALIGLASS COMPOSITES,
PREDICTING THEIR PHYSICO-CHEMICAL RESISTANCE
AND WAYS TO IMPROVE IT**

*В.Т. ЕРОФЕЕВ, А.П. ФЕДОРЦОВ, А.Д. БОГАТОВ, В.А. ФЕДОРЦОВ, Б.В. ГУСЕВ
V.T. EROFEEV, A.P. FEDORTSOV, A.D. BOGATOV, V.A. FEDORTSOV, B.V. GUSEV*

(Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва,
Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II)
(Ogarev Mordovia State (National Research) University,
Moscow State University of Railway Engineering)
E-mail: fac-buid@adm.mrsu.ru

В работе приводятся исследования стойкости (сопротивления) композитов в средах различной агрессивности, на основании которых и общих закономерностей диффузионной и химической кинетики определены функции, позволяющие оценивать и прогнозировать сопротивление изделий в зависимости от параметров массопереноса и химических реакций, размеров. Указываются способы повышения этого сопротивления.

In work researches of firmness (resistance) of composites are given in environments of various aggression on the basis of which and the general regularities of diffusive and chemical kinetics the functions allowing to estimate and predict resistance of products depending on parameters of a mass transfer and chemical reactions, the sizes are defined. Ways of increase in this resistance are specified.

Ключевые слова: коррозия, отходы производства, стеклощелочной композит, физико-химическое сопротивление, агрессивная среда, продукты жизнедеятельности микроорганизмов, скорости массопереноса и химических реакций, повышение сопротивления воздействию.

Keywords: corrosion, waste production, alkaliglass composite, physical and chemical resistance, aggressive environment, products of microorganisms, the rate of mass transfer and chemical reactions, increased resistance to action.

Под коррозией подразумевается необратимое разрушение материалов под влиянием внешней среды [2, [4], [6]. Стеклощелочные композиты, относящиеся к материалам, свойства которых, в том числе коррозионная стойкость, недостаточно исследованы, появились сравнительно недавно [2], [10]. В предлагаемой работе приводятся экспериментальные исследования по определению коррозионной стойкости отвержденных стеклощелочных связующих веществ, так как именно они определяют сопротивление композитов этого вида средам различной агрессивности. На основе теоретических предпосылок и экспериментальных данных выведены выражения для оценки и прогнозирования физико-химического сопротивления (стойкости) стеклощелочных композитов, под которым при действии агрессивных сред понимается способность материала сопротивляться их воздействию с сохранением в установленных пределах основных показателей качества, размеров и формы. Сделана попытка обобщения способов повышения этого сопротивления.

Как известно, трансформация структуры композитов, происходящая под воздействием агрессивных сред, зависит от скорости массопереноса и химических взаимодействий, геометрических параметров изделия, длительности эксплуатации [1], [6], [12]. Функция физико-химического сопротивления $R_{ф.х}$ может быть в общем виде выражена так [4]:

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

где V_m – скорость массопереноса; V_p – скорость химических реакций; L – характерный размер тела; t – время воздействия агрессивной среды.

Для определения функции физико-химического сопротивления материала следует выбрать наиболее характерный показатель физико-химического сопротивления и установить характер его изменения под действием различных факторов. Определяющий критерий, как свидетельствуют наши исследования [11], показатель прочности,

выражающий непосредственную связь механических и физико-химических свойств материала. Необходимо знать изменение его прочности за любой промежуток времени в результате физического и химического воздействия среды на его структуру, то есть $\Delta\sigma(V_m, V_p, L, t)$. Характеризуя функцию как изменяемый во времени относительный показатель прочности, можем записать [12]:

$$R_{ф.х} = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 \pm \Delta\sigma(V_m, V_p, L, t)}{\sigma_0} = 1 \mp \Delta_t^\phi \mp \Delta_t^x, \quad (2)$$

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

Таким образом, при действии агрессивных сред на стеклощелочные композиты потеря их прочности может быть обусловлена: физическими процессами, когда нет химических взаимодействий или они протекают с незначительной скоростью; химическими реакциями в случае незначительного влияния физических факторов; комбинарованным действием среды, приводящим к изменению показателя сопротивления в результате как физического, так и химического воздействия [1..4], [6], [10], [12]. Предложенная классификация потерь прочности композитов позволяет упрощать выражения для оценки и прогнозирования их физико-химического сопротивления.

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: растворение и вымывание связующего вещества или его составляющих [3], [4]; адсорбционное понижение прочности (эффект П.А. Ребиндера) и пластификация связующего вещества [7]; обводнение и нарушение контакта связующих веществ с заполнителями и наполнителями, что обуславливает уменьшение прочности композита; ослабление напряженных участков, умень-

шение или более равномерное распределение внутренних напряжений в объеме элемента и, как следствие, упрочнение материала; набухание композитных элементов и увеличение в связи с этим напряженности связей, что ведет к изменению прочности.

Как следует из данных работы [10], водостойкость стеклощелочного композита зависит и от количества растворившихся и вымытых составляющих связующего вещества (рис. 1 – водостойкость стеклощелочных связующих веществ, отвержденных тепловлажностной обработкой: 1, 2, 3, 4 – по эксперименту, 5, 6 – по функции (12), 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). Со снижением массосодержания возрастают потери прочности.

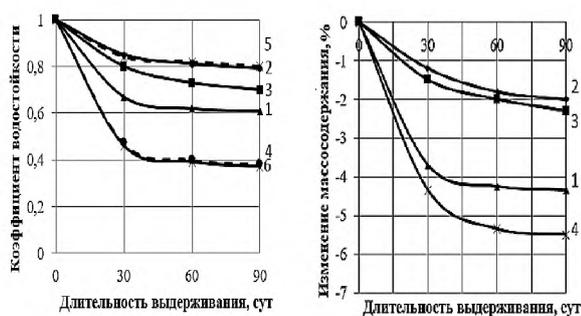


Рис. 1

Вымывание составляющих связующего вещества – хорошо контролируемый окончательный физический процесс, которому предшествуют адсорбция воды и ее проникновение в структуру материала, приводящее к его пластификации, уменьшению адгезионного взаимодействия частиц в результате обводнения поверхности контакта, облегчающее трещинообразование [3], [4].

Изменение внутренней среды материала неизбежно вызывает частичное разложение и перекристаллизацию ранее образовавшихся соединений. Однако основная потеря прочности связующего вещества в начальный период выдержки происходит не от разложения составляющих элементов (химической реакции), а от физического воздействия среды. Очевидно, что чем

больше вымывание, тем интенсивнее и другие процессы, обуславливающие разрушение материала.

Выразим через Q_t количество веществ, вымытых из материала за время t . Учитывая установленную прямую зависимость снижения прочности от Q_t , находим:

$$\Delta_t^\phi = \alpha Q_t, \quad (3)$$

$$\Delta_{\max}^\phi = \alpha Q_{\max}, \quad (4)$$

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

Определив из выражения (4) α , подставим его в (3) и получим:

$$\Delta_t^\phi = \Delta_{\max}^\phi Q_t / Q_{\max}, \quad (5)$$

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

Следовательно, чтобы определить потери прочности стеклощелочного композита от действия физически активных сред, необходимо знать количество вымытых составляющих веществ в любой момент времени. Рассмотрим решение задачи применительно к неограниченной пластине.

Пусть имеем равномерное начальное распределение растворимых веществ по объему пластины c_0 . В результате быстрого отвода их от поверхности пластины их концентрация на ней будет равна нулю. Условие задачи математически можно выразить следующим образом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где c – концентрация растворенных веществ в точке пластины в момент времени t ; D – эффективный коэффициент диффузии растворенных веществ; x – координата точки ($-R < x < +R$).

Найдем выражения для определения концентрации растворенных веществ в любой точке пластины и их количества при

$t \geq 0$, то есть $c(x, t)$ и $Q(t)$, при следующих начальных и граничных условиях:

$$c(x, 0) = c_0, c(+R, t) = c(-R, t), \frac{\partial c(0, t)}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

С учетом общего решения, приведенного в работе [5], при названных начальных и граничных условиях имеем:

$$c(x, t) = c_0 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0), \quad (8)$$

$$Q_t^c = Q_0 \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0), \quad (9)$$

где $A_n = \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1}$; $B_n = \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2}$; $\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$; $F_0 = \frac{Dt}{R^2}$ – критерий Фурье; Q_t^c – содержание растворенных веществ в материале в любой момент времени t ; Q_0 – начальное содержание растворенных веществ в материале, $Q_0 = Q_{\max}$.

Зная Q_t^c , можно найти количество растворенных веществ, вымытых из материала за время t :

$$R_{\phi}^{\text{пар}} = 1 - \Delta_{\max}^{\phi} \{1 - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} B_n B_m B_l \exp[-(\mu_n^2/K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_l^2 K_3^2) F_0]\}, \quad (12)$$

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 – обобщенный 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 (12) было использовано для прогнозирования водостойкости связующих веществ с добавкой смолы ЭД-16 в количестве 3 мас. ч, а также мела (рис. 1). 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 $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{ч}$, а с добавкой мела – $2,27 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{ч}$. 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 рис. 1 видно, что расчет сопротивления по (12) достаточно точно описывает результаты экспериментального исследова-

$$Q_t = Q_0 - Q_t^c = Q_0 [1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0)]. \quad (10)$$

Тогда с учетом (2) при $\Delta_t^x = 0$ применительно к неограниченной пластине при граничном условии первого рода функция сопротивления физическому воздействию среды будет иметь следующий вид:

$$R_{\phi} = 1 - \Delta_{\max}^{\phi} [1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 F_0)]. \quad (11)$$

Поскольку решение задач тепло- и массопереноса применительно к параллелепипеду и брусу, которым в большинстве случаев по форме соответствуют строительные изделия и конструкции, сводится к подобной задаче для неограниченной пластины, то такая же зависимость сохраняется и при определении их функций завершенности процесса. Тогда применительно к параллелепипеду при граничном условии первого рода выражение для функции сопротивления $R_{\phi}^{\text{пар}}$ примет следующий вид:

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.

Согласно проведенным исследованиям [2], [10] действие на стеклощелочные композиты растворов кислот, щелочей, продуктов жизнедеятельности микроорганизмов сопровождается химическими взаимодействиями, влияние которых на изменение прочности необходимо учитывать из-за их разрушающего характера.

В составе модифицированного стеклощелочного связующего совмещены два вида связей. Один из них заключается в том, что гель кремниевой кислоты отличается хорошим сопротивлением воздействию кислот (кроме плавиковой и ортофосфорной кислоты) и плохо противостоит воздействию щелочей. Другой вид образуют си-

ликаты натрия, кальция, магния и более сложные соединения щелочного, щелочноземельного гидроалюмосиликатного состава, которые значительно быстрее разрушаются в растворах кислот, чем щелочей, хотя и в них происходит активное взаимодействие [10].

Можно сделать предположение, что связка из геля кремниевой кислоты при действии растворов кислот на стеклощелочные композиты с наполнением и заполнением, не приводящим к ускорению коррозии, обуславливает длительную стабилизацию прочности после начальной ее потери в результате физического воздействия среды и разрушения не стойких к кислотам связок. Экспериментальные исследования подтверждают это предположение (рис. 2, кривая 1). Очевидно, что в период, когда разрушение структурообразующих связей в результате химического взаимодействия не происходит, для прогнозирования и оценки сопротивления может быть применено выражение (12). Эффективные коэффициенты диффузии и максимальные потери показателя сопротивления составили: при воздействии среды на материал с керамзитовой пылью $D = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{ч}$, $\Delta_{\text{max}}^{\phi} = 0,5$; с бинарной добавкой $D = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{ч}$, $\Delta_{\text{max}}^{\phi} = 0,6$.

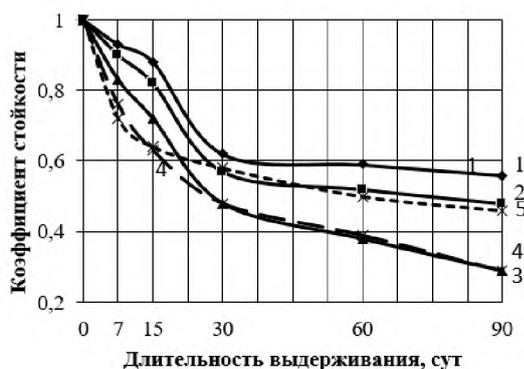


Рис. 2

Из рис. 2 (стойкость стеклощелочных связующих веществ, отвержденных тепловлажностной обработкой, в 10%-ном растворе серной кислоты: 1, 2, 3 – по эксперименту; 4 – связующее вещество с керамзитовой пылью; 2 – то же с бинарной добавкой (керамзит + известняк в соотношении 1:1); 3 – то же с мелом; 4 – по функции

$R_x(20)$; 5 – по функции $R_{\phi}^{\text{пар}}(12)$ – 1 член разложения) видно, что в начальное время выдержки в 10%-ной серной кислоте у всех составов связующего вещества замедляется снижение прочности по сравнению с прогнозируемыми потерями. Изломы экспериментальных кривых свидетельствуют о протекании химических реакций, которые обуславливают временное уплотнение и упрочнение в результате образования расширяющихся продуктов.

Стабилизацию прочности можно ожидать и при воздействии на стеклощелочные связующие вещества, продуктов жизнедеятельности микроорганизмов – органических кислот, которые не оказывают разрушающего действия на связку из геля кремниевой кислоты. Но основной причиной, затрудняющей биокоррозию этих материалов, являются высокие значения водородного показателя внутренней среды, неблагоприятные для роста и размножения микроорганизмов. Большинство исследованных составов связующего вещества обладает фунгицидными свойствами [2], [10]. Но некоторые составы, например с глиной и б-водным хлоридом алюминия, в присутствии внешней питательной среды подвергаются обрастанию и соответственно химическому воздействию среды. Вместе с тем очевидно, что если процесс обрастания происходит в водной среде, то потеря прочности будет определяться преимущественно физическим воздействием и оцениваться выражением (12), которое не учитывает вклад в снижение показателя сопротивления химических реакций.

При действии щелочей стабилизация прочности происходит не всегда, так как в структуре материала нет, например, связок, способных длительное время противостоять их воздействию. Согласно исследованиям [10] химическое воздействие растворов щелочей во многом зависит от их концентрации, с увеличением которой деградация под действием химически активной среды возрастает.

На рис. 3 (стойкость стеклощелочных связующих веществ, отвержденных тепловлажностной обработкой, в 10%-ном растворе едкого натра [10]: 1, 2, 3 – по экспе-

рименту; 4, 5, 6 – по функции (20); 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) приводятся результаты испытания стеклощелочных связующих веществ в 10%-ном растворе едкого натра. Видно, что под действием среды происходят значительные потери прочности, кривые которых имеют незатухающий характер для всех исследованных составов, в результате вымывания продуктов реакции и составляющих веществ.

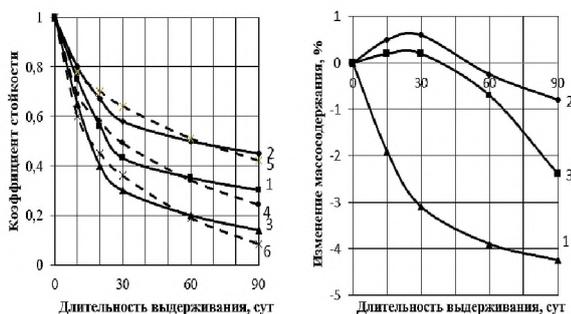


Рис. 3

Из рис. 3 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 и 10%-ной серной кислоты (рис. 1 и 2).

При наличии химических реакций в материале, оказывающих существенное влияние на изменение его прочности, следует учитывать общие положения химической кинетики. В зависимости от соотношения скоростей массопереноса и химических реакций разрушение стеклощелочных материалов, как и других строительных композитов, под воздействием агрессивных сред, включая продукты жизнедеятельности микроорганизмов, может протекать в трех основных кинетических областях [1].

В первой области (внутренней кинетической) процесс деструкции протекает с одной скоростью по всему объему материала, когда скорость массопереноса значительно больше скорости химических реакций.

Происходит быстрое насыщение материала агрессивной средой. Она может реализоваться также для изделий небольших толщин и при длительном воздействии агрессивных сред.

Во второй области (внешней диффузионно-кинетической) процесс разрушения контролируется проникновением среды и происходит в тонком слое до полного его изменения. Постепенно зона реакции смещается вглубь изделия. Область реализуется в условиях, благоприятствующих большей скорости реакции, чем скорости проникновения.

В третьей, промежуточной области (внутренней диффузионно-кинетической или переходной), процесс разрушения происходит неравномерно в значительном объеме материала, причем больше с его поверхности, в условиях, когда скорости проникновения среды и ее взаимодействия с составляющими материала сопоставимы между собой.

Поскольку снижение прочности в результате химических реакций обусловлено разрывом химических связей, то Δ_t^x в (2) можно определить как

$$\Delta_t^x = \frac{n_t}{n_0}, \quad (13)$$

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 – объем элемента из композита.

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

$$n_t = \overline{C_k(t)} V_0, \quad (14)$$

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 .

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

$$w_x = \frac{dC_k(x, t)}{dt} = k[C_k^0 - C_k(x, t)] C_A(x, t), \quad (15)$$

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 .

На основании решения, приведенного в работе [6], $C_A(x, t)$ определяется выражением:

$$C_A(x, t) = C_A^0 \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0) \right], \quad (16)$$

где C_A^0 – равновесная концентрация агрессивной среды.

Для изделий (тел) формы параллелепипеда или бруса, как было отмечено ранее, решение сводится к подобной задаче для неограниченных пластин [6].

Рассмотрим частный случай решения уравнения (15), если концентрация агрессивной среды не меняется с течением времени, то есть $C_A(x, t) = \text{const}$. Имеется внутренняя кинетическая область деструкции. Концентрация разорванных связей не меняется по сечению, а будет зависеть только от времени действия среды. $C_k(x, t) = \bar{C}_k(t)$. Решение уравнения (15) относительно концентрации разорванных связей значительно упрощается. Для показателя сопротивления композитов агрессивным средам, определяемого протеканием химических реакций по всему объему изделия, как и в случае воздействия на цементные бетоны [4], получим выражение:

$$R_x = 1 - \frac{C_k(t)}{C_k^0} = \exp(-K_{эф} t), \quad (17)$$

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

Если условия благоприятствуют большей скорости реакции, чем диффузии, то для определения показателя сопротивления находят глубину фронта реакции. Для этого

прибегают к решению диффузионного уравнения, которое сводится к виду [1]:

$$x = A\sqrt{Dt}, \quad (18)$$

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

При $D \approx \text{const}$ решение (20) принимает вид:

$$x = K_{пр}\sqrt{t}, \quad (19)$$

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

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

$$R_x = 1 - \Delta_t^x = 1 - \frac{K_{пр}\sqrt{t} S_{пов}^6 - 4hK_{пр}^2 t}{V_0}, \quad (20)$$

где $S_{пов}^6$ – площадь боковой поверхности призмы; h – высота призмы.

Выражение (20) применяется в случаях, когда определяющую роль в снижении прочности композита играет химическое взаимодействие, протекающее с поверхности в тонком слое. На рис. 2 (кривая 4) и рис. 3 (кривые 4, 5 и 6) приведена экспериментальная проверка возможности использования функции (20) для оценки и прогноза сопротивления стеклощелочного связующего вещества. Константы проникновения составили: при действии 10%-ной серной кислоты на связующее вещество с мелом $K_{пр} = 0,01 \text{ см/ч}^{1/2}$; при действии 10%-ного едкого натра на связующее вещество с керамзитовой пылью $K_{пр} = 0,011 \text{ см/ч}^{1/2}$, с бинарной добавкой – $K_{пр} = 0,0075 \text{ см/ч}^{1/2}$, с мелом – $K_{пр} = 0,0145 \text{ см/ч}^{1/2}$. Видно, что кривые потерь прочности в агрессивных средах с достаточной степенью точности описывают экспериментальные исследования.

В промежуточной (переходной) области имеются условия, когда скорости проникновения и химического взаимодействия сопоставимы. Проникновение изначально опережает физическое воздействие среды, требующее обязательного учета при прогнозировании. Для определения концентрации разорванных связей в точках пластины в любой момент времени t необходимо решить уравнение (15), когда концентрация агрессивной среды $C_A(x, t)$ изменяется неравномерно по сечению и во времени. Для композитов с $[C_k^0 - C_k(x, t)] \gg C_A(x, t)$ можно записать [12]:

$$k[C_k^0 - C_k(x, t)] = K, \quad (21)$$

где K – обобщенная константа скорости распада химических связей.

Тогда уравнение (15) примет следующий вид:

$$w_x = \frac{dC_k(x, t)}{dt} = KC_A(x, t). \quad (22)$$

Решив уравнение (22) относительно концентрации разорванных связей в точках пластины в любой момент времени и найдя среднее их значение по объему элемента, можно определить изменение показателя сопротивления Δ_t^x :

$$\Delta_t^x = K_{\text{соп}} t \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n [1 - \exp(-\mu_n^2 F_0)] / \mu_n^2 F_0 \right\}, \quad (23)$$

где $K_{\text{соп}} = K C_A^0 / C_k^0$ – константа изменения показателя сопротивления; C_A^0 – равновесная концентрация агрессивной среды; $B_n = 2 / \mu_n^2$; $\mu_n = (2n - 1)\pi / 2$; $F_0 = Dt / R^2$ – число Фурье.

ВЫВОДЫ

Результаты исследования сопротивления стеклощелочных композитов воздействию агрессивных сред позволяют сделать вывод, что в целях его повышения связующие вещества необходимо подвергать модификации и наполнению. Приведем отдельные способы повышения сопротивления:

– экранизация поверхности пор отвержденными пленками полимера (например, рис. 1, добавка ЭД-16);

– модификация связующего неорганическими добавками, которые при взаимодействии с его компонентами образуют малорастворимые соединения, обладающие связующими свойствами [10];

– введение наполнителей, которые в результате химического взаимодействия способны образовывать малорастворимые вещества со связующими свойствами (рис. 1...3, наполнение керамзитом);

– обработка поверхности композитов веществами, отталкивающими компоненты агрессивной среды [4];

– введение в составы композитов веществ, способных к адсорбции и (или) отталкиванию компонентов агрессивной среды [8];

– введение добавок, которые при действии агрессивной среды образуют буферные системы, ослабляющие химическое воздействие [9], [12];

– использование активных сред, способных формировать на поверхности изделий плотные и инертные слои [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. – 2014, № 12–4. С. 708...716.
2. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. и др. Биологическое сопротивление материалов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001.
3. Гусев Б.В., Файвусович А.С. Прогнозирование долговечности бетона при выщелачивании. – М.: Научный мир, 2014.
4. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
6. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Степанова В.Ф., Розенталь Н.К. Математические модели процессов коррозии бетонов. – М.: Научный мир, 1996.
7. Ребиндер П.А., Щукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформирования и разрушения // Физико-химическая механика: избр. тр. – М.: Наука, 1979. С. 203...268.
8. Соломатов В.И., Федорцов А.П. Позитивная коррозия бетонов // Работоспособность композици-

онных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов. – Казань: Изд-во КХТИ им. С. М. Кирова, 1982. С.10...13.

9. Соломатов В.И., Дудынов С.В., Федорцов А.П. Цементные растворы с буферными системами // Изв. вузов. Строительство. – 1995, № 7-8. С.54...58.

10. Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М., Богатов А.Д. и др. Строительные материалы на основе отходов стекла. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005.

11. Федорцов А.П., Федорцов В.А. О потенциале свойства материала и его изменении // Регион. архитектура и строительство. – 2013, № 3 (17). С. 39...45.

12. Федорцов А.П. Позитивная коррозия бетонов как предпосылка улучшения их свойств агрессивными воздействиями // Вестник Морд. гос. ун-та. – 2002, № 1-2. С. 152...156.

REFERENCES

1. Erofeev V.T., Fedorcov A.P., Bogatov A.D., Fedorcov V.A. Biokorroziya cementnyh betonov, osobennosti ee razvitiya, ocenki i prognozirovaniya // Fundamentalnye issledovaniya. – 2014, № 12–4. S. 708...716.

2. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Smirnov V.F. i dr. Biologicheskoe soprotivlenie materialov. – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2001.

3. Gusev B.V., Fajvusovich A.S. Prognozirovaniye dolgovечnosti betona pri vyshelachivani. M.: Nauchnyj mir, 2014.

4. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashity.– M.: Strojizdat, 1980.

5. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. – M.: Vysshaya shkola, 1967.

6. Gusev B.V., Fajvusovich A.S., Stepanova V.F., Rozental N.K. Matematicheskie modeli processov korrozii betonov. – M.: Nauchnyj mir, 1996.

7. Rebinder P.A., Shukin E.D. Poverhnostnyye yavleniya v tverdyh telah v processah ih deformirovaniya i razrusheniya // Fiziko-himicheskaya mehanika: izbr. tr. – M.: Nauka, 1979. S. 203...268.

8. Solomatov V.I., Fedorcov A.P. Pozitivnaya korroziiya betonov // Rabotosposobnost kompozitsionnyh stroitelnyh materialov v usloviyah vozdejstviya razlichnyh ekspluatatsionnyh faktorov. – Kazan: Izd-vo KHTI im. S. M. Kirova, 1982. S. 10...13.

9. Solomatov V.I., Dudynov S.V., Fedorcov A.P. Cementnye rastvory s bufernymi sistemami // Izv. vuzov. Stroitelstvo. – 1995, № 7-8. S. 54...58.

10. Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M., Bogatov A.D. i dr. Stroitelnye materialy na osnove othodov stekla. – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2005.

11. Fedorcov A.P., Fedorcov V.A. O potencie svoystva materiala i ego izmenenii // Region. arhitektura i stroitelstvo. – 2013, № 3 (17). S. 39...45.

12. Fedorcov A.P. Pozitivnaya korroziiya betonov kak predposylka uluchsheniya ih svoystv agressivnymi vozdejstviyami // Vestnik Mord. gos. un-ta. – 2002, №1-2. S. 152...156.

Рекомендована кафедрой строительных материалов и технологий МГУ имени Н.П. Огарёва. Поступила 05.09.16.