

УДК 691.042:620.1

В. А. Настоящий, В. Н. Сидей

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ ПО КРИТЕРИЮ ПОТЕРИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

UDC 691.042:620.1

V. A. Nastoyashchy, V. N. Sidei

PROBABILISTIC ESTIMATION OF CONSTRUCTION CERAMICS DURABILITY BASED ON THE FROST RESISTANCE CRITERION USING THE METHOD OF STATISTICAL MODELING

Аннотация

Методика определения гамма-процентного срока службы поверхностного слоя кирпичных стен в определенных климатических условиях эксплуатации базируется на учете экспериментально полученных статистических характеристик показателя морозостойкости строительной керамики, а также случайной изменчивости температуры и влажности атмосферного воздуха. Задача решается путем статистического моделирования случайных процессов накопления повреждений от действия циклов замораживания-оттаивания. Решение сопровождается примерами расчета долговечности керамики в климатических условиях различных регионов Украины.

Ключевые слова:

кирпичные стены, морозостойкость, долговечность.

Abstract

The method for determining gamma-percentage service life of the surface layer of brick walls under certain climatic conditions of operation is based on taking into account experimentally obtained statistical characteristics of the frost-resistance index for construction ceramics, as well as the random variability in temperature and humidity of the atmospheric air. The problem is solved by statistical modeling of random processes of damage accumulation under action of freeze-thaw cycles. The solution is exemplified by calculating the durability of ceramics in the climatic conditions of various regions of Ukraine.

Key words:

brick walls, frost resistance, durability.

Введение

Долговечность кирпичных стен в значительной степени определяется потерей морозостойкости поверхностного слоя при воздействии циклов замораживания-оттаивания на увлажненную керамику. Поскольку этот процесс носит случайный характер, в качестве показателя долговечности избран гамма-процентный срок службы, равный кален-

дарной продолжительности эксплуатации, в течение которой изделие не достигнет предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах. Его также можно считать гарантированным сроком службы изделия с обеспеченностью $\gamma\%$. Гамма-процентный срок службы выражается в календарных годах эксплуатации и соответствует привычным представлениям о планирова-



нии эксплуатации зданий, строительных конструкций и изделий.

Основная часть

В [1], где изложена общая методология оценки долговечности строительных материалов и изделий, предложено определять гамма-процентный срок службы путем сопоставления случайного процесса накопления деструктивного влияния эксплуатационной среды со случайным значением сопротивления материала этому влиянию. Долговечность по критерию потери морозостойкости оценивается предельным неравенством

$$K(t) \leq F, \quad (1)$$

где $K(t)$ – случайный процесс накопления стандартных циклов замораживания-оттаивания; F – случайная величина показателя морозостойкости (количество стандартных циклов, которые может выдержать материал).

Левая часть предельного неравенства (1) учитывает реальные климатические условия эксплуатации строительного материала или изделия. Ее следует подать в форме неубывающего случайного процесса накопления стандартизированной наработки, т. е. количества стандартных циклов замораживания-оттаивания, эквивалентного суммарной величине деструктивного влияния эксплуатационной среды. Сложность оценки стандартизированной наработки заключается в том, что стандартный метод испытаний на морозостойкость [2] базируется на замораживании материала, полностью насыщенного водой, до температуры минус 18 °С, но в реальных условиях эксплуатации поры материала могут быть насыщены не полностью, а температура замораживания – другой.

Анализ метеорологических данных показал, что практически все заморозки на территории Украины происхо-

дят в период с октября по апрель, поэтому именно эти семь месяцев в дальнейшем будем считать зимним периодом и для них определять статистические характеристики количества циклов замораживания-оттаивания и относительной влажности воздуха. По данным метеостанций Украины, приведенным в [3], установлено, что годовое количество циклов замораживания-оттаивания поверхностного слоя кирпичных стен на континентальной территории Украины меняется от 20 до 38. Закон распределения месячного количества циклов можно считать нормальным с коэффициентом вариации, близким к 0,5. С учетом накопления месячных значений в течение зимы стандарт годового количества циклов замораживания-оттаивания меняется в пределах от 4,8 до 7,5 цикла.

Закон распределения степени насыщения пор керамики сорбционной влагой, как и закон распределения влажности атмосферного воздуха, можно считать срезанным нормальным распределением с областью определения $0 \leq w \leq 100$ %. Его среднее значение изменяется по территории Украины от 43 до 55 %, а стандарт для различных метеостанций принимает значения от 13,4 до 15,0 %.

Правая часть предельного неравенства (1) является показателем морозостойкости, выраженным в форме случайной величины количества стандартных циклов замораживания-оттаивания, которые выдерживает материал до разрушения от потери морозостойкости. Статистические характеристики показателя морозостойкости керамики марки F25 получены в [4] по результатам испытаний большого количества образцов стандартным методом [2]. Среднее значение $M_F = 25,0$ цикла, стандарт $S_F = 6,9$ цикла, а коэффициент вариации 0,276. Эти результаты можно обобщить на керамический кирпич других марок, считая математическое ожидание показателя морозостойкости рав-



ным марке по морозостойкости, а коэффициент вариации – 0,3. По результатам испытаний более 400 образцов керамики при различных значениях влажности в [4] установлена зависимость предельного количества циклов замораживания-оттаивания (ресурса керамики) от степени насыщения пор водой $w\%$ и марки керамики по морозостойкости F :

$$k = F \exp[0,2(100 - w)] . \quad (2)$$

Отказ кирпичной стены вследствие потери морозостойкости заключается в разрушении поверхностного слоя кирпича и наступает тогда, когда накопленное количество стандартных циклов замораживания-оттаивания превышает показатель морозостойкости керамики. Решение предельного неравенства (1) сводится к довольно сложным преобразованиям случайных величин, что делает аналитическое решение практически невозможным и побуждает использовать метод статистического моделирования (метод Монте-Карло) [5]. На основании вышеизложенных принципов и исходных данных разработана и реализована в виде программы на QBasic процедура моделирования, которая заключается в следующем.

1. Устанавливается количество реализаций накопления повреждений N , которые будут моделироваться и каждая из которых отражает работу одного образца с конкретным значением показателя морозостойкости F_i . Для выбранной метеостанции вводятся: математическое ожидание M_K и стандарт S_K годового количества циклов замораживания-оттаивания, математическое ожидание M_W и стандарт S_W степени насыщения пор керамики водой.

2. Через известную марку по морозостойкости F устанавливаются статистические характеристики показателя морозостойкости керамики: $M_F = F$, $S_F = 0,3F$.

3. Устанавливается номер реализации $i = 1$; обнуляются текущие значе-

ния срока эксплуатации $T = 0$ и суммарного (накопленного в течение срока эксплуатации) эквивалентного количества стандартных циклов замораживания-оттаивания $K_{ET} = 0$.

4. По характеристикам из п. 2 моделируется нормально распределенная случайная величина показателя морозостойкости i -го образца F_i .

5. Текущее значение срока эксплуатации T увеличивается на 1 год и моделируются независимые нормально распределенные величины фактического годового количества циклов замораживания-оттаивания $K_{ФР} > 0$ (нормально распределенная случайная величина с характеристиками M_K и S_K) и степени насыщения пор керамики $0 < W_P < 100\%$ (нормально распределенная случайная величина с характеристиками M_W и S_W).

6. Вычисляется эквивалентное количество стандартных циклов замораживания-оттаивания в течение текущего года на основе формулы (2), которая в принятых обозначениях имеет вид:

$$K_{EP} = K_{ФР} \cdot \exp(0,2W_P - 20) . \quad (3)$$

7. Вычисляется накопленное количество стандартных циклов замораживания-оттаивания в течение реализованного срока эксплуатации $K_{ET} = K_{ET} + K_{EP}$. Если накопленное количество эквивалентных стандартных циклов не превысило ресурс i -го образца ($K_{ET} < F_i$), происходит переход к п. 5 с целью моделирования следующего года эксплуатации.

8. Если $K_{ET} \geq F_i$, фиксируется потеря морозостойкости i -м образцом. Его срок службы принимается как $T_i = T$, номер реализации увеличивается на единицу и происходит переход к п. 4 (пока не завершится моделирование работы всех N образцов).

9. По завершению моделирования работы N образцов выполняется статистическая обработка сформированной выборки из N сроков службы T_i , в результате которой определяются основные числовые характеристики срока



службы, а также значение срока службы, отвечающие заданным уровням обеспеченности.

Результаты работы описанной программы проиллюстрированы на примере данных метеостанции г. Кропивницкий. На рис. 1 приведены результаты моделирования процесса

накопления стандартных циклов замораживания-оттаивания для трех образцов с маркой по морозостойкости F25, а на рис. 2 изображена гистограмма распределения срока службы этих образцов, построенная по результатам моделирования 10000 реализаций.

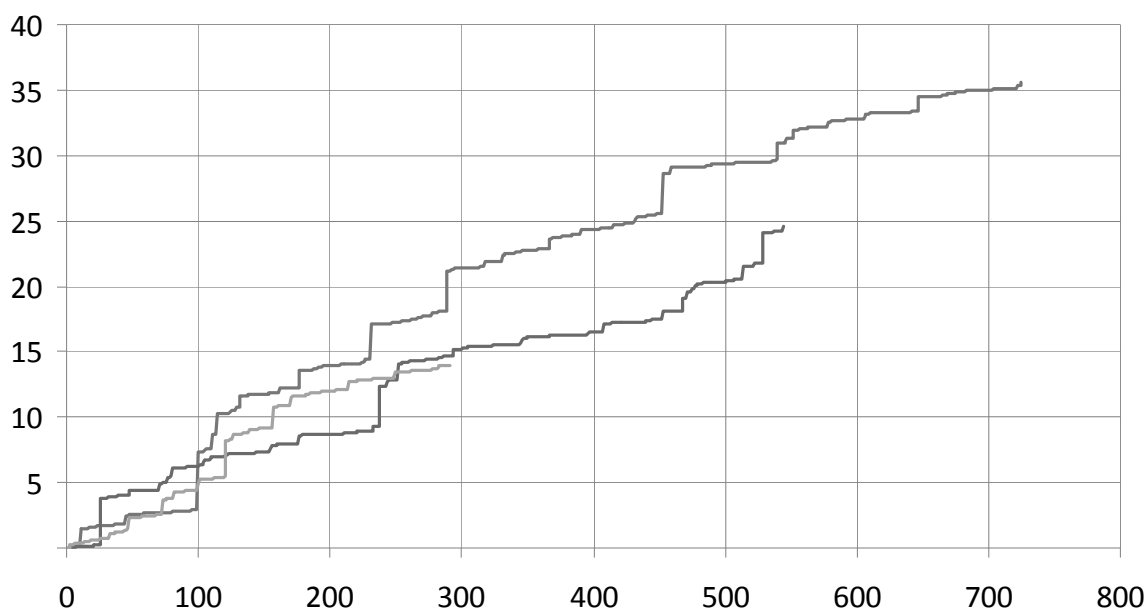


Рис. 1. Процессы накопления стандартных циклов замораживания-оттаивания для образцов марки F25

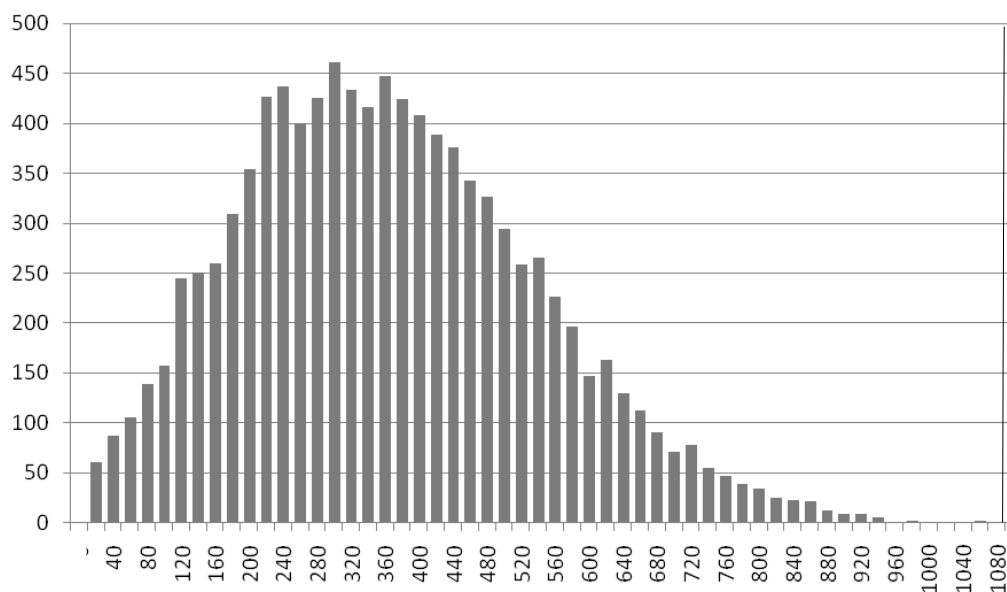


Рис. 2 Гистограмма распределения срока службы образцов керамики марки F25 в условиях г. Кропивницкий



Из рис. 1 видно, что стандартные циклы замораживания-оттаивания накапливаются довольно медленно, что обусловлено незначительным насыщением пор водой и, соответственно, небольшими годовыми эквивалентными количествами стандартных циклов (3). Большие количества «отработанных» циклов (2...5 в год) наблюдаются в те годы, когда в результате моделирования были получены высокие (более 80 %) степени насыщения пор водой.

Изображенное на рис. 2 распределение срока службы 10000 образцов

имеет заметную правостороннюю асимметрию и достаточно широкую область определения от 10 до 1000 лет, но большинство образцов могут служить от 120 до 600 лет.

Числовые характеристики (среднее значение M_T , коэффициент вариации V_T , коэффициент асимметрии A_T), а также гамма-процентные сроки службы T_γ керамического кирпича, полученные в результате статистической обработки смоделированных выборок для климатических условий г. Кропивницкий, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Статистические характеристики сроков службы керамики

Марка по морозостойкости	M_T	V_T	A_T	$T_{0,90}$	$T_{0,95}$	$T_{0,99}$
F15	217,4	0,475	0,513	90	65	26
F25	344,9	0,427	0,412	161	119	59
F35	480,1	0,394	0,345	243	188	95
F50	673,2	0,374	0,293	359	280	151
F75	999,9	0,352	0,235	552	441	248
F100	1329,1	0,341	0,210	758	608	344

Из таблицы видно, что увеличение марки по морозостойкости приводит к практически линейному росту среднего и гамма-процентного срока службы керамики. Уменьшение коэффициента вариации и коэффициента асимметрии распределений срока службы при росте марки кирпича по морозостойкости свидетельствует об уменьшении разброса сроков службы отдельных образцов и о приближении закона распределения срока службы к нормальному. Значительное влияние оказывает также величина обеспеченности γ . При переходе от $\gamma = 0,90$ до $\gamma = 0,99$ гарантированный срок службы снижается примерно вдвое.

Одним из важных аспектов метода Монте-Карло является выбор количества реализаций, необходимого для обеспечения достаточной точности результатов. Самый простой способ реше-

ния этой проблемы – анализ отклонений результатов, полученных при нескольких независимых моделированиях одной и той же задачи. Такой анализ выполнен по результатам моделирования процесса потери морозостойкости керамического кирпича в условиях г. Кропивницкий при количестве моделированных $N = 10000$. Результаты трех независимых моделирований показали, что среднее значение и стандарт показателя морозостойкости отклоняются от заданной марки не более чем на 0,3 %. Определенные по результатам трех независимых моделирований средние сроки службы отличаются не более чем на 0,8 %, гамма-процентные сроки службы при обеспеченности $\gamma = 0,9$ отличаются в пределах 3 %, а при $\gamma = 0,9$ – в пределах 7 %. Такая точность вполне достаточна для решения инженерной задачи анализа долговечности, поэтому



выбранный объем моделирования $N = 10000$ реализаций следует считать достаточным для получения достоверных результатов.

По разработанной программе выполнены расчеты для данных 51 метеостанции Украины, отражающие территориальную изменчивость показателей морозостойкости керамического кирпича. Результатом выполненных расчетов являются зависимости гарантированного срока службы керамики (гамма-процентный срок службы для обеспеченности $\gamma = 0,99$) от ее марки по морозостойкости в климатических условиях каждой из рассмотренных метеостанций Украины. Для подавляющего большинства континентальных метеостанций гарантированный срок службы керамического кирпича марки F25 изменяется от 20 до 100 лет, а для кирпича марки F50, который следует использовать в качестве облицовочного, – от 110 до 240 лет. Для приморских метеостанций гарантированные сроки службы значительно больше и могут достигать 400 лет – для кирпича марки F25 и 900 лет – для кирпича марки F50. Это объясняется теплоаккумулирующим влиянием моря, которое сглаживает колебания температуры и существенно уменьшает количество переходов температуры через ноль.

Повреждения стен в местах систематического замачивания в результате неисправности системы водоотвода с кровли, которые реально наблюдаются в процессе эксплуатации кирпичных зданий, происходят вследствие большой степени насыщения пор водой. Моделирование при $90 < w < 100$ % показало, что срок службы кирпича марок F25 и F50 практически на всей территории Украины составляет 1...3 года. Поэтому непосредственное замачивание стен следует считать аварийным режимом эксплуатации, который является абсолютно недопустимым и который нужно устранять при первых же признаках возникновения такой ситуации.

Описанная методика оценки долговечности керамики позволила разработать рекомендации относительно выбора марки кирпича по морозостойкости с учетом установленного срока эксплуатации и географического положения объекта на территории Украины. Выявлено, что в южных приморских регионах в качестве облицовочного можно использовать кирпич марки F25, а при небольших сроках эксплуатации зданий – даже марки F15.

На территориях северных областей Украины, которые граничат с Республикой Беларусь, в качестве облицовочного рекомендуется использовать керамический кирпич следующих марок по морозостойкости: при сроке эксплуатации $T_{ef} \leq 40$ лет – F25; при $T_{ef} \leq 70$ лет – F35; при $T_{ef} \leq 120$ лет – F50; при $T_{ef} \leq 180$ лет – F75; при больших сроках эксплуатации – F100.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Вероятностная методика оценивания долговечности кирпичных стен по критерию потери морозостойкости, основанная на использовании метода статистического моделирования, обеспечивает определение гамма-процентного срока службы с учетом случайных свойств керамики и температурно-влажностного режима ее эксплуатации.

2. Анализ точности результатов моделирования показал, что для получения достоверных результатов достаточно смоделировать работу 10000 образцов.

3. Полученные результаты указывают на возможность использования в отдельных регионах Украины облицовочного керамического кирпича с марками по морозостойкости, меньшими по сравнению с действующими нормами проектирования.

4. Гарантированные (гамма-процентные) сроки службы поверхностного слоя кирпичных стен, эксплуатируемых в климатических условиях континентальной территории Украины, соответ-



ствуют обычным срокам эксплуатации промышленных и гражданских зданий, а в приморских районах с более мягким климатом могут достигать нескольких сотен лет.

5. По результатам исследования разработаны рекомендации относитель-

но выбора марки кирпича по морозостойкости с учетом установленного срока эксплуатации и географического положения здания. В южных районах Украины можно использовать кирпич более низких марок, чем требуют действующие нормы проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашинський, В. А.** Загальна методика прогнозування довговічності будівельних матеріалів, виробів та конструкцій / В. А. Пашинський, В. В. Шульгін // Галузеве машинобудування, будівництво : зб. наук. пр. – Полтава, 2008. – Вип. 21. – С. 88–95.
2. **ДСТУ Б В.2.7-42-97.** Будівельні матеріали. Методи визначення водопоглинання, густини і морозостійкості будівельних матеріалів і виробів. – Київ : Держком містобудування України, 1997. – 22 с.
3. **Сідей, В. М.** Прогнозування температурно-вологісного режиму цегди за метеорологічними даними / В. М. Сідей, В. А. Пашинський // Наукові нотатки: міжвуз. зб. – Луцьк, 2014. – Вип. 46. – С. 491–496.
4. **Пашинський, В. А.** Вплив вологості на характеристики морозостійкості будівельної кераміки / В. А. Пашинський, В. М. Сідей // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2013. – Вип. 26. – С. 331–337.
5. **Ермаков, С. М.** Курс статистического моделирования / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. – Москва : Наука, 1976. – 320 с.

Статья сдана в редакцию 3 апреля 2017 года

Владислав Анатольевич Настоящий, канд. техн. наук, проф., Кировоградский национальный технический университет. E-mail: brmb73@gmail.com.

Валерий Николаевич Сідей, ассистент, Кировоградский национальный технический университет. E-mail: brmb73@gmail.com.

Vladislav Anatolyovich Nastoyashchy, PhD (Engineering), Prof., Kirovograd National Technical University. E-mail: brmb73@gmail.com.

Valerii Nikolayevich Sidei, assistant lecturer, Kirovograd National Technical University. E-mail: brmb73@gmail.com.

