

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МОРОЗОСТІЙКОСТІ КЕРАМІЧНОЇ ЦЕГЛИ

Пашинський В.А., д.т.н., проф., Сідей В.М.

*Кіровоградський національний технічний університет, Україна*

Для розв'язання актуальної задачі прогнозування довговічності цегляних конструкцій за критерієм втрати морозостійкості необхідно представити характеристики морозостійкості кераміки в імовірнісній формі. Стандарти [1, 2] регламентують методику контрольних випробувань, дозволяє встановити відповідність випробуваних зразків заявленій марці за морозостійкістю, але не забезпечує можливості визначення статистичних характеристик показників морозостійкості. Імовірнісний підхід до аналізу морозостійкості дрібнозернистих бетонів (тротуарної плитки) реалізований в роботі [3], але статистичні характеристики показників морозостійкості будівельної кераміки в літературних джерелах не виявлені. Для ймовірнісного подання характеристик морозостійкості та встановлення їх залежностей від впливаючих факторів необхідно випробувати велику кількість зразків у різних умовах випробувань. Методика масових випробувань сотень малих зразків для отримання статистичних характеристик показників морозостійкості, обґрунтована в роботі [4].

**Мета даної роботи** полягає у визначенні та ймовірнісному поданні основних показників морозостійкості будівельної кераміки: процесу зниження міцності внаслідок циклічного заморожування-відтавання та величини ресурсу (кількості циклів заморожування-відтавання) за критерієм втрати морозостійкості.

**Програма експерименту** передбачає можливість отримання статистичних характеристик показників морозостійкості кераміки при різних ступенях насичення пор водою. Усі випробування проводилися на малих зразках розміром 2×2×2 см, вирізаних абразивом із пустотної облицювальної цегли напівсухого пресування. З метою утримання заданої вологості протягом усього часу випробувань зразки, насичені до необхідного рівня вологості, упаковувалися в поліетиленову плівку, а їх заморожування й відтавання відбувалося в повітряному середовищі. Випробувано шість серій (маркування А – F) по 48 упакованих зразків з різною вологістю та контрольна серія (маркування К) із 65 відкритих зразків, які згідно з вимогами [1] заморожувалися на повітрі й відтава-

ли у воді. Упаковані зразки усіх серій випробувалися до 150 циклів заморожування-розморожування, а контрольні – до 120 циклів (далі розпочалося руйнування зразків). Через кожні 10 циклів по 3 зразки серій А – F та 5 зразків серії К знімалися з експерименту й випробувалися на стиск. Розподіл усіх 353 випробуваних та 17 резервних зразків за видами випробувань на морозостійкість наведено в таблиці 1. Окрім того, 50 зразків випробувані на міцність у сухому стані.

Таблиця 1 – Розподіл зразків за видами випробувань

Маркування серії зразків	Насичення пор, %	Кількість зразків у серії	Види і завдання випробувань
K1 – K70	100	70	Відкриті зразки, випробування на міцність по 5 зразків через 10 циклів
A1 – A50	100	50	Упаковані зразки, випробування на міцність по 3 зразки через 10 циклів: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150
B1 – B50	95	50	
C1 – C50	90	50	
D1 – D50	85	50	
E1 – E50	75	50	
F1 – F50	60	50	

**Попередній аналіз точності** оцінювання границі міцності за встановленою кількістю зразків виконаний за методикою [5, 6], яка базується на визначенні стандартного відхилення середнього значення з  $N$  результатів випробувань

$$S_M = S / \sqrt{N} \quad (1)$$

Якщо за даними попереднього експерименту середнє значення границі міцності дорівнює 10-15 МПа, а стандартне відхилення окремого результату  $S \approx 4,0$  МПа, то середнє значення з результатів випробувань 3 – 5 зразків-близнюків оцінюється з імовірною похибкою порядку 20 – 30%, тобто досить грубо. Кінцевим завданням експерименту є отримання апроксимуючої залежності границі міцності від ступеня насичення пор та кількості циклів випробувань. Тоді при оцінюванні точності слід урахувувати загальну кількість результатів випробувань, врахованих при апроксимації, відкориговану шляхом зменшення кількості ступенів свободи на кількість параметрів апроксимуючої залежності. Розрахунки показали, що при використанні апроксимуючих залежностей з кількістю параметрів від 3 до 7 імовірні похибки оціню-

вання границі міцності за апроксимацією складають 3% – 4%. Істотне підвищення точності пояснюється згладжуючим впливом апроксимуючої залежності. Кожне окреме значення, обчислене за апроксимацією, несе в собі інформацію про усі дослідні точки, а тому й має набагато меншу імовірну похибку. Таким чином, заплановану кількість зразків слід вважати достатньою.

**Порядок проведення експерименту** забезпечує отримання залежності границі міцності кераміки при стиску від ступеня насичення пор та кількості циклів випробувань:

1. Шляхом розрізання цегли виготовляються зразки розміром 20×20×20 мм; випадковим чином діляться на серії та маркуються відповідно до таблиці 1.

2. Усі зразки обмірюються за допомогою штангенциркуля з точністю 0,1 мм, висушуються до сталої маси, зважуються з точністю 0,01 г, насичуються водою і зважуються для обчислення волопоглинання.

3. Зразки серій А – F підсушуються до вологості, що відповідає вказаним в таблиці 1 ступеням насичення пор, герметично упаковуються, маркуються та зважуються разом з упаковкою.

4. Перші три зразки серій А – F та п'ять зразків серії К одразу випробуються на стиск, а усі інші закладаються до морозильної камери. У процесі випробувань зразки серій А – F заморожуються і розморожуються на повітрі; зразки серії К заморожуються у повітрі, а розморожуються у воді.

5. Через кожні 10 циклів випробувань оглядаються та зважуються усі зразки, а також відбираються чергові зразки для випробувань на стиск (5 зразків серії К і по 3 зразки серій А – F).

6. Перед випробуваннями на стиск зразки розпаковуються і зважуються для контролю реальної вологості. У випадку повного руйнування зразка його границя міцності вважається рівною нулю.

7. Експеримент завершується після закінчення випробувань на стиск усіх зразків.

**Технічні характеристики** дослідженої кераміки, визначені за результатами випробувань малих зразків, наведені в роботі [4]. Результати цієї роботи показують, що при незначній мінливості середньої густини та водопоглинання границя міцності кераміки має значний статистичний розкид. Він значною мірою обумовлений неоднорідністю кераміки в межах цеглини, виявленою у результаті випробувань малих зразків. Коефіцієнти варіації міцності цілих цеглин повинні бути меншими за рахунок осереднення в межах виробу. Перевірка за критерієм узгодженості Пірсона [5, 7] показала, що усі визначені технічні харак-

теристики можуть бути подані у формі нормально розподілених випадкових величин з числовими характеристиками, наведеними в [4].

**Зміни маси** зразків серій А – F, які випробувалися упакованими, аналізувалися з метою контролю цілісності упаковки. Для цього через кожні 10 циклів випробувань усі зразки зважувалися разом з упаковкою. Аналіз отриманих значень показав, що відхилення маси у середньому по серії не перевищують 0,17% (0,03 г), а найбільше виявлене відхилення дорівнює 0,65% (0,12 г). Такі результати свідчать про відсутність випадків руйнування упаковки, стабільність умов випробувань та коректність проведення експерименту.

**Вологість зразків** у процесі випробувань на морозостійкість задавалася відповідно до запланованих ступенів насичення пор водою. Зразки контрольної серії К заморожувалися відкритими й розморожувалися у воді, що гарантувало 100% насичення пор відповідно до вимог [1] щодо випробувань на морозостійкість.

Упаковані зразки серій А – F змінюють вологість у процесі випробувань внаслідок видалення частини води з пор та її конденсації на внутрішній стороні упаковки. З метою виявлення реальної вологості цих зразків маса кожного з них визначалася перед упакуванням та перед випробуванням на міцність. Результати аналізу початкової (перед упакуванням) та залишкової (перед випробуванням на міцність) вологості зразків серій А – F наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики вологості серій упакованих зразків

Серії зразків	Початкова вологість		Залишкова вологість		Втрата вологості	Ступінь насичення
	М, %	V	М, %	V		
					М, %	М, %
A	16,51	0,057	15,70	0,061	0,82	95,1
B	15,75	0,082	14,97	0,084	0,78	91,3
C	15,06	0,061	14,36	0,069	0,70	87,6
D	14,04	0,083	13,37	0,092	0,67	81,5
E	10,47	0,115	9,69	0,123	0,78	59,1
F	8,29	0,170	7,72	0,188	0,57	47,1

Середні значення початкової та залишкової вологості від серії А до серії F зменшуються, а коефіцієнти варіації зростають від 0,057 до 0,188. Отже, вологість менш насичених зразків водою має більший розкид. Залишкова вологість у середньому на 0,6% – 0,8% менша від початкової, при чому більш насичені зразки серії А втрачають трохи бі-

льше вологи, ніж менш насичені зразки серії F. Це можна пояснити досягненням деякої рівноважної вологості усередині упаковки.

Наведені в таблиці 2 середні в межах кожної серії ступені насичення пор водою визначені як відношення залишкової вологості зразків до їх водопоглинання та виражені у відсотках. З таблиці 2 видно, що фактично отримані значення ступеню насичення пор відрізняються від запланованих в таблиці 1, але утворюють досить систематичний ряд, який повинен достовірно відобразити залежність показників морозостійкості кераміки від ступеню насичення її пор водою. Зразки контрольної серії K, які випробувалися без упаковки, гарантовано мали 100% насичення пор, що дозволяє використати результати їх дослідження для встановлення марки за морозостійкістю відповідно до стандартів [1, 2].

**Границя міцності при стиску** визначалася для зразків усіх серій після різної кількості циклів заморожування-розморожування, що дає можливість проаналізувати її залежність від двох параметрів: ступеню насичення пор водою та кількості циклів випробування. Аналіз отриманих даних показує, що для зразків серій K, A, B, у яких ступінь насичення пор перевищує 90%, відмічається зменшення міцності при зростанні кількості циклів випробувань на морозостійкість. Міцність зразків інших серій з менш насиченими порами практично не зменшується, що свідчить про відсутність втрати морозостійкості.

Для кожної кількості циклів випробувань обчислені середні значення та стандартні відхилення границі міцності. Не дивлячись на значний розкид, наведені значення стандартних відхилень не вказують на закономірні тенденції їх зміни залежно від кількості циклів випробування на морозостійкість. Перевірка гіпотези про випадковий характер розкиду стандартних відхилень за критерієм рівності дисперсій Кочрена [5, 6] підтверджує їх рівність. Тому надалі встановлене єдине значення стандартного відхилення границі міцності кераміки при стиску  $S_R=46 \text{ кГс/см}^2=4,6 \text{ МПа}$ . Значний розкид середніх значень границі міцності пояснюється великими невизначеностями їх обчислення за вибірками обсягом 5 даних, що підтверджено із застосуванням критерію порівняння середніх значень вибірок [7].

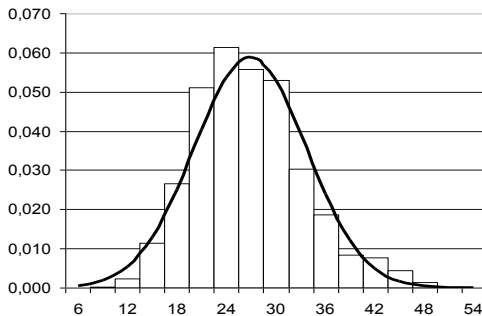
**Марка кераміки за морозостійкістю** визначена в роботі [4] з урахуванням результатів усіх випробувань на міцність зразків контрольної серії, виконаних після різної кількості циклів заморожування-відтавання. В результаті отримана залежність границі міцності від кількості циклів випробування

$$R(k) = 217 - 1,3k \text{ (кГс/см}^2\text{)}, \quad (2)$$

за якою встановлена марка за морозостійкістю F 25, що відповідає 15% зниженню міцності кераміки:

$$F = k = 0,15 \cdot 217 / 130 \quad (3)$$

**Ресурс випробуваної кераміки** (випадкова величина кількості циклів заморожування-розморожування, які вона здатна витримати до 15% зниження міцності) визначений методом статистичного моделювання [8], виходячи із залежності (2) для середнього значення міцності та встановленого вище стандартного відхилення  $S_R=46$  кГс/см<sup>2</sup>. Для цього за рекомендаціями [5] визначені стандартні відхилення коефіцієнтів регресії (2) і в середовищі QBasic реалізована процедура моделювання їх випадкових значень та обчислення ресурсу за формулою (3). Шляхом багатократного (1000 разів) повторення процедури моделювання сформована вибірка значень ресурсу, у результаті статистичної обробки якої збудована гістограма розподілу випадкової величини ресурсу кераміки та визначені її числові характеристики. Результати обчислень, наведені на рисунку 1, вказують на можливість імовірнісного опису ресурсу нормальним законом розподілу з характеристиками, вказаними на рисунку.



Числові характеристики ресурсу при допустимому відсотку зниження міцності  $D = 15\%$  :

$$M = 25,4 \text{ циклу}$$

$$S = 6,85 \text{ циклу}$$

$$V = 0,270$$

Рис. 1 Гістограма розподілу ресурсу дослідженої кераміки (кількості циклів заморожування-розморожування) при 100% насиченні пор водою

Отримані характеристики дозволяють визначити гарантовані значення ресурсу кераміки, що відповідають заданим забезпеченостям  $P = 1 - F(k)$  (ймовірностям того, що реальний ресурс буде більшим) як аргументи функції нормального розподілу. Результати обчислень показують, що при забезпеченості  $P=0,5$  отримуємо середнє значення ресурсу, рівне 25 циклам. Збільшення забезпеченості до  $P=0,9$  зменшує ресурс до 16 циклів, а при подальшому зростанні рівня забезпеченості гарантовані значення ресурсу кераміки стрімко зменшуються. Отже, гарантувати працездатність насиченої водою цегли за критерієм морозостійкості при високих рівнях забезпеченості практично неможливо.

### **Висновки за результатами дослідження:**

1. Розроблена методика експериментально-статистичних досліджень морозостійкості кераміки на малих зразках забезпечує отримання необхідних характеристик при різних ступенях насичення пор водою та кількостях циклів заморожування-розморожування.

2. За результатами експерименту показано, що основні технічні характеристики випробуваної кераміки можуть бути представлені у формі нормально розподілених випадкових величин.

3. Отримана й апроксимована лінійною функцією залежність границі міцності кераміки при стиску від кількості циклів заморожування-розморожування дозволила визначити ресурс випробуваної кераміки за критерієм морозостійкості й подати його у формі нормально розподіленої випадкової величини.

### **Summary**

Over 400 specimens were defined in the result of experimental researches. The main technical characteristics of building ceramics used for durability prediction of wall constructions were presented in the expected form.

### *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. ДСТУ Б В.2.7-61-97. Державний стандарт України. Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні рядові і лицьові. Технічні умови.

3. Пашинський В.А., Шульгін В.В., Сушко В.О., Карюк А.М. Оцінювання довговічності будівельних матеріалів з урахуванням кліматичних впливів // Бетон и железобетон в Украине. – 2004. – № 4. – с. 13-16.

4. Пашинський В.А. Експериментально-статистичні дослідження технічних характеристик будівельних матеріалів / Пашинський В.А., Сідей В.М. // Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : Збірник наукових праць. – Рівне, 2012. – Випуск 24. – С. 24-30.

5. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. - М.: Наука. - 1983. - 416 с.

6. 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.

7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика.- М.: Высшая школа.- 1977.- 479 с.

8. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло.- М.: Наука, 1973.- 312 с.