

УДК 692.2

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

**THE PREDICTION OF THE CRITICAL DURABILITY  
OF THE EXTERNAL WALLS**

*Д.Ю. ЖЕЛДАКОВ*  
*D.YU. ZHELDAKOV*

(Научно-исследовательский институт строительной физики  
Российской академии архитектуры и строительных наук)  
(Research Institute of Building Physics  
of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)  
E-mail: djeld@mail.ru

*Применение в строительной отрасли многослойных ограждающих конструкций определило разработку нового подхода к процессу химической коррозии материалов. Процессы, вызывающие химическую коррозию, должны рассматриваться только как протекающие в многокомпонентной системе всех материалов, входящих в многослойную конструкцию. В работе приводится классификация процессов химической коррозии, и на ее основе предлагается новый методический подход к расчету предельной долговечности материалов и конструкций.*

*The using of multilayer external walls in the construction industry has determined the development of a new approach to the process of chemical corrosion of materials. Processes causing chemical corrosion should be considered only for the entire system of materials included in the multilayer structure. This paper presents a classification of chemical corrosion processes, and, on it basis, a new methodological approach to the calculation of the critical durability of materials and structures.*

**Ключевые слова:** долговечность, предельная долговечность, скорость деструкции материала, химическая коррозия.

**Keywords:** durability, critical durability, the speed of destruction of the material, chemical corrosion.

В [1] на основании понятия предельной долговечности приводится общее уравнение расчета предельной долговечности материала или конструкции (1): скорость деструкции  $i$ -го параметра материала или изделия является феноменологической функцией, определяемой суммой изменения параметра  $N_i$  под действием независимых сил  $J_i$  в единицу времени. Тогда предельную долговечность по параметру  $i$  можно описать следующим выражением:

$$\Theta_i = \frac{N_i - N_i^H}{W_i} = \frac{N_i - N_i^H}{\sum_{j=1}^k W_{i,j}}, \quad (1)$$

где  $\Theta_i$  – предельная долговечность по параметру  $i$ ;  $N_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) – текущие значения параметров, обеспечивающих нормальное функционирование объекта;  $N_i^H$  – соответствующие нормативные значения параметров, заданные при проектировании объекта;  $W_{i,j}$  – скорость деструкции  $i$ -го параметра материала или изделия под действием независимых сил  $J_i$  в единицу времени.

Для определения предельной долговечности конструкции по параметру прочности можно записать:

$$\Theta = \frac{R-S}{\sum_{j=1}^k W_j} = \frac{R-S}{W_1+W_2+W_3+W_4}, \quad (2)$$

где  $R$  – начальная прочность материала несущей стены, МПа;  $S$  – нормативная нагрузка, действующая на конструкцию несущей стены, МПа;  $W_1, W_2, W_3, W_4$  – скорости деструкции при воздействии независимых процессов замораживания-оттаивания, сушки-увлажнения, химической коррозии и биологической коррозии, МПа/год.

Четыре феноменологические функции скоростей деструкции материала, представленные в знаменателе формулы (2), рассматриваются как независимые, зависящие

только от температуры и влажности материала. Накопленный материал позволяет говорить о зависимости скоростей протекающих реакций политермической деструкции  $W_1$ , скорости деструкции материала в процессе сушки-увлажнения  $W_2$  и скорости процесса химической коррозии  $W_3$ .

Рассмотрим различные формы взаимодействия влаги с материалом. Для этого примем классификацию формы связи влаги с материалом по интенсивности энергии взаимодействия [2], предложенную академиком П.А. Ребиндером. По данной классификации связь влаги с материалом подразделяется на три основные группы: химическая связь, физико-химическая связь и физико-механическая связь.

Химическая связь (связь в точных количественных соотношениях) является сильной связью, вызванной электростатическими силами взаимодействия. Химическая связь, по данной классификации, обуславливает протекание реакций на уровне ионных связей (реакции гидратации) и молекулярных связей (образование кристаллогидратов). Для удобства дальнейшего обсуждения обозначим данные химические процессы индексами 1.1 и 1.2 соответственно. В результате химических реакций воды с материалом тела образуется или новое вещество и вода входит в его состав, или образуется новый кристаллогидрат. Прочность материала определяется характеристиками нового, образовавшегося в процессе химических реакций, вещества.

Физико-химическая связь (связь в различных нестрого определенных соотношениях) определяется П.А. Ребиндером как связь средней интенсивности, обусловленная молекулярным силовым полем. Связь носит адсорбционный характер. По степени интенсивности в данной группе выделяются следующие подгруппы: 2.1 Образование сольватных растворов с участием

ионов материала, переходящих в сольватный раствор, так как энергия образования сольвата больше сил сцепления отдельных ионов вещества. При этом материал тела меняет свои свойства. 2.2 Вода является пластификатором, обуславливающим набухание материала тела вследствие внедрения воды в межмицеллярные пространства с образованием коллоидного раствора. При десорбции и испарении влаги тонкий слой материала, перешедший в коллоидный раствор, не восстанавливает своих прочностных свойств. 2.3 Образование поверхностного мономолекулярного слоя воды. Поверхностный слой и связанные молекулы воды теряют свои свойства.

Физико-механическая связь (удержание воды в неопределенных соотношениях) – энергетически наиболее слабая связь воды с материалом – подразделяется на: 3.1 структурную связь воды с материалом тела с образованием геля (при этом тело и вода меняют свои свойства) и 3.2 механическая связь воды и удержание ее в капиллярах (при этом вода и тело не изменяют своих свойств).

Данная классификация форм связи воды в телах была успешно применена П.А. Ребиндером при изучении поверхностно-активных веществ [3] и для описания процессов сушки и увлажнения академиком А.В. Лыковым [4]. Специфика применения данной классификации ограничивается изучением равновесных систем. При изучении долговечности ограждающих конструкций на большом промежутке времени мы имеем дело с квазистационарными процессами, и применение данной классификации становится неудобным. Так, например, рассмотрим хорошо изученную систему вода – портландцемент. Оксид кальция из гидроалюмосиликатов кальция в присутствии влаги гидратируется и переходит в гидроксид кальция, то есть образуется ионная химическая связь по типу 1.1. При этом в рассматриваемой системе избыточная вода (при ее наличии) с гидроксидом кальция образует сольватный раствор (тип связи 2.1). При изменении температуры кристаллы гидроалюмосиликатов теряют или присоединяют молекулы воды (тип связи

1.2). При наличии в цементе или воде каких-либо примесей схема процесса становится более сложной.

В.М. Москвин для описания и расчета долговечности при протекании процессов химической коррозии бетона предложил выделить три вида коррозии [5]. К первому виду относятся процессы, связанные с растворением компонентов цементного камня водой. Ко второму виду относятся процессы химического взаимодействия компонентов цементного камня с растворами кислот и солей с образованием легкорастворимых или аморфных продуктов реакции. Третий вид коррозии бетона включает процессы, продуктами химической реакции которых являются малорастворимые вещества, что определяет увеличение объема твердой фазы бетона. Данная классификация процессов коррозии нашла широкое признание, однако сам В.М. Москвин в [6] изменил данную классификацию и в качестве основных процессов определил физико-химические, химические и адсорбционные процессы. Это было вызвано тем, что обычно протекает сразу несколько химических процессов разных видов, что в целом затрудняет описание процесса и расчет долговечности материала конструкции по принятой классификации.

В настоящее время требования строительной отрасли обязывают применять многокомпонентные (многослойные) строительные конструкции. Однако при изучении процессов химической коррозии сложилась практика, при которой рассматриваются процессы, протекающие в отдельно взятом материале. Основной стандарт [7], в котором определены технические требования к защите от коррозии бетонных, железобетонных, стальных, алюминиевых, деревянных, каменных и хризотилцементных строительных конструкций зданий и сооружений при воздействии агрессивных сред с температурой от  $-50$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ , рассматривает только воздействие агрессивных сред на данные материалы. При этом строительные конструкции, выполненные из различных материалов, рассматриваются раздельно. Исключение составляет кирпичная кладка, где присутствуют одновременно

вяжущий раствор и кирпич. Однако в пункте 7.1 данного стандарта определяется, что "...оценка степени агрессивного воздействия на каменные конструкции производится отдельно по раствору и кладочному материалу и для конструкции из каменной кладки в целом принимается как для материала, для которого среда является наиболее агрессивной".

Тем не менее, считаем возможным сформулировать следующее утверждение: все строительные материалы, участвующие в многослойной конструкции и имеющие между собой контакт, способны взаимодействовать между собой на уровне химических реакций и физико-химических процессов. Обязательным условием начала процесса взаимодействия является наличие влаги в многокомпонентной системе.

При этом все реакции, протекающие между материалами в многослойной строительной конструкции, можно классифицировать следующим образом:

- реакции основного процесса взаимодействия строительных материалов. Это реакции, которые протекают между строительными материалами при их контакте в обязательном порядке;

- побочные реакции первого типа – реакции не являющиеся основными, которые протекают при взаимодействии материалов в многокомпонентной системе, и этот процесс возможен при наличии каких-либо примесей хотя бы в одном из участвующих в системе материалов;

- побочные реакции второго типа – реакции, протекание процесса которых обуславливается действием внешней среды. К данному типу реакций относятся реакции, связанные с капиллярным подъемом кислотных и щелочных грунтовых вод, а также реакции, возможные при наличии в атмосферном воздухе (например, в воздухе приморских городов) или в воздухе помещений (воздух химических и металлургических цехов) высокой концентрации загрязняющих газов: оксидов азота, оксидов серы, аммиака, хлора и других;

- реакции гидратации и дегидратации продуктов основных и побочных реакций.

При рассмотрении механизма протекания реакций при контакте двух материалов процессы химической коррозии должны рассматриваться именно в порядке, приведенном в классификации, причем возможное ингибирующее или каталитическое действие некоторых побочных процессов на протекание реакций основного процесса должно учитываться только после расчета основных реакций. Это связано с тем, что концентрации веществ в побочных реакциях подвержены сильным колебаниям.

Примером рассмотрения процессов химической коррозии многокомпонентной системы в соответствии с предложенной классификацией может служить система глиняный кирпич – цементно-песчаный раствор. Основным процессом взаимодействия данных строительных материалов описывается следующими реакциями: образование гидроксида кальция из оксида кальция гидроалюмосиликатов цементно-песчаного раствора, поступление раствора гидроксида кальция в материал кирпича и взаимодействие с аморфной структурой кирпича с образованием гидроксида алюминия с дальнейшей его дегидратацией до оксида алюминия и возможным образованием гидратов алюминия: бокситов и гиббсидов. Оксиды, гидроксиды и гидраты алюминия являются конечными продуктами процесса химической коррозии глиняного кирпича, что и приводит к его полному разрушению.

Примером побочных реакций первого типа для данной системы будут реакции образования гидроксида калия (при наличии калия в кристаллах гидроалюмосиликатов цементно-песчаного раствора). При этом скорость реакции образования гидроксида кальция уменьшится, так как скорость протекания побочной реакции образования гидроксида калия выше. Скорость взаимодействия щелочного раствора с аморфной фазой глиняного кирпича увеличится за счет большей активности гидроксида калия.

К побочным реакциям второго типа относится, например, реакция с углекислым газом, при которой гидроокись кальция реагирует с  $\text{CO}_2$  с образованием нерастворимой соли. При этом скорость деструкции цементно-песчаного раствора увеличится

за счет вывода из процесса нерастворимой соли, а скорость разрушения аморфной фазы кирпича уменьшится за счет снижения концентрации гидроксида кальция.

Химические реакции, принимающие участие в процессе, являются реакциями обратимыми. Для сдвига реакции в сторону протекания процесса необходим отвод продуктов реакции. Так как во многих рассматриваемых реакциях продуктом является вода, время ее вывода из системы будет влиять на скорость химического процесса. Во многих случаях, при рассмотрении процессов химической коррозии в ограждающей конструкции, это время испарения влаги. Время протекания процесса с учетом времени вывода продуктов реакции определит время разрушения материала кирпича и цементно-песчаного раствора. Следовательно, получив данные по снижению прочности за выбранный период времени, мы получим скорость разрушения кирпича, раствора или кирпичной кладки в целом. При этом в значение скорости уже будут включены процессы сушки и увлажнения материала, так как эти процессы принимают участие в основных химических реакциях.

Таким образом, скорость разрушения материала в процессе сушки-увлажнения не является независимым параметром, а принимает участие в определении скорости разрушения материала в процессе химической коррозии:

$$W_3 = f(W_2), \quad (3)$$

а (2) с учетом (3) запишется:

$$\Theta = \frac{R-S}{\sum_{j=1}^k W_j} = \frac{R-S}{W_1 + W_3 + W_4}. \quad (4)$$

Скорость материала в результате биологической коррозии и замораживания-оттаивания в работе не рассматривалась.

## ВЫВОДЫ

Предложенная классификация процессов химической коррозии материалов позволила разработать методику изучения схемы химических процессов, протекаю-

щих в многослойных ограждающих конструкциях. Рассмотрение химической деградации материалов в виде основного процесса, протекающего между компонентами системы в присутствии влаги, побочных процессов первого рода, связанных с наличием примесей в самих контактирующих материалах, и второго рода, связанных с влиянием химических веществ окружающей среды, значительно облегчает расчет скоростей процессов деградации.

На основании разработанной методики предложено уточнение в общее уравнение определения предельной долговечности материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Желдаков Д.Ю., Гагарин В.Г. Терминология и общая теория прогнозирования предельной долговечности конструкций // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 2. С.114...118.
2. Ребиндер П.А. О формах связи влаги с материалами в процессах сушки и увлажнения // В кн.: Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельского хозяйства. – Т. 1. – М., 1956.
3. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. – М., 1958.
4. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968.
5. Москвин В.М. Коррозия бетона. – М.: Стройиздат, 1952.
6. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1952.
7. СП 28.13330.2012 СНиП 2.03.11–85. Защита строительных конструкций от коррозии.

## REFERENCES

1. Zheldakov D.Yu., Gagarin V.G. Terminologiya i obshaya teoriya prognozirovaniya predelnoj dolgovечnosti konstrukcij // Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti. – 2017, № 2. S. 114...118.
2. Rebinder P.A. O formah svyazi vlagi s materialami v processah sushki i uvlazhneniya // V kn.: Vsesoyuznoe nauchno-tehnicheskoe soveshanie po intensivatsii processov i uluchsheniyu kachestva materialov pri sushke v osnovnyh otraslyah promyshlennosti i selskogo hozyajstva. – T. 1. – M., 1956.
3. Rebinder P.A. Fiziko-himicheskaya mehanika. – M., 1958.

4. Lykov A. V. Teoriya sushki. – M.: Energiya, 1968.
5. Moskvina V.M. Korroziya betona. – M.: Strojizdat, 1952.
6. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ih zashity. – M.: Strojizdat, 1952.

7. SP 28.13330.2012 SNiP 2.03.11–85. Zashita stroitelnyh konstrukcij ot korrozii.

Рекомендована Ученым советом. Поступила 18.06.18.

---