

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 145–154.  
Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 145–154.

Исследования и теория  
Научная статья  
УДК 691-4  
DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-145-154

## Контроль химической деструкции материала стеновой керамики с учетом параметров эксплуатации конструкции

**Ерофеев Владимир Трофимович** (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. 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, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: erofeevt@bk.ru

**Желдаков Дмитрий Юрьевич** (Москва). Кандидат технических наук. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: djeld@mail.ru

**Козлов Владимир Владимирович** (Москва). Кандидат технических наук. Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл. почта: kozlov.v2@yandex.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается новый метод оценки скорости деструкции материала строительной керамики на основании процесса химической коррозии материала. Авторами разработан и описывается химизм процесса деструкции, состоящий из двух стадий: стадии образования гидроксидов щелочных и щёлочноземельных металлов при увлажнении материала строительной керамики и стадии взаимодействия гидроксидов с оксидами кремния и алюминия аморфной части материала. Разработаны методики исследования кинетических характеристик обеих стадий процесса деструкции материала. В настоящее время методики имеют статус государственных стандартов. На основании анализа результатов исследований разработано феноменологическое уравнение для расчёта скорости химической деструкции материала строительной керамики. Приводится разработанный метод оценки ограждающей конструкции по наиболее критическим координатам с учётом скорости химической коррозии, распределения температуры и влажности по толще конструкции. На основании математической модели создана программа расчёта долговечности стеновой керамики. Результаты работы важны при контроле за надёжностью несущих конструкций. Опираясь на полученную математическую модель определения стойкости материала стеновой керамики к процессам химической коррозии, возможно контролировать правильность эксплуатации зданий и сооружений.

*Ключевые слова:* химическая стойкость, здания и сооружения, деструкция материала, скорость реакции, математическая модель

*Для цитирования.* Ерофеев В.Т., Желдаков Д.Ю., Козлов В.В. Контроль химической деструкции материала стеновой керамики с учётом параметров эксплуатации конструкции // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 3. – С. 145–154. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-3-145-154.

## Control of Chemical Degradation of the Wall Ceramic Material, Taking into account the Parameters of the Construction Operation

**Erofeev Vladimir T.** (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Academician of RAACS. National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St, Saransk. 430005, Russia. MRSU). E-mail: erofeevt@bk.ru

© Ерофеев В.Т., Желдаков Д.Ю., Козлов В.В., 2024.

**Zheldakov Dmitrii Yu.** (Moscow). Candidate of Sciences in Technology. 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: djeld@mail.ru

**Kozlov Vladimir V.** (Moscow). Candidate of Sciences in Technology. 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: Kozlov v2@mail.ru

*Abstract.* The article discusses a new method for estimating the rate of destruction of building ceramics material based on the process of chemical corrosion of the material. The authors have developed and described the chemistry of the destruction process, consisting of two stages – the stage of formation of alkali and alkaline earth metal hydroxides when moistening the building ceramics material and the stage of interaction of hydroxides with silicon and aluminum oxides of the amorphous part of the material. Methods for studying the kinetic characteristics of both stages of the material destruction process have been developed. Currently, the methods have the status of state standards. Based on the analysis of the research results, a phenomenological equation has been developed to calculate the rate of chemical destruction of building ceramics material. The developed method for evaluating the enclosing structure according to the most critical coordinates is given, taking into account the rate of chemical corrosion, the distribution of temperature and humidity over the thickness of the structure. Based on the mathematical model, a program for calculating the durability of wall ceramics has been created. The results of the work are important when monitoring the reliability of load-bearing structures. On the basis of the obtained mathematical model for determining the resistance of the wall ceramic material to chemical corrosion processes, it is possible to control the correct operation of buildings and structures.

*Keywords:* chemical resistance, buildings and structures, destruction of material, reaction rate, mathematical model

*For citation.* Erofeev V.T., Zheldakov D.Yu., Kozlov V.V. Control of Chemical Degradation of the Wall Ceramic Material, Taking into account the Parameters of the Construction Operation. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2024, no. 3, pp. 145–154, doi: 10.22337/2077-9038-2024-3-145-154.

## Введение

Количество исследований процессов химической деструкции бетонов значительно больше, чем для материала стеновой керамики. Развитию методов моделирования коррозионных воздействий для бетона посвящены работы многих российских и зарубежных исследователей [1–6]. При этом математические модели, описывающие процессы деструкции материала в конструкции, делятся на эмпирические модели, построенные на закономерностях поведения того или иного материала при воздействии окружающей среды [2; 3] и феноменологические модели, в основу которых положены физико-химические законы протекания реакций химической коррозии в материале [4; 5]. Преимуществом физико-химических моделей по сравнению с эмпирическими моделями является описание кинетики процессов в более широком спектре параметров среды и характеристик материала [6]. Недостатками, по мнению [7; 8], существующих физико-химических моделей является то, что при их разработке в большинстве случаев учитываются данные о кинетике коррозионных процессов, полученные в результате лабораторных исследований на образцах с ограниченным набором воздействующих внешних факторов. С такой оценкой можно не согласиться. Скорее всего, изучаемый в физико-химических моделях ограниченный набор воздействующих внешних факторов определяется неправильным подходом к описанию всего процесса деструкции в целом. Именно это

приводит к искажению результатов всей физико-химической модели на конечном этапе. Объединение результатов лабораторных исследований, описанных в форме эмпирических моделей, с феноменологической моделью, выстроенной на базе фундаментальных законов физической химии, позволит создать корректную модель химической стойкости материала [9]. В данном случае важную роль будет играть правильность интеграции эмпирических моделей в выстраиваемую феноменологическую модель.

Надо отметить, что ни одна из анализируемых математических моделей не рассматривает процессы внутренней химической коррозии материала без какого-либо внешнего воздействия. При этом деструкция материала оценивается по механическому разрушению при воздействии отрицательных температур [4; 11; 20].

Расчёт скорости деструкции материала кирпича с использованием в качестве основного параметра марки кирпича по морозостойкости [1; 14] невозможен, так как данный параметр даёт лишь относительную оценку по критерию «да/нет» разрушению материала после определённого количества циклов замораживания-оттаивания.

Натурными исследованиями [12, 13; 16] доказано, что процесс деструкции кирпича может протекать и при только положительных температурах, а использование параметра морозостойкости для оценки времени работы материала с параметрами не ниже нормативных приводит к серьёзным ошиб-

кам в оценке времени эффективного использования материала, хотя и предлагается многими исследователями [14; 17].

В работах [12; 13; 16] выдвинута гипотеза, что процесс деструкции материала кирпича можно описать на основании законов физической химии, приняв за основу химическую природу процессов деструкции материала стеновой керамики. Такой подход не только позволит более точно и корректно описать процесс деструкции, но и определить время за которое параметры материала снижаются ниже нормативных. При этом политермическое воздействие на материал кирпича может привести к ускорению разрушения материала, ослабленному процессами химической коррозии.

Химическая деструкция кирпича и кирпичной кладки описывается многостадийным процессом [10; 22]. На первой стадии процесса в материале кирпича происходит образование щелочей из оксидов щелочных и щёлочноземельных металлов. Щёлочь может также поступать в кирпич из цементно-песчаного раствора. В основном это гидроксид кальция, образующийся в цементно-песчаном растворе при протекании процесса выщелачивания [8; 17]. На второй стадии процесса происходит взаимодействие образовавшихся в материале кирпича или/и поступивших в него из цементно-песчаного раствора щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы материала кирпича. При этом происходит полное разрушение материала кирпича до размеров частиц порядка  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  м, так как аморфная составляющая является связующей фазой материала. Важную роль в процессе деструкции играет также нехимическая стадия – стадия увлажнения материала.

Для теоретического обоснования данного предположения, а также уточнения химических реакций были выполнены термодинамические расчёты. В расчётах были учтены 265 химических реакций, предположительно участвующих в процессе. Расчёты проводились с использованием стандартных термодинамических характеристик веществ с вычислением значения изобарно-изотермического потенциала реакции от температуры. На основании выполненных расчётов были определены направление протекания реакций и оценка их энергетической возможности, вероятность протекания реакций в одной системе при условии идентичности исходных структурных и кинетических факторов, а также определена устойчивость образующихся соединений. Термодинамические расчёты теоретически подтвердили правильность принятой схемы процесса деструкции стеновой керамики, позволили уточнить процессы деструкции с определением конечных продуктов реакций, а также позволили сформулировать основные направления исследований кинетики процесса. Эти направления определяются исходя из основных факторов, влияющих на скорость химических реакций: концентрации веществ, вступающих в реакцию, и температуры протекания процесса.

### Разработка методики и результаты исследования

Для исследования кинетики процесса были разработаны две методики. Первая – методика исследования скорости

реакций образования щелочей в материале кирпича (определение коррозионной активности влаги). Данная методика позволяет получить численные значения скорости образования щелочей при взаимодействии оксидов щелочных и щёлочноземельных металлов, присутствующих в материале кирпича, при его увлажнении. В настоящее время данная методика зарегистрирована как ГОСТ Р 70565-2022 «Конструкции ограждающие из кирпичной кладки. Метод определения коррозионной активности влаги»<sup>1</sup>.

Вторая методика позволяет определить скорость деструкции материала кирпича под действием щелочей. Данная методика также зарегистрирована как ГОСТ Р 70564-2022 «Конструкции ограждающие из кирпичной кладки. Метод определения химической стойкости»<sup>2</sup>. Вводится новый показатель работы строительной керамики: коэффициент химической деструкции (Chemical destruction coefficient)  $Cd$  – доля пробы, определённая в процентах или в долях, которая разрушается в процессе химического воздействия за время, определённое в часах. Вводимый в результате исследований показатель имеет размерность  $[\%/час, ч^{-1}]$ , что делает возможным его использование в расчёте долговечности материала.

Таким образом, совместное применение двух методик позволяет получить кинетические характеристики двух химических стадий процесса деструкции материала строительной керамики: концентрацию щелочей в материале кирпича при его увлажнении и скорость его разрушения под действием щелочей определённой концентрации при определённой температуре. Важно, что в результате проведения исследований определяются кинетические характеристики не отдельных химических реакций, а процессов образования щелочей и деструкции материала в целом.

Методика исследования коррозионной активности влаги основана на процессе взаимодействия щелочных и щёлочноземельных металлов, присутствующих в аморфной фазе материала кирпича, с водой. Данным методом изучается кинетика первой стадии процесса деструкции материала кирпича.

Концентрация элементов, перешедших в водный раствор, определяется масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным с индуктивно-связанной плазмой методами. Использовалось следующее оборудование: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Elan-6100 («Perkin Elmer», США) и атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Optima 4300 DV («Perkin Elmer», США). Исследования проводились по методикам, разработанным с учётом рекомендаций фирм – производителей данного оборудования. Элементы, определяемые в растворе: K; Na; Ca; Mg; Si; Al; S; Fe.

На основании результатов экспериментов были получены уравнения Вант-Гоффа для скорости реакции гидратации

<sup>1</sup> <https://docs.cntd.ru/document/1200194610>

<sup>2</sup> <https://docs.cntd.ru/document/1200194909>

щелочных и щёлочноземельных элементов, которые для щелочных элементов запишутся следующим образом:

$$v_{Na^+} = v_{Na^+}^{22} \cdot 1,43^{(T-22)/10} = 9,250 \cdot 1,43^{(T-22)/10} \quad (1)$$

$$v_{K^+} = v_{K^+}^{22} \cdot 1,91^{(T-22)/10} = 46,250 \cdot 1,91^{(T-22)/10} \quad (2)$$

Результаты проведённой серии лабораторных исследований позволили также определить коэффициенты в уравнении Аррениуса. С учётом выполненных расчётов уравнение Аррениуса для реакций взаимодействия щелочных элементов материала кирпича с водой запишутся в следующем виде:

$$\text{Для } Na^+ \quad \ln v = -928,62/T + 5,37 \quad (3)$$

$$\text{Для } K^+ \quad \ln v = -1665,88/T + 9,48 \quad (4)$$

Энергия активации реакции находится из уравнения (5)

$$E^* = -AR, \quad (5)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31$  Дж/(моль\*град);  $A$  – числитель при обратной температуре в уравнении Аррениуса.

Учитывая уравнения (3) – (4) можно считать, что значение энергии активации реакций гидратации нами определено.

Важно отметить, что концентрация элементов щелочных и щёлочноземельных металлов в водном растворе при определённых температуре и времени контакта имеет максимальное, то есть равновесное значение. Данное значение максимальной концентрации для всех элементов щелочных и щёлочноземельных металлов было определено, и составлены уравнения зависимости равновесной концентрации элементов от температуры. Эти значения будут учтены при составлении математической модели процесса деструкции.

Методика определения скорости деструкции материала кирпича основана на процессе взаимодействия щёлочи с материалом кирпича при многократном воздействии на пробу кирпича щёлочью и определении изменения массы пробы до и после воздействия, а также времени, за которое это изменение произошло. Данная методика предназначена для изучения кинетики второй стадии процесса химической деструкции.

В исследованиях использовался материал полнотелого глиняного кирпича производства России со следующими характеристиками: прочность 18,1 МПа, плотность 1780 кг/м<sup>3</sup>, морозостойкость 50 циклов.

В процессе исследований определяется зависимость скорости реакции химической коррозии от концентрации щёлочи в растворе, а также температурные коэффициенты в уравнениях Аррениуса и Вант-Гоффа.

Проведение лабораторных исследований химической стойкости материала кирпича проводились при температурах протекания реакций 22 °С, 60 °С и 100 °С; при трёх различных

концентрациях гидроокиси калия, равных 0,05 н, 0,5 н и 5,0 н и при трёх площадях контакта пробы материала кирпича при размерах зёрен пробы 0,18–0,20 мм, 0,45–0,50 мм и 0,9–1,0 мм.

В качестве примера полученных в результате экспериментов данных, на рисунке 1 приведены результаты лабораторных исследований кинетики процесса деструкции материала кирпича при концентрации гидроксида калия, используемого в эксперименте, равной 0,5 н, фракции пробы кирпича 0,9–1,0 мм и температуре процесса 100 °С.

Результаты экспериментов позволили определить зависимость скорости реакции от концентрации гидроксида калия и температуры процесса. Для описания зависимости скорости реакции деструкции материала кирпича (или коэффициента химической деструкции) от концентрации щёлочи справедливо уравнение (6):

$$v_1/v_2 = C_1/C_2 = (Cd_1/Cd_2)^k \quad (6)$$

Тогда

$$k = \ln(v_1/v_2)/\ln(Cd_1/Cd_2) \quad (7)$$

При сравнении результатов эксперимента для концентраций  $C_{0,5}/C_{0,05}$  и  $C_5/C_{0,05}$  значение степени в степенной функции (6) будет равно  $k = 0,324$ . Соответственно зависимость скорости процесса деструкции от концентрации щёлочи запишется в виде выражения:

$$v_1/v_2 = C_1/C_2 = (Cd_1/Cd_2)^k = (Cd_1/Cd_2)^{0,324} \quad (8)$$

Выражение Вант-Гоффа для процесса деструкции материала кирпича на основании проведенных исследований запишется следующим образом:

$$v_t = \gamma_2^n \cdot v_{t_0} = 2,89^n \cdot v_{t_0}, \text{ где } n = (t-t_0)/10 \quad (9)$$

Тогда с учётом (1) – (9) скорость коррозии материала конструкции можно записать:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_1^{k \frac{t-t_0}{10}} \gamma_2^{t_0/10}} \left( \frac{C_{\Sigma max}}{C_0} \right)^k \left( \gamma_2 \gamma_1^k \right)^{t_0/10} \frac{w}{w_0} \quad (10)$$

где  $Cd$  – коэффициент химической деструкции материала в условиях эксплуатации, %/час;  $Cd_0$  – коэффициент химической деструкции материала, полученный в результате лабораторных исследований по разработанной методике при концентрации щёлочи  $C_0 = 0,5$  н и температуре  $t_0 = 100$  °С, %/час;  $\gamma_1$  – температурный коэффициент скорости процесса гидратации в формуле Вант-Гоффа, определённый в результате лабораторных исследований;  $\gamma_2$  – температурный коэффициент скорости процесса химической деструкции в формуле Вант-Гоффа, определённый в результате лабораторных исследований;  $k$  – степенной коэффициент пересчёта скорости реакции деструкции от концентрации веществ [формула (8)];  $t_{22}$  – температура лабораторного эксперимента  $t =$

22 °C;  $t_0$  – температура лабораторного эксперимента  $t_0 = 100$  °C;  $t$  – температура эксплуатации материала;  $C_{\Sigma \max}^{22}$  – максимальная равновесная концентрация, полученная в результате лабораторных исследований по разработанной методике, при температуре  $t=22$  °C;  $C_0$  – концентрация гидроксида калия в эксперименте,  $C_0 = 0,5$  н;  $w_{\max}$  – максимальная влажность материала стеновой керамики;  $w_3$  – эксплуатационная влажность материала стеновой керамики.

Таким образом, скорость коррозии – это функция температуры и влажности материала, которые в процессе эксплуатации неравномерно распределены по толщине конструкции.

### Построение математической модели

В процессе эксплуатации реальная конструкция подвержена воздействию множества факторов, влияющих на температуру, влажность и, косвенно, скорость протекания химических процессов в самой конструкции. Влага, перемещающаяся по толще конструкции под действием паропроницаемости или влагопроводности, запускает описанные выше механизмы деструкции. Переменная температура по толще конструкции создаёт неравные условия протекания процесса деструкции в различных слоях.

Неравномерная деструкция материала строительной керамики по толще конструкции требует анализа живучести конструктивных систем зданий и сооружений при аварийных воздействиях. В [18] приводится анализ живучести железобетонных конструкций при особых воздействиях в виде внезапного выключения одной из конструкций. Такой анализ рассматривает прогрессирующее разрушение конструктивной системы. Приведённые ниже исследования скорости процесса химической коррозии могут быть использованы для подобных исследований конструкций из строительной керамики.

Анализ вопросов распространения тепла и влаги через конструкцию достаточно сложен в общем виде и полностью решается только численно, что неудобно для описания процесса деструкции. Однако рассмотрение общего механизма для относительно простых случаев позволяет понять принцип влияния тепловлажностных воздействий на скорость протекания процесса деструкции материала и сделать выводы, применимые к более сложным конструкциям.

Влага может проникать в конструкцию несколькими способами: диффузией пара из помещений, в виде атмосферных осадков: дождя или снега, подсосом грунтовых вод и т.д. Для однослойных кирпичных стен характерны все виды увлажнения. Так как скорость коррозии прямо пропорциональна влажности материала, быстрее всего разрушатся наиболее увлажнённые участки, подвергающиеся соответствующему температурному воздействию. Рассматривая процесс химической коррозии на наиболее слабых участках, в первую очередь интересно оценить скорость коррозии для полностью увлажнённого, находящегося в наиболее благоприятном для коррозии температурном режиме участка. Определение расположения таких участков и степени коррозионного воздействия на мате-

риал в настоящей статье рассмотрен на основании механизма теплопереноса в нестационарных условиях для однослойной кирпичной стены. Упрощённое аналитическое решение позволяет делать необходимые выводы без существенной потери точности. Полученное решение прикладывается к разработанной модели деструкции материала стены и позволяет перейти к количественным оценкам скорости деструкции.

Для определения наиболее критических мест конструкции и сроков их выхода из строя будем исходить из предположения, что искомые участки конструкции постоянно находятся при максимальном увлажнении. Тогда полученное приближённое решение уравнения теплопроводности позволяет провести оценку влияния эксплуатационных условий на скорость коррозии.

В краткой записи это решение имеет следующий вид:

$$t(x, z) = t_{н.сп}(z) + \frac{t_n - t_{н.сп}(z)}{R_0 \alpha_n} + \frac{t_n - t_{н.сп}(z)}{R_0} \frac{x}{\lambda} + C e^{-k \frac{x}{\delta}} \sin\left(\omega z - k \frac{x}{\delta} + m\right) \quad (11)$$

где  $x$  – координата слоя конструкции, отсчитываемая от наружного края, м;  $z$  – время, с;  $t_n$  – температура внутреннего воздуха, °C;  $t_{н.сп}$  – средняя температура наружного воздуха (°C) может медленно изменяться от времени, например, среднемесячная температура;  $\alpha_n$  – коэффициент теплообмена на наружной поверхности конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\delta$  – толщина конструкции, м;  $R_0$  – условное сопротивление теплопередаче конструкции, м<sup>2</sup>·°C/Вт;  $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·°C);  $\omega$  – частота быстрых колебаний температуры наружного воздуха, с<sup>-1</sup>, в основном суточных.

В (11) три первых члена формулы отвечают за влияние годового хода средней температуры. Для описания характера изменения средней температуры принимается синусоида, так как она лучше всего отражает циклический ход средней температуры. Для практических целей ход этой температуры можно аппроксимировать по среднемесячным значениям. Последний член формулы отвечает за суточные колебания.

Из формулы (10) следует, что с повышением температуры активность химических реакций, а значит, и коррозии, возрастает. Но в небольшом диапазоне отрицательных температур в процессе замерзания воды в порах материала будет повышаться концентрация веществ в растворе, причём повышаться очень сильно (1000 раз и более при низких начальных значениях), что также может способствовать ускорению протекания коррозии. Как показало проведённое авторами исследование процесса кристаллизации влаги в ограждающих конструкциях, постепенное замерзание влаги при охлаждении материала проходит примерно в диапазоне от –1 °C до –7 °C. При нагревании материала замёрзшая влага тает при температурах от 1 °C до 2 °C.

Конструкцию можно разделить на участки:

- 1) никогда не испытывающие замерзания влаги;
- 2) испытывающие замерзание однократно в течение года;
- 3) испытывающие множественные циклы замерзания/оттаивания.

Первый и третий участки хорошо известны, и на них часто ссылаются, правда, не давая развёрнутых инструментов для их нахождения. Второй участок обычно не упоминается, однако его наличие видно из формулы (11). Так как температура относительно полного замерзания и относительно полного размораживания отстоят друг от друга примерно на 6–8 градусов, для появления многократных в течение года циклов замораживания/оттаивания необходимо, чтобы суточные колебания температуры наружного воздуха, проникая вглубь конструкции, сохранили достаточную амплитуду колебаний. Из формулы (11) следует, что эта амплитуда экспоненциально убывает с координатой, значит будет достигнута глубина конструкции, на которой при соответствующих среднемесячных температурах отрицательные температуры будут достигаться, а необходимых суточных колебаний в процессе происходить не будет.

Например, для стены, выполненной из кирпичной кладки толщиной 510 мм (типовой конструкции для центральной европейской части России), такая глубина наступит примерно в 100 мм от наружной поверхности. Соответственно, даже в Москве, не говоря о более контрастных климатических условиях, за этой чертой (100 мм) отрицательные температуры наблюдаться будут, а необходимых колебаний уже не будет. Иная ситуация может сложиться для многослойных конструкций. Их нужно оценивать отдельно.

Для приложения распределения температуры к скорости коррозии материала конструкции удобно перейти к годовой коррозии материала. Так как мы исходим из циклически повторяющихся климатических условий и состояний конструкции, в первом приближении годовая коррозия материала одинакова для всех лет.

Для дальнейшего анализа обозначим максимальную,  $t_{max}(x)$ , и минимальную,  $t_{min}(x)$ , температуры в слое конструкции:

$$t_{max}(x) = t_{н. max} + \frac{t_B - t_{н. max}}{R_o} \left( \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n} \right) + C e^{-k \frac{x}{\delta}}, \quad (12)$$

$$t_{min}(x) = t_{н. min} + \frac{t_B - t_{н. min}}{R_o} \left( \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n} \right) - C e^{-k \frac{x}{\delta}}, \quad (13)$$

где

$$C = \frac{\alpha_n \frac{\delta}{\lambda} t_{\omega}}{\sqrt{\left( k + \alpha_n \frac{\delta}{\lambda} \right)^2 + k^2}} \quad (14)$$

На практике, кроме задач требующих максимально высокую точность, можно считать  $C = t_{\omega}$ .

Введём температуру замерзания  $t_{зам}$  и размораживания  $t_{раз}$  воды в материале. Под ними будем понимать температуру, при которой замерзает или размораживается основная масса воды в порах материала. В соответствии с введённым выше делением конструкции на участки с разным характером циклов замораживания/оттаивания установим приближенные координаты этих участков.

Участок, на котором вода в порах материала никогда не замерзает, определяется неравенством  $t_{min} > t_{зам}$ . Из этого неравенства можно найти координату левой границы незамерзающего участка (правая граница – поверхность конструкции со стороны помещения):

$$t_{н. min} + \frac{t_B - t_{н. min}}{R_o} \left( \frac{x_+}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n} \right) - C e^{-k \frac{x_+}{\delta}} = t_{зам} \quad (15)$$

Участок конструкции, испытывающий замерзание однократно в течение года, будет расположен между координатой  $x_1$ , определяемой из уравнения (17), и координатой  $x_+$ , определяемой из уравнения (15). Если  $x_1 > x_+$ , такого участка не возникает:

$$2C e^{-k \frac{x_1}{\delta}} = t_{раз} - t_{зам} \quad (16)$$

$$x_1 = -\frac{\delta}{k} \ln \frac{t_{раз} - t_{зам}}{2C} \quad (17)$$

Левее меньшей из координат  $x_1$  и  $x_+$  расположен участок с многократными замораживаниями/оттаиваниями в течение года.

Для приложения распределения температуры к скорости коррозии материала конструкции удобно перейти к годовой коррозии материала. Так как мы исходим из циклически повторяющихся климатических условий и состояний конструкции, в первом приближении годовая коррозия материала одинакова для всех лет.

Для участка конструкции, температура эксплуатации которого никогда не опускается ниже  $t_{зам}$  (никогда не замерзает), годовая коррозия материала выражается формулами:

$$Cd_{год} = \int_0^{z_{год}} C ddz \quad (18)$$

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_1 k \frac{t_{22}}{10} \gamma_2 \frac{t_0}{10}} \left( \frac{C^{22} \Sigma_{max}}{C_0} \right)^k \int_0^{z_{год}} \left( \gamma_2 \gamma_1^k \right)^{\frac{t}{10}} \frac{w}{w_0} dz \quad (19)$$

В предельном случае постоянного максимального увлажнения формула (19) дополнительно упрощается:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_1 k \frac{t_{22}}{10} \gamma_2 \frac{t_0}{10}} \left( \frac{C^{22} \Sigma_{max}}{C_0} \right)^k \frac{w_{max}}{w_0} \int_0^{z_{год}} \left( \gamma_2 \gamma_1^k \right)^{\frac{t}{10}} dz \quad (20)$$

Для сокращения дальнейших записей в процессе нахождения интеграла все выражение перед интегралом обозначим  $A$ . Также перейдём в подинтегральной записи к экспоненте.

$$Cd = A \int_0^{z_{год}} \exp \left( \frac{t}{10} \ln \left( \gamma_2 \gamma_1^k \right) \right) dz \quad (21)$$

Решение данного интеграла в настоящей статье не приводится. Учитывая, что в самом общем виде температура в любой точке конструкции зависит от времени по следующей формуле:

$$t(z) = t_0 + t_1 \sin(\omega_1 z) + t_2 \sin(\omega_2 z) \quad (22)$$

Окончательное решение (21) запишется следующим образом:

$$Cd = \frac{Cd_0}{\gamma_1^k \frac{t_{22}}{10} \gamma_2 \frac{t_0}{10}} \left( \frac{C^{22} \Sigma_{max}}{C_0} \right)^k \frac{w_{max}}{w_0} \exp \left( \frac{\ln(\gamma_2 \gamma_1^k)}{10} t_0 \right) \times \frac{2\pi}{\omega_1} I_0 \left( \frac{\ln(\gamma_2 \gamma_1^k)}{10} t_1 \right) \frac{2\pi}{\omega_2} I_0 \left( \frac{\ln(\gamma_2 \gamma_1^k)}{10} t_2 \right) \quad (23)$$

$$Cd = 365Cd_0 \left( \frac{C^{22} \Sigma_{max}}{C_0} \gamma_1 \frac{t_0 - t_{22}}{10} \right)^k \frac{w_{max}}{w_0} I_0 \left( \frac{\ln(\gamma_2 \gamma_1^k)}{10} t_1 \right) I_0 \left( \frac{\ln(\gamma_2 \gamma_1^k)}{10} t_2 \right) \quad (24)$$

где  $I_0(y)$ - модифицированная функция Бесселя первого рода (функция Инфельда) нулевого порядка

$$I_0(y) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(y \cos(z)) dz \quad (25)$$

Для случая увлажнения конструкции в пределах сорбционной влажности материалов ниже приводится приближенный метод расчёта. Для однослойных конструкций, влажность материала которых не превышает максимальной сорбционной, распределение влажности прямо связано с распределением парциального давления водяного пара, которое описывается уравнением аналогичным уравнению теплопроводности.

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{1}{E} \frac{\partial e}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} \quad (26)$$

где  $e$  – парциальное давление водяного пара, Па;  $E$  – давление насыщенного водяного пара, Па, зависит от температуры;  $\gamma_0$  – плотность сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – расчётная паропроницаемость материала, кг/(м·с·Па);  $\frac{\partial w}{\partial \varphi}$  – производная от изотермы сорбции, %/‰.

В отличие от уравнения теплопроводности – это уравнение учитывает переменную влажность материала.

Достаточно грубое распределение парциального давления водяного пара по толщине однослойной ограждающей конструкции может быть найдено по аналогии с распределением температуры – как сумма двух функций медленно изменяющихся с годовым ходом температуры и влажности:

$$U = e_{н.сп} + \frac{e_b - e_{н.сп}}{R_{но} \beta_n} + \frac{e_b - e_{н.сп}}{R_{но}} \frac{\delta}{\mu} y \quad (27)$$

и испытывающей быстрые суточные колебания:

$$V = \frac{\beta_n \frac{\delta}{\mu} e_0}{\sqrt{\left( k + \beta_n \frac{\delta}{\mu} \right)^2 + k^2}} e^{-ky} \sin \left( v_w F_0 - ky - \frac{k}{k + \beta_n \frac{\delta}{\mu}} \right) \quad (28)$$

$v_w$  находится по формуле:

$$v_w = \omega \delta^2 \frac{\gamma_0}{\mu E} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (29)$$

Проведённый анализ показывает, что для наиболее распространённых кирпичных стен толщиной в 1,5–2,5 кирпича, решение (27) вместе с решением (28) – (29) с большой точностью описывают распределение влажности по толщине стены для годовых и суточных колебаний, которые и представляют наибольший интерес при анализе деструкции материала стены.

На основании проведённых исследований разработана Программа расчёта долговечности стеновой керамики на ЭВМ [21]. Функциональные возможности программы позволяют обрабатывать сигнал от датчиков температуры и влажности, установленных на объекте, с выдачей на пульт эксплуатирующей организации информации об остаточной долговечности конструкции здания, что важно для контроля за состоянием зданий в период их эксплуатации [19]. Программа рассчитывает долговечность материала стеновой керамики на основании характеристик материала и условий его эксплуатации, таких как температура и влажность окружающей среды, а также определяет условия эксплуатации для обеспечения максимальной долговечности.

### Выводы

Разработана математическая модель процесса деструкции материала кирпича при его работе в кирпичной кладке ограждающей конструкции, которая описывает одновременное протекание процесса деструкции материала во всём объёме конструкции. Такой подход является правильным для пористых материалов с высокой паропроницаемостью, что принципиально отличает его от математических моделей, построенных для плотных материалов и описывающих процесс на основе закона диффузии (закон Фика). Получено приближённое решение уравнения теплопроводности, позволяющее с большой точностью описать распределение температуры по конструкции под влиянием годовых и суточных гармонических колебаний температуры.

Полученное решение, в свою очередь, даёт возможность разделить конструкцию на участки с различным качественным протеканием процесса химической коррозии. Показано влияние нестационарного влажностного режима ограждающей конструкции на коррозию материала и приведены основные формулы необходимые для его учёта и анализа. Выявлено, что наибольшее качественное влияние на протекающий процесс оказывает распределение температуры, а распределение влажности меняет его количественные показатели.

### Список источников

1. Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман. – Текст : непосредственный // Бетон и железобетон – взгляд в будущее : Научные труды

III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону. Москва, 12–16 мая 2014 г. : В 7 томах : Том 3. Арматура и системы армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. – Москва. : МГСУ, 2014. – С. 430–444.

2. *Fagerlund, G.* The Residual Service Life of Concrete Exposed to the Combined Effect of Frost Attack and Reinforcement Corrosion / G. Fagerlund, G. Somerville K. Tuutti // Proceedings of Int. Conf. Concrete across Borders 1994. – Danish Concrete Association, 1994. – Pp. 351–64.

3. Characterization of Biofilms on Corroded Concrete Surfaces in Drinking Water Reservoirs / S. Herb, J.O. Stair, D.B. Ringelberg, D.C. White [и др.]. – Текст : непосредственный // Water Science and Technology. – 1995. – № 32. – P. 141–147.

4. *Шейкин, А.Е.* Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Ленинград : Стройиздат, Ленинградское отделение, 1989. – 127 с. – Текст : непосредственный.

5. *Sand, W.* Biodeterioration of Mineral Materials by Microorganisms – Biogenic Sulfuric and Nitric Acid Corrosion of Concrete And Natural Stone / W. Sand, E. Bock. – Текст : непосредственный // Geomicrobiological Journal, 1991, – № 9 (2-3). – P. 129–138.

6. State of the Art and Research Development Prospects of Energy and Resource-Efficient Environmentally Safe Chemical Process Systems Engineering / V.P. Meshalkin, V.G. Dovi', V.I. Bobkov [и др.]. – DOI: 10.1016/j.mencom.2021.09.003 – Текст : электронный // Mendeleev Communications. – 2021. – V. 31, № 5. – P. 593–604. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/355953408\\_State\\_of\\_the\\_art\\_and\\_research\\_development\\_prospects\\_of\\_energy\\_and\\_resource-efficient\\_environmentally\\_safe\\_chemical\\_process\\_systems\\_engineering](https://www.researchgate.net/publication/355953408_State_of_the_art_and_research_development_prospects_of_energy_and_resource-efficient_environmentally_safe_chemical_process_systems_engineering) (дата обращения 01.08.2024).

7. *Маринин, А.Н.* Сопротивление железобетонных конструкций воздействию хлоридной коррозии и карбонизации / А.Н. Маринин, Р.Б. Гарибов, И.Г.Овчинников. – Саратов : Рата, 2008. – 261 с. – Текст : непосредственный.

8. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость – резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Н.С. Касьяненко. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 2. – С. 65–70.

9. *Бутусов О.Б.* Основы информатизации и математического моделирования экологических систем / О.Б. Бутусов, В.П. Мешалкин ; 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва : Инфра-М, 2024. – 374 с. – DOI: 10.12737/1477254. – Текст : непосредственный.

10. Durability Control of Brickwork's Material Including Operation Parameters of the Building Enclosure / D. Zheldakov, R. Mustafin, V. Kozlov1 [и др.]. – Текст : электронный // Mathematical Modelling of Engineering Problems. – 2021. – Vol. 8, № 6. – P. 871–880. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/357253933\\_Durability\\_Control\\_of\\_Brickwork's\\_Material\\_Including\\_Operation\\_Parameters\\_of\\_the\\_Building\\_Enclosure](https://www.researchgate.net/publication/357253933_Durability_Control_of_Brickwork's_Material_Including_Operation_Parameters_of_the_Building_Enclosure) (дата обращения 01.08.2024).

11. Получение морозостойкого керамического кирпича полусухого прессования из промышленных отходов / Столбовский А.Ю., Иванов А.И., Стороженов Г.И., Уразов С.И. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2011. – № 12. – С. 4–7.

12. *Zheldakov, D.Yu.* The Brick Material Durability in Brickwork / D.Yu. Zheldakov. – Doi: 10.34910/ALF. 15.4. – Текст : электронный // AlfaBuild. – 2020. – Vol. 15, Article № 1504. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44672316\\_41332681.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44672316_41332681.pdf) (дата обращения 01.08.2024).

13. *Zheldakov, D.Yu.* Brickwork Chemical Corrosion Features / D.Yu. Zheldakov. – DOI: 10.1088/1755-1315/459/6/062089. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 459. – 062089. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/340657425\\_Brickwork\\_Chemical\\_Corrosion\\_Features](https://www.researchgate.net/publication/340657425_Brickwork_Chemical_Corrosion_Features) (дата обращения 01.08.2024).

14. *Александровский, С.В.* Долговечность наружных ограждающих конструкций : Монография / С.В. Александровский. – Москва : НИИСФ РААСН, 2003. – 332 с. – Текст : непосредственный.

15. *Подвальный, А.М.* О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений / А.М. Подвальный. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2004. – №6. – С. 4–6.

16. *Желдаков, Д.Ю.* Химическая коррозия кирпичной кладки. Протекание процесса / Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2019. – № 2019. – № 4. – С. 36–43

17. Коррозия бетона и железобетона / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев, Е.А. Гузев. – Москва : Стройиздат, 1980. – 536 с. – Текст : непосредственный.

18. *Травуш В.И.,* Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях / В.И. Травуш, Н.В. Федорова. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 5 (81). – С. 73–80.

19. О концепции развития нормативно-технической базы строительных объектов в период их эксплуатации / В.И. Травуш, В.В.Гурьев, А.Н. Дмитриев [и др.]. – DOI:10.22337/2077-9038-2021-1-121-133. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 1. – С. 121–123.

20. *Fagerlund, G.* The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete / G. Fagerlund // Mat. and Str. – 1977. – № 58 (10). – P. 217–230.

21. Программа расчёта долговечности стеновой керамики // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023689122 / В.В. Афонин, В.Т. Ерофеев, Д.Ю. Желдаков, И.Л. Шубин ; Дата регистрации: 17.12.2023 ; Опубл. 26.12.2023, Бюл. № 1.

22. *Желдаков, Д.Ю.* Определение долговечности строительной керамики / Желдаков Д.Ю., Ерофеев В.Т. – DOI:



10.22227/1997-0935.2024.3.394-402. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, вып. 3. – С. 394–402.

#### References

1. Stepanova V.F., Falikman V.R. Sovremennye problemy obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktssii [Advanced Topics in Assurance of Reinforced Concrete Structural Durability]. In: *Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushchee [Concrete and Reinforced Concrete – a Look into the Future]*, Scientific works of the III All-Russian (II International) conference on concrete and reinforced concrete, Moscow, May 12–16, 2014, In 7 volumes, Vol. 3. *Armatura i sistemy armirovaniya. Fibrobetony i armotsemy. Problemy dolgovechnosti [Reinforcement and Reinforcement Systems. Fiber Concrete and Reinforced Cement. Durability issues]*. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 275–302. (In Russ., abstr. In Engl.)

2. Fagerlund G., Somerville G., Tuutti, K. The Residual Service Life of Concrete Exposed to the Combined Effect of Frost Attack and Reinforcement Corrosion. In: *Proceedings of Int. Conf. Concrete across Borders*, 1994. Danish Concrete Association, 1994, pp. 351–64. (In Engl.)

3. Herb S., Stair J.O., Ringelberg D.B., White D.C., Flemming H.C. Characterization of Biofilms on Corroded Concrete Surfaces in Drinking Water Reservoirs. In: *Water Science and Technology*, 1995, no. 32, pp. 141–147. (In Engl.)

4. Sheikin A.E., Dobshits L.M. Tsementnye betony vysokoi morozostoikosti [Cement Concretes with High Frost Resistance]. Leningrad, Stroizdat, Leningrad branch Publ., 1989, 127 p. (In Russ.)

5. Sand W., Bock E. Biodeterioration of Mineral Materials by Microorganisms – Biogenic Sulfuric and Nitric Acid Corrosion of Concrete and Natural Stone. In: *Geomicrobiological Journal*, 1991, no. 9 (2-3), 1991, pp. 129–138. (In Engl.)

6. Meshalkin V.P., Doví V.G., Bobkov V.I., Belyakov A.V., Butusov O.B., Garabadzhiu A.V., Burukhina T.F., Khodchenko S.M. State of the Art and Research Development Prospects of Energy and Resource-Efficient Environmentally Safe Chemical Process Systems Engineering. In: *Mendeleev Communications*. 2021, Vol 3, no. 31, pp. 593–604. DOI: 10.1016/j.mencom.2021.09.003/. URL: [https://www.researchgate.net/publication/355953408\\_State\\_of\\_the\\_art\\_and\\_research\\_development\\_prospects\\_of\\_energy\\_and\\_resource-efficient\\_environmentally\\_safe\\_chemical\\_process\\_systems\\_engineering](https://www.researchgate.net/publication/355953408_State_of_the_art_and_research_development_prospects_of_energy_and_resource-efficient_environmentally_safe_chemical_process_systems_engineering) (дата обращения 01.08.2024). (In Engl.)

7. Marinin A.N., Garibov R.B., Ovchinnikov I.G. Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstruktssii vozdeistviyu khloridnoi korrozii i karbonizatsii [Resistance of Reinforced Concrete Structures to Chloride Corrosion and Carbonation]. Saratov, Rata Publ., 2008, 261 p. (In Russ.)

8. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasil'nikov I.V., Kas'yanenko N.S. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya protsessov korrozii pervogo vida tsementnykh betonov v sisteme «zhidkost' – rezervuar» pri nalichii vnutrennego istochnika massy v tverdoi faze [Modeling of

Mass Transfer in the Corrosion Processes of the First Type of Cement Concrete in the «Liquid – Reservoir» System with the Availability of the Internal Source of the Mass in the Solid Phase]. In: *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 2013, no. 2, pp. 65–70. (In Russ., abstr. in Engl.).

9. Butusov O.B., Meshalkin V.P. Osnovy informatizatsii i matematicheskogo modelirovaniya ekologicheskikh sistem [Fundamentals of Informatization and Mathematical Modeling of Ecological Systems]. Moscow, Infra-Moscow, 2024, 374 p. DOI: 10.12737/1477254. (In Russ.)

10. Zheldakov D., Mustafin R., Kozlov V., Gaysin A., Sinitin D., Bulatov B. Durability Control of Brickwork's Material Including Operation Parameters of the Building Enclosure. In: *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 2021, Vol. 8, no. 6, pp. 871–880. URL: [https://www.researchgate.net/publication/357253933\\_Durability\\_Control\\_of\\_Brickwork's\\_Material\\_Including\\_Operation\\_Parameters\\_of\\_the\\_Building\\_Enclosure](https://www.researchgate.net/publication/357253933_Durability_Control_of_Brickwork's_Material_Including_Operation_Parameters_of_the_Building_Enclosure) (дата обращения 01.08.2024). (In Engl.)

11. Stolboushkin A.Yu., Ivanov A.I., Storozhenko G.I., Urazov S.I. Poluchenie morozostoikogo keramicheskogo kirpicha polusukhogo pressovaniya iz promyshlennykh otkhodov [Production of Frost-Resistant Ceramic Bricks by Semi-Dry Pressing from Industrial Waste]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2011, no. 12, pp. 4–7. (In Russ.)

12. Zheldakov D.Yu. The Brick Material Durability in Brickwork. In: *AlfaBuild*, 2020, Vol. 15, Article no. 1504, doi: 10.34910/ALF.15.4. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44672316\\_41332681.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44672316_41332681.pdf) (Accessed 08/01/2024). (In Engl.)

13. Zheldakov, D. Yu. Brickwork Chemical Corrosion Features. In: *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 459, 062089. DOI: 10.1088/1755-1315/459/6/062089. URL: [https://www.researchgate.net/publication/340657425\\_Brickwork\\_Chemical\\_Corrosion\\_Features](https://www.researchgate.net/publication/340657425_Brickwork_Chemical_Corrosion_Features) (Accessed 08/01/2024). (In Engl.)

14. Aleksandrovskii S.V. Dolgovechnost' naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktssii [Durability of External Enclosing Structures], Monograph. Moscow, NIISF RAASN Publ., 2003, 332 p. (In Russ.)

15. Podval'nyi A.M. O kontseptsii obespecheniya morozostoikosti betona v konstruktssiyakh zdaniy i sooruzhenii [On the Concept of Ensuring Frost Resistance of Concrete in the Structures of Buildings and Structures]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2004, no. 6, pp. 4–6. (In Russ.)

16. Zheldakov D.Yu. Khimicheskaya korroziya kirpichnoi kladki. Protekanie protsessa [Chemical Corrosion of Brick Masonry. Process Running]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2019, no. 4, pp. 36–43 (In Russ., abstr. in Engl.)

17. Moskvín V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona [Corrosion of Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, Stroizdat Publ., 1980, 536 p. (In Russ.)

18. Travush V.I., Fedorova N.V. Zhivuchest' konstruktivnykh sistem sooruzhenii pri osobykh vozdeistviyakh [Survivability of Structural Systems of Buildings with Special Effects]. In: *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, 2018, no. 5 (81), pp. 73–80. (In Engl., abstr. in Russ.)

19. Travush V.I., V.V.Gur'ev, A.N.Dmitriev, V.M.Dorofeev, Yu.S.Volkov O kontseptsii razvitiya normativno-tekhnicheskoi bazy stroitel'nykh ob"ektov v period ikh ekspluatatsii [On the Concept of Development of the Regulatory and Technical Base of Construction Objects During Their Operation]. In: *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, 2021, no. 1, pp. 121–123. DOI:10.22337/2077-9038-2021-1-121-133. (In Engl.)

19. Litvan G. The Mechanism of Frost Action in Concrete – Theory and Practical Implications. In: *Proceedings of Workshop on Low Temperature Effects on Concrete*, pp 116–127. (In Engl.)

20. Fagerlund G. 1977. The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete. In: *Mat. and Str.*, 1988, no. 58 (10), pp. 217–30. (In Engl.)

21. Afonin V.V., Erofeev V.T., Zheldakov D.Yu., Shubin I.L. Programma rascheta dolgovechnosti stenovoi keramiki [Program for Calculating the Durability of Wall Ceramics]; Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № RU 2023689122 [Certificate of state registration of the computer program No. RU 2023689122 ], Date of registration: 12/17/2023 Date of publication: 12/26/2023, bulletin no. 1.

22. Zheldakov D.Yu., Erofeev V.T. Opredelenie dolgovechnosti stroitel'noi keramiki [Determination of Durability of Building Ceramics]. In: *Vestnik MGSU*, 2024, Vol. 19, Iss. 3, pp. 394–402. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402 (In Russ., abstr.in Engl.)