

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРОЗОСТІЙКОСТІ КЕРАМІКИ

За результатами експериментальних досліджень встановлені залежності показників морозостійкості будівельної кераміки від ступеню насичення пор водою, які є елементом інформаційної бази для імовірнісного прогнозування довговічності цегляних конструкцій за критерієм втрати морозостійкості.

Стан питання та задачі дослідження. Довговічність будівельних матеріалів повинна оцінюватися методами теорії надійності, виходячи з імовірнісного подання характеристик ресурсу та інших властивостей матеріалів. При оцінюванні довговічності за критерієм морозостійкості під ресурсом слід розуміти кількість циклів заморожування-відтавання, яку в певних експлуатаційних умовах може витримати матеріал без істотного погіршення своїх властивостей. Стандартні методи випробувань матеріалів [1] зорієнтовані на контроль заявленої марки за морозостійкістю, рівної середньому значенню ресурсу при умові повного насичення пор матеріалу водою. Фактичні значення ресурсу, їх статистичні характеристики та залежність від ступеню насичення пор водою при стандартних випробуваннях залишаються невідомими.

Методику визначення реальних характеристик морозостійкості будівельних матеріалів можна розробити на основі стандартного методу випробувань [1] та реалізованого в [2] імовірнісного підходу до експериментального визначення характеристик морозостійкості тротуарних плиток. Аналіз [1, 2, 3] показує, що в якості вимірюваного параметра доцільно обрати величину зменшення міцності в результаті циклічного заморожування-відтавання зразків. Випадкову величину ресурсу можна визначити через експериментально встановлену величину зменшення міцності, використовуючи розроблені в теорії імовірності [4] методи визначення функцій випадкових величин, у тому числі метод статистичного моделювання [5].

Метою даної роботи є експериментальне визначення та імовірнісне подання ресурсу будівельної кераміки залежно від ступеню насичення пор водою. Для цього необхідно:

- шляхом випробування досить великої кількості зразків встановити статистичні характеристики границі міцності кераміки для різних значень ступеня насичення пор та кількості циклів випробувань;
- виконати імовірнісний опис залежності границі міцності кераміки від ступеня насичення пор та кількості циклів випробувань у формі випадкового поля;

- за отриманими даними визначити статистичні характеристики ресурсу кераміки (максимально допустимої кількості циклів заморожування-відтавання) при різних ступенях насичення пор і виконати імовірнісний опис ресурсу.

Методика експериментальних досліджень, зорієнтованих на отримання залежності границі міцності кераміки від ступеню насичення пор водою та кількості циклів заморожування-відтавання, викладена в [3, 6]. Випробування проведені на зразках розміром $2 \times 2 \times 2$ см, вирізаних із пустотної облицювальної цегли напівсухого пресування. З метою утримання вологості на заданому рівні зразки, насичені до необхідної вологості, упаковувалися в поліетиленову плівку, а їх заморожування й відтавання відбувалося в повітряному середовищі. Випробувано шість серій по 48 упакованих зразків різної вологості (марки А – F) та контрольна серія марки К із 65 відкритих зразків, які заморожувалися на повітрі й відтавали у воді. Через кожні 10 циклів по 3 зразки серій А – F та 5 зразків серії К знімалися з експерименту й випробувалися на стиск. За результатами випробувань обчислені середні значення й стандарти границі міцності для усіх серій при усіх значеннях кількості циклів (від нуля до 150 циклів). Перед випробуваннями зразки розпаковувалися й зважувалися, що дало можливість уточнити вологість кожного зразка та визначити середні по серії ступені насичення пор водою.

Статистичний аналіз результатів експерименту виконаний з метою встановлення закономірностей зміни показників морозостійкості кераміки залежно від умов випробувань. Значні коливання отриманих середніх значень змусили виконати перевірку за відомим критерієм порівняння середніх значень двох нормально розподілених вибірок [4, 7], результати підтвердили випадковий характер наявних відхилень.

Отримані в експерименті значення стандартних відхилень не вказують на якісь закономірні тенденції їх зміни залежно від серії зразків та кількості циклів випробування на морозостійкість. Перевірка за критерієм Кочрена [7] показала, що на рівні значимості 0,05 усі порівняні дисперсії можна вважати рівними. Це дозволяє осереднити усі дисперсії й прийняти постійне для усіх умов випробувань значення стандартного відхилення границі міцності при стиску $S=4,9$ МПа.

Границя міцності кераміки при стиску представлена у формі випадкового поля з функцією математичного сподівання, отриманою шляхом апроксимації дослідної залежності середніх значень від кількості циклів заморожування-відтавання та ступеню насичення пор водою, та постійним значенням стандарту $S=4,9$ МПа. Закон розподілу ординати цього поля можна вважати нормальним. Графічний аналіз показав, що залежності середніх значень границі міцності від кількості циклів випробувань близькі до лінійних, а залежності від ступеню насичення пор водою мають експоненціальний характер. З фізичного змісту задачі слідують такі граничні умови щодо апроксимуючої функції $R(k, w)$:

- при кількості циклів випробувань $k = 0$ $R(k, w) = R_0 = const$;

- при ступеню насичення пор $w \rightarrow 0$ $R(k, w) \rightarrow R_0 = \text{const}$;
 - при ступеню насичення пор $w = 100\%$ і $k \rightarrow \infty$ $R(k, w) \rightarrow 0$;
 - в області апроксимації функція $R(k, w)$ не повинна мати екстремумів.
- Таким граничним умовам відповідає експоненціальна функція виду

$$R(k, w) = R_0 - C k \exp[B(100 - w)] , \quad (1)$$

де R_0 – середнє значення початкової міцності кераміки
(до проведення випробувань на морозостійкість);

k – кількість циклів заморожування-відтавання;

w – ступінь насичення пор водою (у відсотках);

B, C – коефіцієнти, які обчислюються за методом найменших квадратів.

В результаті апроксимації, виконаної в середовищі табличного процесора EXCEL, отримані значення R_0 і C , підстановка яких до формули (1) дає:

$$R(k, w) = 212 - 1,3 k \exp[-0,2(100 - w)] . \quad (2)$$

З наведеного на рисунку 1 графіка видно, що апроксимуюча залежність (2) відповідає встановленим вище граничним умовам. На більшій частині області визначення функція границі міцності утворює поверхню, близьку до горизонтальної площини на рівні $R_0 = 212$ кГс/см², а при наближенні ступеню насичення пор w до 100% та зростанні кількості циклів заморожування-відтавання k апроксимуюча функція $R(k, w)$ стрімко зменшується.

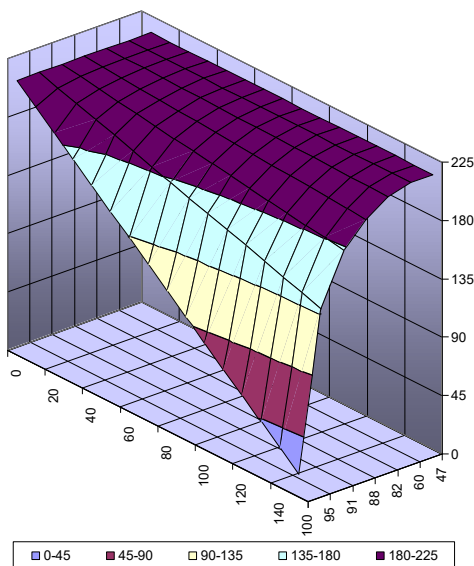


Рис. 1 Апроксимуюча залежність (2) границі міцності при стиску $R(k, w)$ від k і w

Масштаб графіка обрано таким чином, що межа верхньої зони дорівнює допустимій залишковій міцності $0,85 \times 212 = 180 \text{ кГс/см}^2$, а тому вона обмежує поле, що відповідає допустимій області нормальної експлуатації кераміки. З рисунка 1 та формули (2) можна визначити, що при 100% насиченні пор водою зразок у середньому може витримати 25 циклів заморожування-відтавання, що відповідає марці за морозостійкістю F 25, при 95% насиченні – 65 циклів і при 90% насиченні – понад 150 циклів.

Ресурс кераміки (допустима кількість циклів заморожування-відтавання) є випадковою величиною, яку можна визначити через випадкову величину границі міцності та допустимий відсоток її зниження. Середнє значення ресурсу можна виразити в залежності від ступеню насичення пор водою, порівнявши (2) до гранично допустимої залишкової міцності 180 кГс/см^2 :

$$k = 25 \exp[0,2(100 - w)] . \quad (3)$$

Закон розподілу ресурсу отриманий методом статистичного моделювання [5] з використанням програми на Qbasic, яка реалізує такий алгоритм:

1. Задаються значення коефіцієнтів регресії (1) $C=1,3$ та $R_0=212 \text{ кГс/см}^2$, стандартного відхилення міцності $S_R=49 \text{ кГс/см}^2$; кількості точок, за якими побудоване рівняння регресії (2) $n=(16-2) \times 3=42$. Фактична кількість точок зменшена на 2 ступені свободи з урахуванням необхідності обчислення параметра $B=0,2$ у формулі (1) та фіксації значення міцності $R=R_0=\text{const}$ для усіх ступенів насичення w при $k=0$.
2. Обчислюються допустиме значення міцності $R_D=0,85 \times R_0$, дисперсії та коефіцієнти варіації параметрів C , R_0 рівнянь (1), (2) згідно з рекомендаціями [7].
3. Задається й підставляється до рівнянь (1), (2) конкретне значення ступеню насичення пор w , що приводить їх до лінійного виду.
4. За відомим алгоритмом [5] моделюються нормально розподілені випадкові значення коефіцієнтів регресії A , C , з формули (1) обчислюється й запам'ятовується випадкове значення ресурсу.
5. В результаті повторення пункту 4 задану кількість разів (виконувалося по 1000 реалізацій моделі) формується репрезентативна вибірка значень ресурсу й виконується її статистична обробка з побудовою гістограми розподілу, обчисленням середнього значення M_k , стандартного відхилення S_k та коефіцієнта варіації V_k .
6. Задається нове значення w й обчислення повторюються з пункту 3.

Основні статистичні характеристики частини змодельованих вибірок наведені в таблиці 1, де вказані: ступінь насичення пор W , середнє значення M , стандартне відхилення S та коефіцієнт варіації вибірки V , за результатами моделювання, а також середнє значення M за формулою (3).

Таблиця 1

Характеристики розподілів ресурсу кераміки

Ступінь насичення пор, $W\%$	Змодельовані числові характеристики			Середнє значення за (3)
	M_k , циклів	S_k , циклів	V_k	
100	24,7	7,00	0,284	25
98	36,9	10,67	0,289	37
94	83,1	23,24	0,280	83
90	184,1	55,69	0,302	185
86	412,5	118,4	0,287	411
80	1354	402,0	0,297	1365
76	3023	855,3	0,283	3038
70	10286	3002	0,292	10086
60	74786	20960	0,280	74524

Середні значення змодельованих вибірок, які можна вважати умовними марками за морозостійкістю, зростають при зменшенні ступеня насичення пор і узгоджуються з обчисленими за формулою (3). Це свідчить про достовірність результатів виконаного моделювання. Стандартні відхилення ресурсу зростають синхронно до середніх значень, у результаті чого коефіцієнт варіації ресурсу можна вважати постійним і з незначним запасом приблизно рівним 0,3.

Різке зростання ресурсу відбувається при ступенях насичення пор водою, менших за 90%. Це узгоджується з теоретичними уявленнями, відповідно до яких при замерзанні води її об'єм збільшується на 9%. Якщо пори заповнені водою менше, ніж на 90%, в них залишається резервний об'єм, достатній для розширення замерзаючої води. При замерзанні тиск в порах не створюється, внутрішні розтягуючі напруження в матеріалі не виникають і втрата морозостійкості не відбувається.

Гістограми розподілу всіх змодельованих вибірок ресурсу (приклади для ступенів насичення пор $w = 100\%$ і $w = 90\%$ наведені на рисунку 2) мають пагорбоподібну форму із незначною правосторонньою асиметрією.

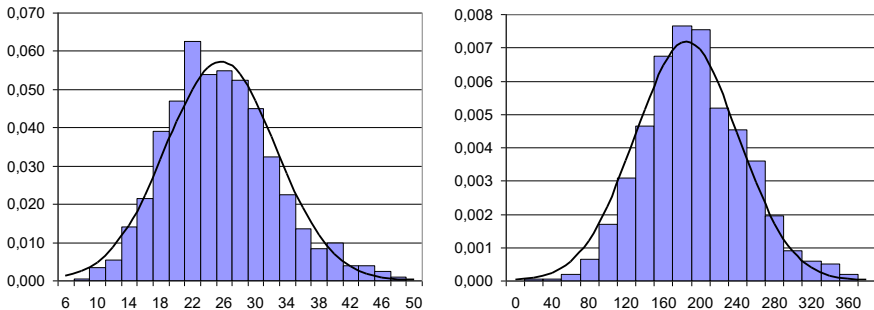


Рис. 2. Гістограми розподілу ресурсу дослідженої кераміки

Перевірка за критерієм Пірсона показала, що на рівнях значимості від 0,05 до 0,01 переважна більшість змодельованих вибірок може бути описана нормальним законом розподілу, густини якого наведені на рисунку 2.

Виконані дослідження дозволяють описати ресурс дослідженої кераміки за критерієм морозостійкості при усіх можливих ступенях насичення пор водою нормально розподіленою випадковою величиною з середнім значенням M за (3), постійним коефіцієнтом варіації $V = 0,3$ та стандартним відхиленням, рівним $S = V \times M$.

Висновки за результатами дослідження:

1. Отримана за результатами експерименту залежність границі міцності кераміки при стиску від кількості циклів заморожування-відтавання та ступеню насичення пор водою представлена у вигляді випадкового поля з нормальним розподілом ординати, постійним значенням стандартного відхилення $S = 4,9$ МПа та функцією математичного сподівання (2).
2. Виходячи з такої моделі випадкового поля границі міцності, шляхом статистичного моделювання отримані розподіли випадкової величини ресурсу дослідженої кераміки для різних значень ступеню насичення пор водою, які можуть описуватися нормальним законом розподілу.
3. Залежність середнього ресурсу від ступеню насичення пор водою описується формулою (3), а його коефіцієнт варіації можна вважати рівним 0,3 при усіх значеннях ступеню насичення пор.
4. Отримані характеристики ресурсу кераміки можуть використовуватися для прогнозування довговічності цегляних стін за критерієм втрати морозостійкості при реальних значеннях вологості цегли.

Література

1. ДСТУ Б В.2.7-42-97. Державний стандарт України. Будівельні матеріали. Методи визначення водопоглинання, густини і морозостійкості будівельних матеріалів і виробів.
2. Пашинський В.А., Шульгін В.В., Сушко В.О., Карюк А.М. Оцінювання довговічності будівельних матеріалів з урахуванням кліматичних впливів // Бетон і железобетон в Украине. – 2004. – № 4. – с. 13-16.
3. Пашинський В.А. Експериментально-статистичні дослідження характеристик морозостійкості керамічної цегли / Пашинський В.А., Сідей В.М. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2013 – Випуск № 49, частина 2. – С. 198-204.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука. - 1969. – 576 с.
5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования.- М.: Наука, 1976.- 320 с.
6. Пашинський В.А., Сідей В.М. Вибір засобів вимірювань для дослідження технічних характеристик будівельних матеріалів // X-я Международная научно-практическая конференция "Состояние современной строительной науки – 2012". Сборник научных трудов. – Полтава, 2012. – С. 80 – 82.
7. Браунли К.А. Статистическая методология в науке и технике. Пер. с англ. М.С.Никулина, под ред. Л.Н.Большева. – М.: Наука. – 1977. – 407 с.