



The Brick Material Durability in Brickwork

Zheldakov, D.Yu.^{1*}

¹ Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Russian Federation

* djeld@mail.ru

Keywords:

Brick; Chemical corrosion; Durability; Frost resistance; Brickwork

Abstract:

Destruction of bricks in building's enclosure brickworks in regions without negative temperature (e.g. Sienna, Italy) shows that frost resistance is not a determinant parameter when evaluating the durability of brick's material. At the same time, the mechanism of brickwork destruction for different regions and periods is the same. Based on those field studies, a scientific hypothesis can be made that brick destruction in building enclosure's brickwork derives from chemical corrosion. Based on this hypothesis, the purpose of scientific research was determined – to determine the durability of the material in time units. To achieve it and to validate the scientific hypothesis, the method of brick's material degradation was developed. It consists of 3 stages: first non-chemical stage of material humidification; first chemical stage of alkalis' formation from amorphous part of brick's material; second chemical stage of material's degradation caused by the interaction of alkalis with silicon and aluminum oxides. The possibility of a chemical reaction's process was proven by thermodynamic calculations. To determine the kinetic characteristics of chemical stages of the degradation process, research methods of alkalis formation process by material humidification and brick material's degradation were developed. Based on laboratory researches, kinetic characteristics of chemical reactions were obtained: dependency of reaction's speed to the concentration of reagents and temperature of the process. Kinetic characteristics of degradation process with the application of material's humidification speed parameter allowed calculation of brick material's durability in time units. The results of 3 different brick materials were realistic. On the current development stage, it allows us to recommend this method to evaluate brick material's durability instead of methods by frost resistance and strength.

1 Введение (Introduction)

В 2005-2008 годах в г. Москве (Россия) были проведены обследования более, чем ста зданий, построенных в 1990 – 2005 годах с использованием кирпичной кладки в облицовочном слое ограждающих конструкций. В результате обследований зданий было зафиксировано разрушение кирпича на фасадах домов и в конструктивных элементах. В некоторых случаях ограждающие конструкции с кирпичным облицовочным слоем требуют ремонта через несколько лет эксплуатации [4].

На рисунке 1 представлены результаты натуральных обследований различных типов разрушения кирпичной кладки проведенных автором. Фотографии сделаны в различающихся по климату регионах: в г. Москва, Россия с резко континентальным климатом и холодной зимой, в городе Сиена, региона Тоскана, Италия с мягким средиземноморским климатом без снижения температуры ниже ноля градусов в течении всего года и в г. Владивосток, Россия, с морским климатом.

На основании натуральных исследований можно сделать следующие выводы:

- Количество циклов заморзания-оттаивания не является определяющим параметром долговечности материала кирпича. При одинаковых климатических условиях (увлажнение, цикличность температуры, в том числе количество переходов через ноль) скорость деструкции кирпичей, даже находящихся рядом в кирпичной кладке, может значительно различаться;

- Механизм деструкции материала кирпича в кирпичной кладке одинаков и не зависит от времени производства кладки и географического расположения здания с кирпичными ограждающими конструкциями. Кирпичная кладка зданий, возведенных в 12-15 веков, в середине 20 века, расположенных и в мягком средиземноморском и в резко континентальном климате, разрушается в соответствии с едиными принципами.

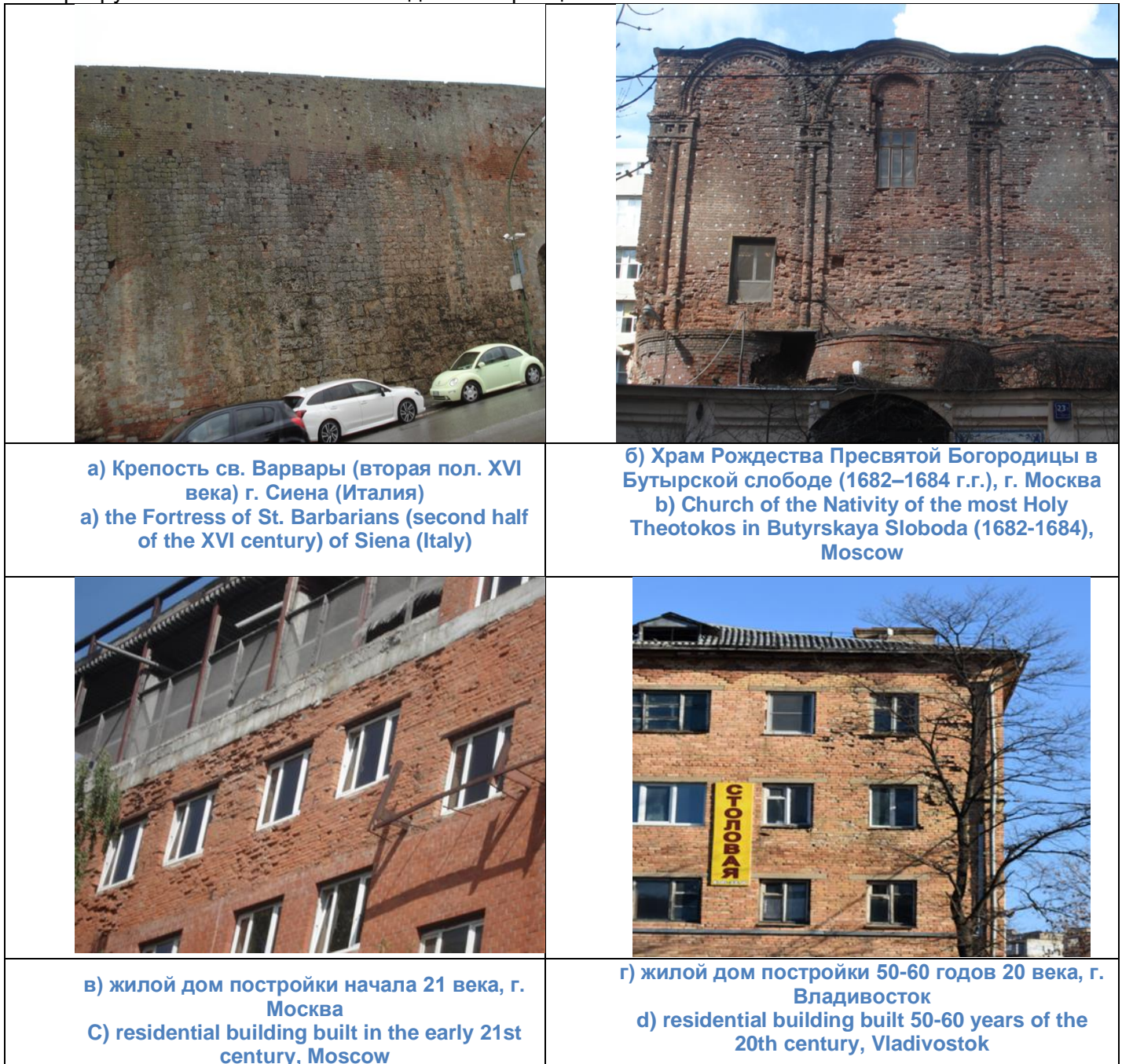


Рис. 1 – Примеры разрушения кирпичной кладки
 Fig. 1 - Examples of brickwork destruction

Так как натурными исследованиями доказано, что процесс деструкции кирпича может протекать и при только положительных температурах (рисунок 1а), использование параметра морозостойкости для оценки долговечности приводит к серьезным ошибкам, хотя и предлагается многими исследователями [5]-[7], [19], [20], [22]-[24]. Расчет долговечности материала кирпича с использованием в качестве основного параметра марки кирпича по морозостойкости [8], [26] невозможен, так как данный параметр дает лишь относительную оценку по критерию «да/нет» разрушению материала после определенного количества циклов замораживания-оттаивания.

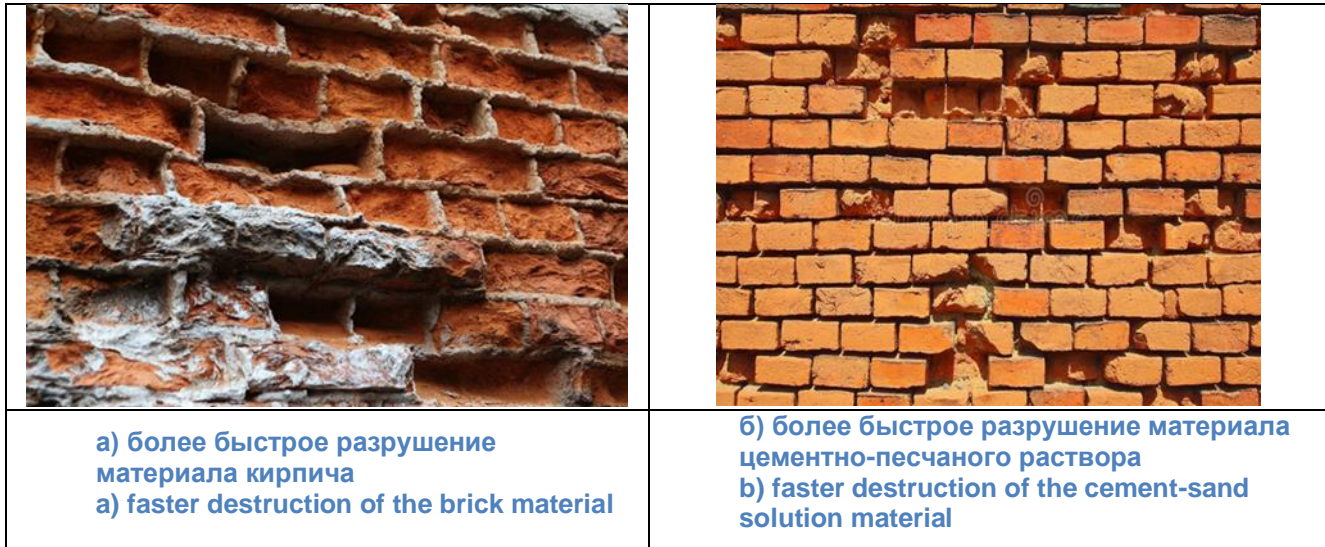


Рис. 2 – Разные скорости деструкции материалов кирпича и раствора
Fig. 2 - Different rates of destruction of brick and mortar materials

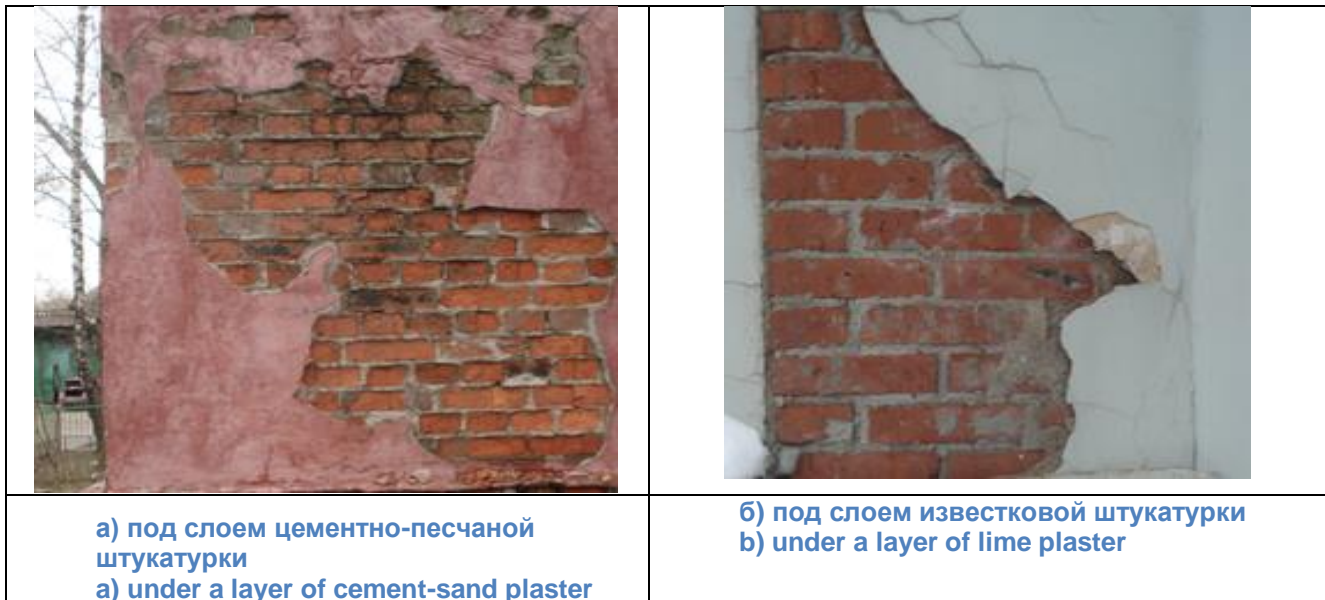


Рис. 3 - Разрушение кладки из полнотелого красного кирпича
Fig. 3 - Destruction of masonry made of solid red bricks

Натурные исследования, некоторые результаты которых приведены на рисунках 2 и 3, ставят ряд вопросов по долговечности кирпичной кладки, которые пока не нашли объяснения у исследователей, но свидетельствуют о том, что количество циклов замораживания – оттаивания конструкции, капиллярный подсос солей из грунта, влияние кислых газов атмосферы не являются основными критериями долговечности. К таким вопросам относятся, например, различные скорости разрушения цементно-песчаного раствора в кирпичной кладке (рисунок 2) и процесс разрушения кирпича при оштукатуривании кирпичной кладки цементно-песчаным раствором и разрушение штукатурного слоя с сохранением материала кирпича при оштукатуривании кирпичной кладки цементно-известковым раствором (рисунок 3). Существует ряд исследований, в которых одной из причин такого разрушения справедливо названы разные прочность и коэффициенты температурного расширения кирпича и кладочного раствора [15]-[18], [27]. Однако не все случаи разрушения кладки можно объяснить с точки зрения этой позиции.

Испытывать керамические материалы на морозостойкость, используя при этом подход периодического замораживания и оттаивания, впервые было предложено российским профессором Н.А. Белелюбским на Международном конгрессе в Мюнхене в 1884 году. Однако сам профессор писал: «Замораживание камней не дает никакого указания на абсолютное сопротивление действию мороза. Значение вышеприведенного исследования только

относительное, так как оно позволяет только узнать, какие из камней скорее всего могут пострадать от действия мороза» [9]. В настоящее время мнение автора исследования материалов на морозостойкость практически забыто. Морозостойкость является единственным параметром, учитываемым строителями и проектировщиками при оценке долговечности материала кирпича.

Автором выдвинута гипотеза, что процесс деструкции материала кирпича можно описать на основании законов физической химии, приняв за основу химическую природу процессов химической коррозии материала стеновой керамики. Такой подход не только позволит более точно и корректно описать процесс деструкции, но и определить долговечность материала кирпича в временных единицах, что и является целью настоящего исследования. При этом политермическое воздействие на материал кирпича приводит к ускорению разрушения материала, ослабленному процессами химической коррозии [10], [11], [13], [14].

Химическая деструкция кирпича и кирпичной кладки описывается многостадийным процессом. На первой стадии процесса в материале кирпича происходит образование щелочей из оксидов щелочных и щелоче-земельных металлов. Щелочь может также поступать в кирпич из цементно-песчаного раствора. В основном это гидроксид кальция, образующийся в цементно-песчаном растворе при протекании процесса выщелачивания [12], [25], [26]. 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 в первую очередь аморфной фазы. При этом происходит полное разрушение материала кирпича до размеров частиц порядка 10^{-5} – 10^{-6} м, так как аморфная составляющая является связующей фазой материала. В процессе деструкции участвует также нехимическая стадия - стадия увлажнения. Задачей научного исследования, описанного в статье, доказать правильность данного подхода к решению задачи оценки долговечности строительной керамики.

2 Метод (Method)

Для теоретического обоснования данного предположения, а также уточнения химических реакций, преимущественно протекающих при химической деструкции материала стеновой керамики, были выполнены термодинамические расчеты. В расчетах были учтены 265 химических реакций, предположительно участвующих в процессе. Расчеты проводились с использованием стандартных термодинамических характеристик веществ с вычислением значения изобарно-изотермического потенциала реакции от температуры [1]-[3]. На основании выполненных расчетов 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 расчеты 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, температуры протекания процесса и, так как в реакции участвуют вещества, находящиеся в разных фазах, то есть жидкость (щелочь) и твердое вещество (алюмосиликаты) - площади поверхности вступающих в реакцию веществ.

Для исследования кинетики процесса были разработаны две методики, подробно описанные в [13]: методика исследования скорости реакций при образовании щелочей в материале кирпича (определение коррозионной активности влаги) и действия щелочей на материал кирпича (определение химической стойкости). Данные методики позволяют ввести новый показатель работы строительной керамики: коэффициент химической деструкции C_d . Вводимый показатель имеет размерность [%/час], что делает возможным его использование в расчете долговечности материала. Методика определения коррозионной активности влаги позволяет получить численные значения скорости образования щелочей при взаимодействии оксидов щелочных и щелоче-земельных металлов, присутствующих в материале кирпича, при его увлажнении.

Описание методик исследования

Подготовка пробы проводилась следующим образом. В исследованиях использовался материал кирпича российского производителя. Проба бралась из трех мест и соединялась в

Zheldakov, D.Yu.

The Brick Material Durability in Brickwork;

2020; AlfaBuild; Volume 15 Article No 1504. doi: 10.34910/ALF.15.4

объединенную пробу, весом не менее 150 г. Пробу измельчалась и просеивалась через сита: с сеткой 02К до полного прохождения, затем через сито с сеткой 018К; с сеткой 05К до полного прохождения, затем через сито с сеткой 045К; с сеткой 1К до полного прохождения, затем через сито с сеткой 09К. Проба измельчалась полностью, так как измельчение части пробы влияет на результат исследований. Оставшиеся на ситах 018К, 045К и 09К зерна пробы отмывались от пыли дистиллированной водой и далее использовались в исследованиях. Зерна, очищенные от пыли, переносили в чистую фарфоровую чашку и высушивали в сушильном шкафу при температуре 105-115 °С до постоянной массы. Сразу после просушки из подготовленной пробы зерен готовились навески по 2 г, взвешенные с погрешностью не более 0,001 г.

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

При подготовке аликвоты навеску материала кирпича помещали в коническую колбу вместимостью 500 мл и приливали 250 мл дистиллированной воды. Колбу выдерживали в течении 0,5, 1, 5 и 25 часов при температурах 22 °С, 60 °С и 100 °С. По окончании времени исследования аликвота передавалась на исследование.

Концентрация ионов, перешедших в водный раствор, определялось масс-спектральным с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионным с индуктивно-связанной плазмой методами [11], [12]. 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 учетом рекомендаций фирм–производителей данного оборудования. Элементы, определяемые в растворе: K; Na; Ca; Mg; Si; Al; S; Fe.

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

Испытания проводились поэтапно. На каждом этапе навеску помещали в коническую колбу вместимостью 500 мл и приливали 250 мл раствор гидроокиси калия. В исследованиях использовался раствор с концентрацией 0,05 н, 0,5 н и 5,0 н. Процесс взаимодействия гидроокиси калия с материалом кирпича изучался при температурах 22 °С, 60 °С и 100 °С. Время взаимодействия материала кирпича с раствором щелочи вбиралось в зависимости от температуры, при которой проводилось исследование и составляло на каждом этапе исследования: один час при температуре процесса 100 °С, три часа при температуре процесса 60 °С и десять суток при температуре процесса равной 22 °С. После каждого этапа исследования раствор щелочи аккуратно сливался, проба промывалась и высушивалась при температуре 105-115 °С. Высушенную пробу сразу после просушки взвешивают на весах с погрешностью измерения не более 0,001 г. Проба после взвешивания возвращалась в колбу. Испытания повторяют до тех пор, пока масса пробы в двух последующих испытаниях будет различаться не более, чем на 0,01 г, то есть 0,5% от начальной массы пробы.

Для описания результатов исследований материала кирпича по приведенным выше методикам, введены следующие показатели:

Химическая стойкость [Chemical resistance] – потеря массы пробы образца на каждом этапе воздействия на него химическими веществами, Cr , [%].

Химическую стойкость керамического материала на каждом этапе испытания, в процентах, вычисляют по формуле:

$$Cr = \frac{m - m_1}{m} 100, [\%]$$

где m_1 - масса пробы керамического материала после испытания, г;

m – начальная масса пробы керамического материала до испытания, г.

Максимальная химическая стойкость (Cr_{max}) - максимальная потеря массы пробы образца при проведении эксперимента, [%]. Максимальная химическая стойкость характеризует количество вещества в пробе материала кирпича, которое не разрушается, или разрушается очень медленно, под действием щелочей.

Коэффициент химической деструкции [Chemical destruction coefficient] C_d : доля пробы, определенная в процентах, которая разрушается в процессе химического воздействия за время, определенное в часах, [%/час]. Коэффициент химической деструкции равен отношению химической стойкости материала к времени, за которое данное значение химической стойкости материала достигнуто.

Коэффициент химической деструкции определяется следующим образом. По результатам определения химической стойкости керамического материала в каждом испытании строится график зависимости химической стойкости от времени воздействия на материал. Из точки пересечения координат строится линия тренда построенного графика. При этом учитывают точки графика, крайняя из которых имеет значение химической стойкости, отличающееся от значения максимальной химической стойкости, не более, чем на 3%. Тангенс угла наклона графика к горизонтальной оси (времени) или коэффициент линейного уравнения линии тренда равен коэффициенту химической деструкции материала (C_d), имеет размерность [%/час] и характеризует скорость процесса химической деструкции материала.

В процессе выполненных исследований были определены зависимость скорости реакции химической коррозии от концентрации щелочи в растворе, скорости реакций образования щелочей при контакте материала кирпича с водой, а также температурные коэффициенты в уравнениях Аррениуса и Вант-Гоффа для данных реакций, значения энергии активации протекания химических реакций, включенных в процесс деструкции материала строительной керамики. Данные результаты позволили разработать метод расчета долговечности в временных единицах.

Разработанный метод расчета долговечности материала строительной керамики при его работе в ограждающей конструкции позволяет на основании результатов исследований, проведенных по описанным выше методикам, определить время, в течении которого материал строительной керамики разрушится полностью.

На первом этапе расчета по результатам исследования коррозионной активности влаги определяется концентрация щелочей в материале кирпича при температуре эксплуатации ограждающей конструкции.

На втором этапе на основании коэффициента химической деструкции определяется скорость деструкции материала кирпича при температуре эксплуатации и концентрации щелочи в материале, определенной на первом этапе.

Условия работы материала в ограждающей конструкции в разработанном методе расчета определяются количеством влаги, проходящем через материал. Этот процесс в расчете учитывается как нехимическая стадия процесса, а увлажнение материала определяется в л/(м²*час).

Определяется лимитирующая стадия процесса деструкции и на основании полученных данных рассчитывается долговечность материала керамики при различных условиях ее эксплуатации.

3 Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Был выполнен анализ долговечности материала стеновой керамики с применением разработанных методик и метода расчета долговечности.

Для изучения были взяты пробы плитки с Церкви Николы Мокрого с колокольной, 1677 г. в г. Ярославль, Россия, (рисунок 4), имеющей прочность на сжатие 76 МПа, кирпича с внутренней несущей стены жилого особняка С.М. Варенцова - Г.Л. Штеккера, 1835 г. в г. Москва, Россия, (рисунок 5) с прочностью на сжатие 19,7 МПа и красного глиняного рядового кирпича российского производства 2013 г. (прочность на сжатие 18,1 МПа).



Рис. 4 - Церковь Николая Мокрого с колокольней, г. Ярославль, 1677 г.
Fig. 4 - Church of St. Nicholas of the Wet with a bell tower, Yaroslavl, 1677



Рис. 5 - Жилой особняк С.М. Варенцова-Г.Л. Штеккера, г. Москва, 1835 г.
Fig. 5 - Residential mansion of S. M. Varentsov-G. L. Shtekker, Moscow, 1835

Результаты исследований химической стойкости материала кирпича приведены на рисунке 6. По графикам можно определить значения химической стойкости материала и максимальной химической стойкости образцов кирпичей, а также коэффициента химической деструкции (C_d). Значения максимальной химической стойкости ($C_{r_{max}}$) для всех проб кирпичей, участвовавших в исследовании близки и составляют 93,0 – 95,0 %.

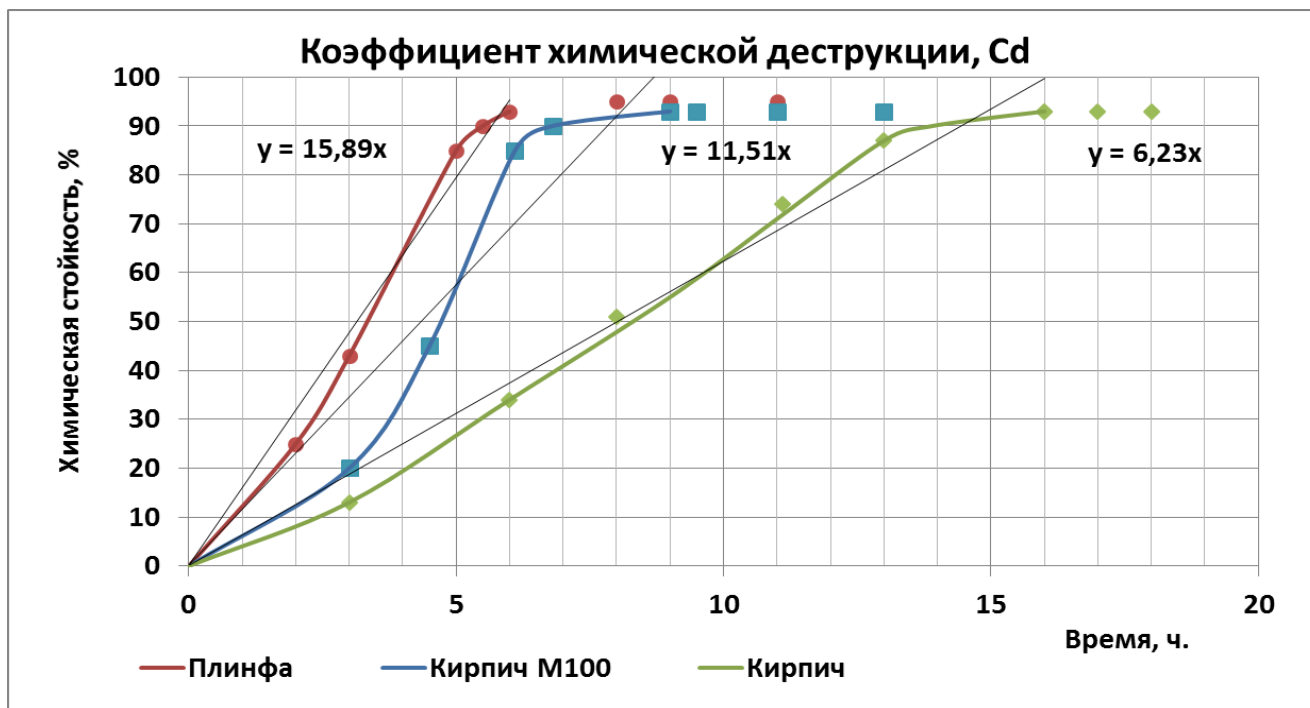


Рис. 6 – Значение химической стойкости, максимальной химической стойкости и коэффициента химической деструкции материала образцов кирпичей
 Fig. 6 - Value of chemical resistance, maximum chemical resistance and coefficient of chemical destruction of the material of brick samples

По результатам эксперимента определены значения коэффициентов химической деструкции проб кирпича. Для плинфы $Cd=15,89$ %/час, для кирпича М100 $Cd=11,51$ %/час, для пробы, взятой из кирпича 1835 года $Cd=6,23$ %/час. По результатам исследований можно сделать важные выводы: коэффициент химической деструкции не имеет корреляции с прочностью на сжатие материала кирпича. Кирпичи 2013 и 1835 годов имеют очень близкие показатели прочности, но очень различающиеся коэффициенты химической деструкции, а плинфа и кирпич 2013 года наоборот – имеют близкие значения коэффициентов химической деструкции и практически в три раза различающиеся значения прочности на сжатие. То есть кирпич может иметь высокую прочность, но обладать низкой долговечностью. И второе - при действии щелочи на материал кирпича разрушению может подвергаться практически весь материал: коэффициент Cr_{max} для материала кирпичей, участвовавших в исследовании, находится в пределах от 92,0 до 95,0 %.

Результаты исследований коррозионной активности влаги в пробах кирпича представлены на гистограмме (рисунок 7). Видно, что процессы образования щелочей в материале кирпича о которых можно судить по концентрации элементов щелочных и щелочноземельных металлов в водной вытяжке существенно различаются. Суммарное количество ионов щелочных и щелочноземельных металлов в водной вытяжке плинфы составляет 10,27 мг/л, кирпича производства 2013 года – 4,80 мг/л, а кирпича 1835 года 1,44 мг/л, то есть в 7,12 раза меньше, чем у плинфы. Таким образом, материал кирпича 1835 года не только имеет большую сопротивляемость к действию щелочей, но и образование щелочей в материале этого кирпича происходит в значительно меньшем количестве.

Интересно отметить, что результаты скорости деструкции материала кирпичей, приведенные на рисунке 6, хорошо коррелируются с количеством ионов кремния и алюминия в водных вытяжках (рисунок 7). То есть чем больше щелочей образуется в материале кирпича при контакте с влагой, тем больше кремния и алюминия поступает в водную вытяжку растворяясь под воздействием щелочей. Данные результаты еще раз подтверждает достоверность и показательность обсуждаемых методов исследования кинетики химических процессов деструкции материала кирпича.

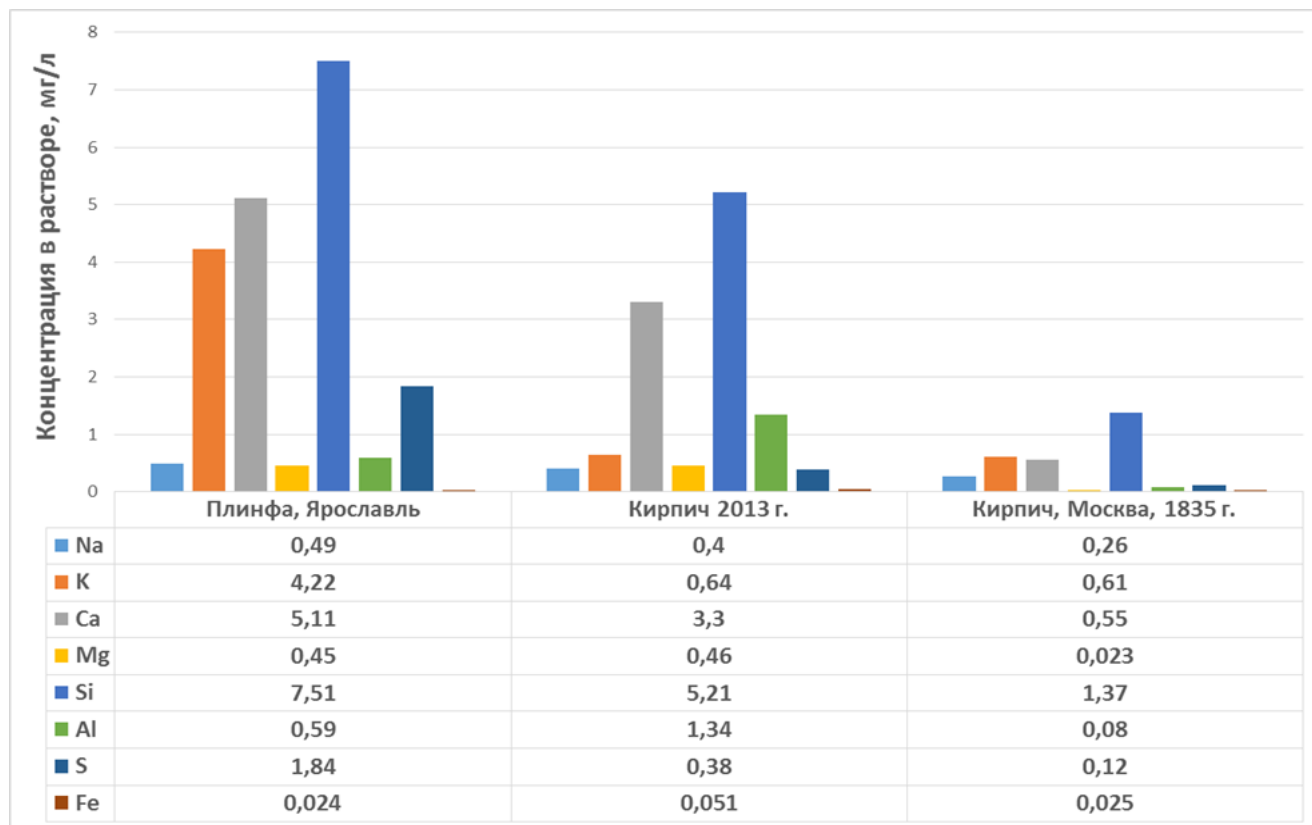


Рис. 7 – Содержание элементов в водной вытяжке проб кирпича

Fig. 7 - Element content in the water extract of brick samples

Были проведены расчеты долговечности исследуемых кирпичей. При условии их одинаковой работы в конструкции, то есть скорости поступления влаги в конструкцию 500 л/(м²*час), это среднее количество влаги для кирпичной наружной стены жилого здания, и принятого коэффициента деструкции равного 10%, расчетная долговечность материала стеновой керамики для исследуемых образцов составит: для плинфы 145 лет, для современного кирпича марки М100 245 лет, для кирпича 1835 года 760 лет.

4 Заключение (Conclusions)

1. Проведены натурные исследования работы материала кирпича в ограждающих конструкциях зданий, возведенных в разные эпохи и в разных климатических зонах. Показано, что морозостойкость материала кирпича не может рассматриваться как определяющий параметр при оценки долговечности работы материала в ограждающих конструкциях.
2. Сформулирована научная гипотеза о возможности описания деструкции материала кирпича на основании процессов химической коррозии. Поставлена цель определить долговечность материала кирпича при его работе в ограждающих конструкциях во временных единицах. Разработан процесс химической деструкции материала кирпича, включающий три стадии: первую нехимическую стадию увлажнения материала, первую химическую стадию – образование щелочей в материале кирпича и вторую химическую – взаимодействие щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы материала.
3. Разработаны методики исследования кинетики протекания химических стадий процесса. Введены показатели процесса деструкции и методики их расчета. Проведены исследования кинетики процесса, которые позволили определить константы скорости реакций образования щелочей в материале и реакций взаимодействия щелочи с аморфной частью материала, коэффициенты в уравнениях Вант-Гоффа и Аррениуса, энергию активации процессов.

4. Исследования кинетики процесса химической деструкции материала кирпича при условии введения в процесс скорости увлажнения материала позволили рассчитать долговечность материала кирпича. Применение разработанной методики демонстрируется на анализе материала трех кирпичей. Результаты расчетов реалистичны. Работы продолжаются. Однако данный метод расчета уже на настоящем уровне его разработки может заменить применяемые в настоящее время оценки долговечности по морозостойкости или по прочности.

References

1. Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu., Selemenev V.F. Raschyot koeffitsientov aktivnosti neobmenno sorbированных yi fixированного электролитов v faze yionoobmennika [A calculation of the activity coefficients in the ionite phase for fixed electrolytes and electrolytes sorbed in the nonexchange mode]. Russian Journal of Physical Chemistry. 2000.12. Pp. 2073-2075.
2. Sukhochev A.S., Tomina E.V., Mittova I.Ya. Termicheskoe okislyenie arsyenida galliya s nanorazmernymi slojami perehodnikh metallov na poverkhnosti [Thermal oxidation of gallium arsenide with transition metal nanolayers on the surface]. Glass Physics and Chemistry. 2008. 6. Pp. 724-741.
3. Krysanova T.A., Kotova D.L., Selemenev V.F., Davydova E.G. Osobennosti gidratsyy askorbynovoy kisloty [Specific features of the hydration of ascorbic acid]. Russian Journal of Physical Chemistry. 2004. 7 Pp. 1156-1158.
4. Ogorodnik, V.M. , Ogorodnik Y.V. Several problems in survey of buildings finished with face brick in Saint-Petersburg. Magazine of Civil Engineering. 2010. 17(7). Pp. 10-13. (rus). DOI: 10.18720/MCE.17.4.
5. Aleksandrovskij, S.V. Dolgovechnost' naruzhnyh ograzhdajushhih konstrukcij.[Durability of external enclosing structures]. NIISF RAASN. 2003. 332 p.
6. Pantileenko, V.N. Jeffektivnyj sposob povyshenija dolgovechnosti stroitel'nyh ob'ektov v arkticheskoy zone.[Effective way to increase the durability of construction objects in the Arctic zone]. Resursy Evropeiskogo Severa. Tekhnologii i ekonomika osvoeniia. 2016. 3. Pp. 38-49. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30508726_12044503.pdf.
7. Avižienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. Fundamental Concepts of Dependability. Research Report No 1145. 2001 URL: <https://www.cs.rutgers.edu/~rmartin/teaching/spring03/cs553/readings/avizienis00.pdf> (date of application: 11.02.2021).
8. Pashinskij, V.A., Sidej, V.N. Metodika ocenivaniya dolgovechnosti stroitel'noj keramiki po kriteriju morozostojkosti. [Method of evaluating the durability of building ceramics by the criterion of frost resistance]. TOGU. Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU. 2015. 3. Pp: 273-279.
9. Beloljubskij, N.A. Odnoobraznoe ispytanie stroitel'nyh materialov. [Monotonous testing of construction materials]. Mjunhen, 1884. Drezden 1887. Sankt-Peterburg: tip. Ministerstva putej soobshhenija (A. Benke), 1888.
10. Zheldakov, D.Y. Brickwork Chemical Corrosion Features. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 459(6). Pp. 62089. DOI:10.1088/1755-1315/459/6/062089. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/459/6/062089> (date of application: 10.02.2021).
11. Zheldakov, D.Y. Chemical Corrosion of Brick Masonry. Process Running. Stroitel'nye Materialy. 2019. 769(4). Pp. 36–43. DOI:10.31659/0585-430x-2019-769-4-36-43. URL: <https://www.journal-cm.ru/index.php/en/journals/2019/all-articles-in-2019/chemical-corrosion-of-brick-masonry-process-running> (date of application: 10.02.2021).
12. Moskvina, V.M., Ivanov, F.M., Alekseev, S.N., Guzeev, E.A. Korrozija betona i zhelezobetona, metody ih zashchity. [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow: Strojizdat. 1980. 536 p.
13. Zheldakov, D. Yu. Metody issledovaniya kinetiki processa himicheskoy korrozii materialov kirpichnoj kladki. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2019. 731(11). Pp. 74-86. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-731-11-74-86.
14. Zheldakov, D.Y. Chemical corrosion of a bricklaying. Problem definition. Stroitel'nye Materialy. 2018. 760(6). Pp. 29–32. DOI:10.31659/0585-430x-2018-760-6-29-32. URL: <https://www.journal-cm.ru/index.php/en/journals/2018/all-articles-in-2018/chemical-corrosion-of-a-bricklaying-problem-definition> (date of application: 10.02.2021).

15. Orlovich, R.B., Nowak, R., Vatin, N.I., Bespalov V.V. Natural oscillations of a rectangular plates with two adjacent edges clamped. Magazine of Civil Engineering. 2018. 82(6). Pp. 95–102. DOI: 10.18720/MCE.82.9.
16. Bespalov, V., Orlovich, R., Zimin, S. Stress-Strain State of Brick Masonry Vault with an Aperture. MATEC Web of Conferences. 2016. 53. Pp. 01009. DOI:10.1051/mateconf/20165301009. URL: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/20165301009> (date of application: 10.02.2021).
17. Franchi, A., Crespi, P., Ronca, P. An in situ diagonal compression test for brick walls with displacement control on the two external layers. Journal for Housing Science. 2014. 38(1). Pp. 37–42. URL: <http://www.housingscience.org/html/publications/pdf/38-1-4.pdf> (date of application: 10.02.2021).
18. Loganina, V.I., Skachkov, Y.P., Lesovik, V.S. Quality control of building materials according to uncertainty of measurement and stability of the technological process of production. Solid State Phenomena. 2020. 299 SSP. Pp. 1161–1165. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1161.
19. Perovskaya, K., Petrina, D., Pikalov, E., Selivanov, O. Polymer waste as a combustible additive for wall ceramics production. E3S Web of Conferences. 2019. 91. Pp. 04007. DOI:10.1051/e3sconf/20199104007. URL: <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20199104007> (date of application: 10.02.2021).
20. Vitkalova, I., Torlova, A., Pikalov, E., Selivanov, O. Development of environmentally safe acid-resistant ceramics using heavy metals containing waste. MATEC Web of Conferences. 2018. 193. Pp. 03035. DOI:10.1051/mateconf/201819303035. URL: <https://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201819303035> (date of application: 10.02.2021).
21. Litvan, G.G. Testing the frost susceptibility of bricks. ZI, Ziegelindustrie International/Brick and Tile Industry International. 1990. 43(9). Pp. 482–486.
22. Litvan, G.G. The mechanism of frost action in concrete - theory and practical implications. Proc. Workshop on Low Temperature Effects on Concrete: 1988-09-5, Sapporo, Hokkaido, Japan. 1998. Pp. 115–134. URL: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=e610feae-89af-4896-bceb-305d3ef112e6> (date of application: 10.02.2021).
23. Fagerlund, G. The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Matériaux et Constructions. 1977. 10(4). Pp. 217–229. DOI:10.1007/BF02478693.
24. Fagerlund, G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Matériaux et Constructions. 1977. 10(4). Pp. 231–253. DOI:10.1007/BF02478694.
25. Andrade, C., Alonso, M. C., Pettersson, K., Somerville, G. and Tuutti, K. The practical assessment of damage due to corrosion. Proceedings of Int. Conf. concrete Across Borders 1994. Danish Concrete Association. 1994. p. 337–350.
26. Sarja, A., Vesikari, E. Durability Design of Concrete Structures: Report of RILEM Technical Committee 130-CSL1996. 93 p. ISBN:0-203-62733-4. URL: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/11122/1/Durability%20Design%20of%20Concrete%20Structures.pdf> (date of application: 10.02.2021).
27. Butterworth, B., Baldwin, L.W. Laboratory test and the durability of brick: The indirect appraisal of durability Trans. of the Bri. Cer. Soc. 1964. 63(11). Pp. 647–661.