

Олександр МОЛОДІД,
д-р техн. наук, професор
ORCID: 0000-0001-8781-6579
Сергій БЕНДЕРСЬКИЙ,
аспірант
ORCID: 0009-0003-4818-1840

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ОЦІНКА ВАЖЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ КАМ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ТРІЩИНАМИ

У статті виконано ранжування 10 технологічних чинників, які впливають на відновлення кам'яних конструкцій з тріщинами. Для аналізу використані наступні чинники: геометричні параметри тріщини: ширина розкриття, глибина та довжина; вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний) враховуючи текучість, густину, усадку тощо; стан основи та її підготовка, у тому числі і стан тіла кам'яної кладки та суцільність заповнення швів; порядок ін'єктування (заповнення) тріщини знизу-вгору чи згори-вниз; ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера (в тріщину, під кутом в глб тріщини, під кутом зовні тріщини); вологість конструкції; час та тиск ін'єктування ремонтного розчину; температура навколишнього середовища та конструкції на момент виконання ремонтно-відновлювальних робіт; висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї. На першому етапі експертами виконано оцінку важливості кожного чинника на основі шкали Сааті. Далі за методом списування балів визначено вагомість кожного чинника. Так, встановлено, що найменш значущими, при відновленні кам'яних конструкцій з тріщинами, є такі чинники як вологість конструкції, час та тиск ін'єктування ремонтного розчину, температура навколишнього середовища та конструкції на момент виконання ремонтно-відновлювальних робіт, висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї. Їх сукупна вагомість на технологію відновлення кам'яних конструкцій складає 20 %. Далі для перевірки отриманих результатів встановлення вагомості чинників, що залишилися для аналізу, було виконано розрахунок вектору вагових коефіцієнтів (пріоритетів). У результаті виконано ранжування чинників. Так, порядок ін'єктування (заповнення) тріщини має вагомість 20,9 %; геометричні параметри тріщини – 20,4 %; стан основи та її підготовка – 19,1 %; вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки) – 14,6 %; ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера, – 12,8 %; вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний) – 12,1 %.

Ключові слова: технологічні чинники, ранжування, ремонт, відновлення, кам'яні конструкції, чинники, методи, ін'єктування

Вступ. Тріщини кам'яних конструкцій зовнішніх та внутрішніх стін – є одним з найчастіших видів пошкоджень будівельних конструкцій. Дана ситуація характерна не лише для будівель, що які пошкоджені у наслідок бойових дій (ті, на

які відбувався вплив вибухової хвилі, без влучання вибухових елементів та їх часток), але і ті на які не було впливу бойових дій. Відповідне твердження підтверджується результатами технічного обстеження будівель та споруд, що пошкоджені внаслідок військових дій та аналізу наявних звітів, що проведені спеціалістами КНУБА, зокрема Центру інжинірингу та експертизи [1].

Аналіз публікацій. Забезпечення якісних показників відновлення конструктивних елементів ґрунтується на дотриманні чіткої технологічної послідовності виконання робіт та врахування можливих негативних впливів як під час виконання робіт, так і після них. Тому, для визначення основних чинників, що можуть мати вплив на технологію виконання ремонтно-відновлювальних робіт було виконано аналіз науково-технічної літератури.

Найбільш досліджуваним чинником є вологість кам'яних конструкцій історичних споруд, на що вказує аналіз науково-технічної літератури. Проте вплив вологи на сучасні кам'яні споруди буде відрізнятися, оскільки вони зведені з використанням цементних сумішей, а не вапнякових чи цементно-вапнякових розчинів. Що ж до відкритих джерел досліджень з визначення впливу вологості на цегляні конструкції з цементними мурувальними розчинами можна стверджувати, що їх недостатньо. Окремі дослідження є в роботах M. Reza Maheri [2], D. V. Bompa [3], а також [4, 5] та ДСТУ Б В.2.7-2008 [6].

Питання впливу якості матеріалів кладки на технологію ремонту кам'яних конструкцій експериментальними дослідженнями перевірили S. Pal та A. Yadav [7, 8]. Колектив авторів на чолі з M. R. Islam [9] досліджували міцність неармованої кладки на стиск, на зсув та визначали жорсткість кладки, а S. B. Singh [10] досліджував вплив зміни характеристик матеріалів кам'яної кладки на міцність на стиск кам'яної конструкції.

Менше досліджень присвячено впливу температури на технологію ремонту тріщин кам'яних конструкцій, проте широко представлені дослідження впливу температури на якісні показники підсиленних конструкцій із цегли. F. Ferretti та ін. [11] досліджували вплив температури на цегляну кладку підсиленою композитною сіткою втопленою в цементний клейовий розчин (TRM). Подібні дослідження виконував колектив науковців на чолі з L. Estevan [12]. Окремі дослідження впливу температурних змін на технологію ремонту кам'яної кладки представлено у роботі B. Y. Pekmezci [13], зокрема вплив поперемінного заморожування / відтавання на міцність з'єднання ремонтного розчину на основі вапна армованого скловолокном з основою цегляної конструкції.

Виконаний аналіз науково-технічної літератури щодо питання виокремлення технологічних чинників, які можуть мати вплив як на технологію виконання ремонтно-відновлювальних робіт, так і на якісні фізико-механічні показники відремонтованих конструкцій встановлено, що дане питання не достатньо висвітлено або взагалі відсутнє висвітлення питання досліджень окремих чинників. А саме, відсутні дослідження впливу ширини розкриття тріщин та інших геометричних параметрів (глибина, довжина, просторове положення) на технологію їх ремонту; не у достатній мірі висвітлено питання дослідження вибору виду ремонтного матеріалу залежно від виду кам'яних конструкцій; в обмеженій кількості дані щодо розробки технології ін'єктування кам'яних конструкцій в цілому тощо.

Постановка завдання. У ході наукових досліджень необхідно оцінити важливість технологічних чинників при відновленні кам'яних конструкцій. За можливості відкинути ті чинники, які не чинять суттєвого впливу на технологію.

Виклад основного матеріалу. Технологія відновлення кам'яної кладки ін'єкування є однією із найбільш використовуваних. На нашу думку, суттєвий вплив на технологію ремонтно-відновлювальних робіт на кам'яних конструкціях із тріщинами можуть мати наступні чинники:

m₁ – геометричні параметри тріщини: ширина розкриття, глибина та довжина;
m₂ – вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки);

m₃ – вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний) враховуючи текучість, густину, усадку тощо.

m₄ – стан основи та її підготовка, у тому числі і стан тіла кам'яної кладки та суцільність заповнення швів;

m₅ – порядок ін'єкування (заповнення) тріщини знизу-вгору чи згори-вниз;

m₆ – ін'єкування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера (в тріщину, під кутом в гліб тріщини, під кутом зовні тріщини);

m₇ – вологість конструкції;

m₈ – час та тиск ін'єкування ремонтного розчину;

m₉ – температура навколишнього середовища та конструкції на момент виконання ремонтно-відновлювальних робіт;

m₁₀ – висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї.

Проте наразі відсутні дослідження, які визначають ступінь впливу тих чи інших технологічних чинників на саму технологію відновлення. У зв'язку із цим було вирішено виконати ранжування (встановити значущість) вказаних технологічних чинників з використанням методу експертних оцінок [14, 15]. Суть методу полягає у опитуванні групи експертів, що безпосередньо мають відношення до виконання ремонтно-відновлювальних робіт кам'яних конструкцій способом ін'єкування з метою визначення пріоритетності наведеного переліку технологічних чинників на технологію ремонту. До участі в опитуванні було залучено 10 експертів.

За допомогою методу експертних оцінок було виконано визначення ваги кожного чинника. Для цього експерти оцінили вплив чинників на технологію ремонту тріщин кам'яних конструкцій ін'єкуванням, присвоюючи їм відповідну оцінку. Так, найбільш впливовий чинник (на думку експерта) отримує максимальну оцінку 10, найменш впливовий – 1. Для оцінки значущості чинника було вирішено використовувати психометричну шкалу Сааті (шкала експертного оцінювання пріоритетів або переваг), параметри якої наведено у таблиці 1.

Для визначення результуючого вектору пріоритету наданих технологічних чинників використовували метод приписування балів. А перевіряли розрахунки методом попарного порівняння.

Тож, спершу визначимо вагові коефіцієнти на основі методу приписування балів. Відповідно до аналізу анкет-опитувальників, значення показників за ступенем їх значущості, відповідно до думки експертів, а також вага показників наведено у таблиці 2.

Таблиця 1

Шкала значущості чинника

Ступінь значущості	Визначення	Пояснення
1	Однакова значущість (немає переваг)	Дві дії роблять однаковий внесок у досягнення мети
3	Деяка перевага значущості однієї дії над іншою (слабка значущість)	Існують розуміння на користь переваги однієї з дій, однак ці розуміння недостатньо переконливі
5	Істотна або сильна значущість	Є надійні дані або логічні судження для того, щоб показати перевагу однієї з дій
7	Очевидна або дуже сильна значущість	Переконливе свідчення на користь однієї дії перед іншою
9	Абсолютна значущість	Свідчення на користь переваги однієї дії щодо іншої найвищою мірою переконливі
2, 4, 6, 8	Проміжні значення між сусідніми судженнями	Ситуація, коли необхідне компромісне рішення

Таблиця 2

Ступінь значущості чинників на технологію ін'єктування тріщин кам'яних конструкцій відповідно до експертних оцінок

Експерт	Чинники									
	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅	m ₆	m ₇	m ₈	m ₉	m ₁₀
1	7	5	9	10	8	6	3	4	2	1
2	8	6	9	10	7	5	4	3	1	2
3	10	5	8	9	7	6	3	2	4	3
4	9	7	8	10	5	4	6	4	3	2
5	8	6	10	9	7	5	3	3	2	1
6	9	5	10	8	6	7	4	3	2	2
7	8	6	10	9	5	7	4	2	3	1
8	10	4	8	9	7	6	5	3	1	2
9	8	5	9	10	7	4	6	3	2	2
10	8	5	10	9	6	7	4	2	3	2

За методом приписування балів для подальшого розрахунку було визначено вагу кожного окремого i -го чинника за формулою (1):

$$r_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^m m_{ij}} \quad (1)$$

Загальна вага чинника, враховуючи думку усіх експертів розраховувалася за формулою (2):

$$\sum_{i=1}^n r_j \quad (2)$$

Вага чинника, за методом приписування балів, визначається за формулою (3):

$$w_j = \frac{r_i}{n} \quad (3)$$

Дані, відповідно до розрахунку за формулами наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахунок ваги чинників за методом приписування балів

Експерт	Загальна сума балів	Вага чинників									
	$\sum_{j=1}^m m_{ij}$	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	r_{i4}	r_{i5}	r_{i6}	r_{i7}	r_{i8}	r_{i9}	r_{i10}
1	55	0,13	0,09	0,16	0,18	0,15	0,11	0,05	0,07	0,04	0,02
2	55	0,15	0,11	0,16	0,18	0,13	0,09	0,07	0,05	0,02	0,04
3	57	0,18	0,09	0,14	0,16	0,12	0,11	0,05	0,04	0,07	0,05
4	58	0,16	0,12	0,14	0,17	0,09	0,07	0,10	0,07	0,05	0,03
5	54	0,15	0,11	0,19	0,17	0,13	0,09	0,06	0,06	0,04	0,02
6	56	0,16	0,09	0,18	0,14	0,11	0,13	0,07	0,05	0,04	0,04
7	55	0,15	0,11	0,18	0,16	0,09	0,13	0,07	0,04	0,05	0,02
8	55	0,18	0,07	0,15	0,16	0,13	0,11	0,09	0,05	0,02	0,04
9	56	0,14	0,09	0,16	0,18	0,13	0,07	0,11	0,05	0,04	0,04
10	56	0,14	0,09	0,18	0,16	0,11	0,13	0,07	0,04	0,05	0,04
$\sum_{i=1}^n r_j$		1,53	0,97	1,64	1,67	1,17	1,02	0,75	0,52	0,41	0,32
w_j		0,15	0,10	0,16	0,17	0,12	0,10	0,08	0,05	0,04	0,03

Відповідно до результатів отриманих за методом приписування балів було побудовано діаграму (рис. 1).

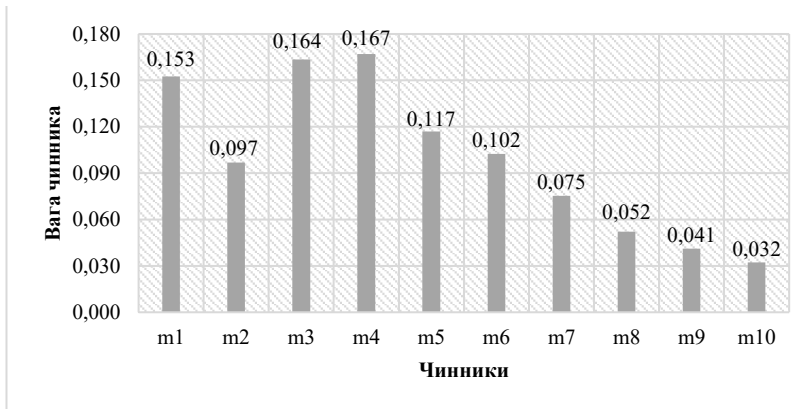


Рис. 1. Діаграма важливості впливу технологічних чинників на технологію відновлення цегляних конструкцій ін'єктуванням за методом приписування балів на основі експертного опитування

Відповідно до результатів розрахунків, встановлено, що найбільш вагомим чинником за методом приписування балів, на думку експертів, є:

1) m_4 – стан основи та її підготовка, у тому числі і стан тіла кам'яної кладки та суцільність швів, $w_4 = 0,167$;

2) m_3 – вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний) враховуючи текучість, густину, усадку тощо, $w_3 = 0,164$;

3) m_1 – геометричні параметри тріщини: ширина розкриття, глибина та довжина, $w_1 = 0,153$;

4) m_5 – порядок ін'єктування (заповнення) тріщини знизу-вгору чи згори-вниз, $w_5 = 0,117$;

5) m_6 – ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера (в тріщину, під кутом в глиб тріщини, під кутом зовні тріщини), $w_6 = 0,102$;

6) m_2 – вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки), $w_6 = 0,097$;

7) m_7 – вологість конструкції, $w_7 = 0,075$;

8) m_8 – час та тиск ін'єктування ремонтного розчину, $w_8 = 0,052$;

9) m_9 – температура навколишнього середовища та конструкції на момент виконання ремонтно-відновлювальних робіт, $w_9 = 0,041$;

10) m_{10} – висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї, $w_{10} = 0,032$.

Далі для перевірки отриманих результатів було виконано розрахунок вектору вагових коефіцієнтів (пріоритетів) за основним методом Сааті. Для цього було застосовано метод попарних порівнянь. На основі даних експертних оцінок (табл. 2) було побудовано матрицю попарних порівнянь A з 6-ма найвпливовішими, на думку експертів, чинниками, а саме:

f_1 – стан основи та її підготовка;

f_2 – вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний);

f_3 – геометричні параметри тріщини;

f_4 – порядок ін'єктування (заповнення) тріщини;

f_5 – вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки);

f_6 – ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера.

Оцінка для окремого чинника була розрахована як середнє арифметичне:

$$f_i = \frac{\sum_{j=1}^{10} m_j}{10} \quad (4)$$

Середні оцінки для кожного критерію:

- $f_1 = (7 + 8 + 10 + 9 + 8 + 9 + 8 + 10 + 8 + 8) / 10 = 85 / 10 = 8,5$ – стан основи та її підготовка;

- $f_2 = (5 + 6 + 5 + 7 + 6 + 5 + 6 + 4 + 5 + 5) / 10 = 54 / 10 = 5,4$ – вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний);

- $f_3 = (9 + 9 + 8 + 8 + 10 + 10 + 10 + 8 + 9 + 10) / 10 = 91 / 10 = 9,1$ – геометричні параметри тріщини;

- $f_4 = (10 + 10 + 9 + 10 + 9 + 8 + 9 + 9 + 10 + 9) / 10 = 93 / 10 = 9,3$ – порядок ін'єктування (заповнення) тріщини;

- $f_5 = (8 + 7 + 7 + 5 + 7 + 6 + 5 + 7 + 7 + 6) / 10 = 65 / 10 = 6,5$ – вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки);

- $f_6 = (6 + 5 + 6 + 4 + 5 + 7 + 7 + 6 + 4 + 7) / 10 = 57 / 10 = 5,7$ – ін’єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера.

Далі будемо матрицю попарного порівняння розміром 6 х 6 за формулою 5:

$$a_{ij} = f_i / f_j \quad (5)$$

де f_i – середня оцінка критерію i .

Для зворотніх елементів розрахунк виконується за формулою:

$$a_{ji} = 1 / a_{ij} \quad (6)$$

Матриця А має наступний вигляд (з урахуванням середніх оцінок).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 8,5/5,4 & 8,5/9,1 & 8,5/9,3 & 8,5/6,5 & 8,5/5,7 \\ 5,4/8,5 & 1 & 5,4/9,1 & 5,4/9,3 & 5,4/6,5 & 5,4/5,7 \\ 9,1/8,5 & 9,1/5,4 & 1 & 9,1/9,3 & 9,1/6,5 & 9,1/5,7 \\ 9,3/8,5 & 9,3/5,4 & 9,3/9,1 & 1 & 9,3/6,5 & 9,3/5,7 \\ 6,5/8,5 & 6,5/5,4 & 6,5/9,1 & 6,5/9,3 & 1 & 6,5/5,7 \\ 5,7/8,5 & 5,7/5,4 & 5,7/9,1 & 5,7/9,3 & 5,7/6,5 & 1 \end{bmatrix}$$

Після розрахунку матриця матиме наступний вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1,574074 & 0,934066 & 0,913978 & 1,307692 & 1,491228 \\ 0,635294 & 1 & 0,5934407 & 0,580645 & 0,830769 & 0,947368 \\ 1,070588 & 1,685185 & 1 & 0,978495 & 1,4 & 1,596491 \\ 1,094118 & 1,722222 & 1,021739 & 1 & 1,430769 & 1,631579 \\ 0,764706 & 1,203704 & 0,714286 & 0,698925 & 1 & 1,140351 \\ 0,670588 & 1,055556 & 0,626374 & 0,612903 & 0,877193 & 1 \end{bmatrix}$$

Далі виконуємо обчислення значення вектору пріоритетів за кожним чинником на основі представленої вище матриці. Відповідні обчислення виконуємо за формулою:

$$q_i = \sqrt[n]{a_{ij} \cdot a_{ij+1} \cdot \dots \cdot a_{in}} \quad (7)$$

тобто, за методом середнього геометричного:

$$q_1 = \sqrt[6]{1 \times 1,574074 \times 0,934066 \times 0,913978 \times 1,307692 \times 1,491228} = 1,203$$

$$q_2 = \sqrt[6]{0,635294 \times 1 \times 0,5934407 \times 0,580645 \times 0,830769 \times 0,947368} = 0,765$$

$$q_3 = \sqrt[6]{1,070588 \times 1,685185 \times 1 \times 0,978495 \times 1,4 \times 1,596491} = 1,288$$

$$q_4 = \sqrt[6]{1,094118 \times 1,722222 \times 1,021739 \times 1 \times 1,430769 \times 1,631579} = 1,317$$

$$q_5 = \sqrt[6]{0,764706 \times 1,203704 \times 0,714286 \times 0,698925 \times 1 \times 1,140351} = 0,92$$

$$q_6 = \sqrt[6]{0,670588 \times 1,055556 \times 0,626374 \times 0,612903 \times 0,877193 \times 1} = 0,807$$

Сума ваги критеріїв рівна: $1,203 + 0,765 + 1,288 + 1,317 + 0,92 + 0,807 = 6,3$.

Результуюча вага критерія визначається за формулою:

$$w_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (8)$$

Виконавши відповідні обчислення, розташуємо чинники та ступенем їх вагомості від найважливішого до найменш важливішого:

f_4 – порядок ін'єктування (заповнення) тріщини, $w_4 = 1,317 / 6,3 = 0,209$ або 20,9 %;

f_3 – геометричні параметри тріщини, $w_3 = 1,288 / 6,3 = 0,204$ або 20,4 %;

f_1 – стан основи та її підготовка, $w_1 = 1,203 / 6,3 = 0,191$ або 19,1 %;

f_5 – вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки), $w_5 = 0,92 / 6,3 = 0,146$ або 14,6 %;

f_6 – ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера, $w_6 = 0,807 / 6,3 = 0,128$ або 12,8 %;

f_2 – вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний),

$w_2 = 0,765 / 6,3 = 0,121$ або 12,1 %.

На основі отриманих результатів побудовано діаграму, що представлена на рис.

2.

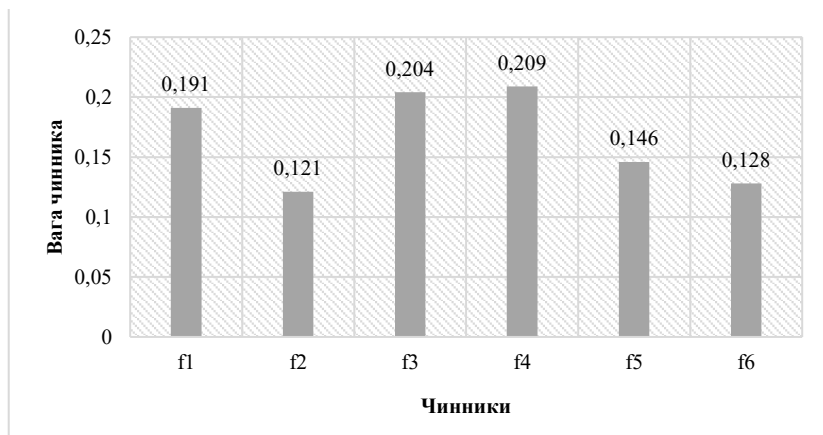


Рис. 2. Діаграма пріоритетності технологічних чинників для технології відновлення цегляних конструкцій ін'єктуванням за методом попарних порівнянь

Отже, отримані значення вектору пріоритетів визначеного за допомогою методу попарних порівнянь підтверджують результати отримані за методом приписування балів.

Відповідно до результатів розрахунків пріоритетності чинників, при плануванні подальших експериментальних досліджень буде враховано отримані значення.

Висновки. Тріщини кам'яних конструкцій зовнішніх та внутрішніх стін – є одним з найчастіших видів пошкоджень будівельних конструкцій. Забезпечення якісних показників відновлення конструктивних елементів ґрунтується на дотриманні чіткої технологічної послідовності виконання робіт та врахування можливих негативних впливів як під час виконання робіт, так і після них. Виконаний аналіз науково-технічної літератури щодо питання виокремлення технологічних чинників, які можуть мати вплив як на технологію виконання ремонтно-відновлювальних робіт, так і на якісні фізико-механічні показники відремонтованих конструкцій встановлено, що дане питання не достатньо висвітлено або взагалі відсутнє висвітлення питання досліджень окремих чинників.

У ході наукових досліджень оцінено важливість технологічних чинників при відновленні кам'яних конструкцій, відкинуто ті чинники, які не чинять суттєвого впливу на технологію.

На первинному етапі досліджень виокремлено 10 чинників, які мають суттєвий вплив на технологію ремонтно-відновлювальних робіт на кам'яних конструкціях із тріщинами. Такими чинниками є геометричні параметри тріщини: ширина розкриття, глибина та довжина; вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки); вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний) враховуючи текучість, густину, усадку тощо; стан основи та її підготовка, у тому числі і стан тіла кам'яної кладки та суцільність заповнення швів; порядок ін'єктування (заповнення) тріщини знизу-вгору чи згори-вниз; ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера (в тріщину, під кутом в гліб тріщини, під кутом зовні тріщини); вологість конструкції; час та тиск ін'єктування ремонтного розчину; температура навколишнього середовища та конструкції на момент виконання ремонтно-відновлювальних робіт; висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї.

Методом експертного оцінювання на основі шкали значущості Сааті побудовано таблицю, яка дозволяє оцінити вагомість кожного окремого чинника. Далі за методом приписування балів на основі отриманих результатів побудовано діаграму важливості впливу технологічних чинників на технологію відновлення цегляних конструкцій ін'єктуванням. Відповідно до результатів розрахунків, встановлено, що найбільш вагомим чинником за методом приписування балів, на думку експертів, є: m_4 – стан основи та її підготовка, у тому числі і стан тіла кам'яної кладки та суцільність швів, $w_4 = 0,167$, а найменш вагомим - m_{10} – висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї, $w_{10} = 0,032$. За результатами даного етапу відкинуто 4 чинники, як такі, що не мають суттєвого впливу на технологію відновлення кам'яних конструкцій з тріщинами. Цими чинниками є:

- 1) m_7 – вологість конструкції, $w_7 = 0,075$;
- 2) m_8 – час та тиск ін'єктування ремонтного розчину, $w_8 = 0,052$;
- 3) m_9 – температура навколишнього середовища та конструкції на момент виконання ремонтно-відновлювальних робіт, $w_9 = 0,041$;
- 4) m_{10} – висота розташування пошкодження (тріщина), доступність до неї, $w_{10} = 0,032$.

На наступному етапі досліджень було виконано розрахунок вектору вагових коефіцієнтів (пріоритетів) за основним методом Сааті для 6-ти найвпливовіших чинників. Відповідні обчислення дозволили розташувати чинники та ступенем їх вагомості від найважливішого до найменш важливішого:

- f_4 – порядок ін'єктування (заповнення) тріщини, $w_4 = 0,209$;
- f_3 – геометричні параметри тріщини, $w_3 = 0,204$;
- f_1 – стан основи та її підготовка, $w_1 = 0,191$;
- f_5 – вид матеріалу конструкції (повнотіла цегла, порожниста цегла, керамічні блоки), $w_5 = 0,146$;
- f_6 – ін'єктування (заповнення) тріщин залежно від способу влаштування пакера, $w_6 = 0,128$;
- f_2 – вид / тип ремонтного розчину (цементний, полімерний), $w_2 = 0,121$.

При плануванні подальших експериментальних досліджень буде враховано отримані значення вагомості технологічних чинників.

Список літератури:

1. Молодід О.С., Плохута Р.О., Молодід О.О., Бендерський С.О. Аналіз технологій ремонту тріщин кам'яних конструкцій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. Вип 54 (1). С. 70–81. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(1\).70-81](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(1).70-81)
2. Maheri M. R., Sherafati M. A. The effects of humidity and other environmental parameters on the shear strength of brick walls: evaluation of field test data. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45, no. 6. P. 941–956. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9809-7> (date of access: 19.11.2025)
3. Bompa D. V., Elghazouli A. Y. Compressive behaviour of fired-clay brick and lime mortar masonry components in dry and wet conditions. *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53, no. 3. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01493-w> (date of access: 19.11.2025)
4. Sathiparan N., Rumeskumar U. Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 17. P. 23–31. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.01.015> (date of access: 19.11.2025)
5. Witzany J., Cejka T., Zigler R. The effect of moisture on significant mechanical characteristics of masonry. *Engineering Structures and Technologies*. 2010. Vol. 2, no. 3. P. 79–85. URL: <https://doi.org/10.3846/skt.2010.11> (date of access: 19.11.2025)
6. ДСТУ Б В.2.7-7:2008. Будівельні матеріали. Вироби бетонні стінові дрібноштучні. Технічні умови (EN 771-3:2003, NEQ). На заміну ДСТУ Б В.2.7-7-94, зі скасуванням ГОСТ 6133-84; чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Київ : МінРегіонбуд України, 2009
7. S. Pal, A. Yadav, K. Saggi. Assessment of shear bond strength of triplets using different joint thicknesses and mortar types. *Materials Research Proceedings*. 2025. Vol. 49. P. 386-395. URL: <https://doi.org/10.21741/9781644903438-39> (date of access: 19.11.2025)
8. Yadav A., Pal S. The impact of mortar thickness and strength on the brick masonry prism: An investigation. *Materials Today: Proceedings*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.035> (date of access: 19.11.2025).
9. Islam, M. R., Hasnat, A., Ahsan, R., Alam, A. T. Strength Comparison of Unreinforced Masonry Wall Made of Different Types of Brick. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2023; Vol. 11(4). P. 159-179. doi: 10.22075/jrce.2023.28394.1711 (date of access: 19.11.2025).
10. Singh S. B., Munjal P. Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry. *Journal of Building Engineering*. 2017. Vol. 9. P. 10–16. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.11.006> (date of access: 19.11.2025).
11. Ferretti F., Canestri M., Mazzotti C. Effect of temperature variations on the bond behavior of FRCM applied to masonry. *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55, no. 6. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02002-x> (date of access: 19.11.2025)
12. Effect of high temperature on textile reinforced Mortar-to-masonry bond / L. Estevan et al. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 393. P. 132123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132123> (date of access: 19.11.2025).
13. Pekmezci B. Y., Arabaci E., Ustundag C. Freeze-Thaw Durability of Lime Based FRCM Systems for Strengthening Historical Masonry. *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 817. P. 174–181. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.817.174> (date of access: 19.11.2025)

14. Купалова Г. Теорія економічного аналізу : навч. посіб. Київ : Знання, 2008. 639 с.

15. Горбенко І., Єсіна М. Методи, методика та результати порівняльного аналізу електронних підписів згідно ДСТУ ISO/IEC 14888-3:2014. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Автоматика, вимірювання та керування.* 2016. № 852. С. 9–22. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/36475> (дата звернення: 19.11.2025)

Oleksandr MOLODID, Serhii BENDERSKYI,

Assessment of the importance of technological factors in the restoration of stone structures with cracks

The article ranks 10 technological factors that influence the restoration of stone structures with cracks. The following factors were used for analysis: geometric parameters of the crack: width, depth and length; type of construction material (solid brick, hollow brick, ceramic blocks); type of repair mortar (cement, polymer) taking into account fluidity, density, shrinkage, etc.; condition of the base and its preparation, including the condition of the masonry body and the integrity of the joint filling; order of injection (filling) of the crack from bottom to top or from top to bottom; injection (filling) of cracks depending on the method of packer installation (into the crack, at an angle into the crack, at an angle outside the crack); moisture content of the structure; time and pressure of injection of the repair solution; ambient and structure temperature at the time of repair and restoration work; height of the damage (crack), accessibility to it. At the first stage, experts assessed the importance of each factor based on the Saati scale. Then, using the scoring method, the weight of each factor was determined. Thus, it has been established that the least significant factors in the restoration of cracked stone structures are the moisture content of the structure, the time and pressure of the repair solution injection, the ambient and structural temperatures at the time of repair and restoration work, the height of the damage (crack), and its accessibility. Their combined weight on the technology of restoring stone structures is 20%. Next, to verify the results obtained in determining the weight of the factors remaining for analysis, a calculation of the vector of weight coefficients (priorities) was performed. As a result, the factors were ranked. Thus, the order of injection (filling) of the crack has a weight of 20.9%; the geometric parameters of the crack – 20.4%; the condition of the base and its preparation – 19.1%; the type of construction material (solid brick, hollow brick, ceramic blocks) – 14.6%; injection (filling) of cracks depending on the method of packer installation – 12.8%; the type of repair mortar (cement, polymer) – 12.1%.

Keywords: *technological factors, ranking, repair, restoration, stone structures, factors, methods, injection*