

## МОДЕЛЬ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У ЦЕГЛЯНІЙ КЛАДЦІ

**О. Кічасва, д.т.н.**

*ORCID ID: 0000-0002-1493-3958*

**П. Фірсов, к.т.н.**

*ORCID ID: 0000-0001-9119-3968*

*Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова*

<https://doi.org/10.31734/architecture2020.21.047>

### **Кічасва О., Фірсов П. Модель накопичення пошкоджень у цегляній кладці**

Один із основних методів визначення залишкового ресурсу будівлі – дослідження змін стану будівельних конструкцій житлового та громадського фонду у процесі його експлуатації. Серед необхідних параметрів, які доцільно фіксувати: ширина й довжина розкриття тріщин, щільність розповсюдження тріщин (для зовнішніх конструкцій), характеристики міцності матеріалу, деформації (прогини, переміщення), корозія металевих конструкцій тощо.

Критерієм технічного стану елемента з цегли слугує сукупність числових параметрів тріщин у матеріалі (ширина розкриття тріщин, довжина тріщин, щільність розповсюдження тріщин). Сукупність цих числових параметрів – кількісна інтегральна характеристика процесу деградації.

Моделі надійності елемента за тріщиностійкістю залежно від часу експлуатації формуємо як пошук імовірності неперевищення граничного стану за контрольованим параметром, після чого можливо визначити ймовірність неперевищення за узагальненим параметром. Під узагальненим параметром треба розуміти такий критерій, який визначає ступінь робочої спроможності конструкції (системи) за кількома контрольованими параметрами.

Наведено таблиці значень параметрів деградації, ґрунтуючись на нормативних даних і результатах експериментальних досліджень. Ці дані можна використовувати у подальших дослідженнях і розрахунках.

Подано алгоритм для виконання завдання з визначення залишкового ресурсу конструкцій. Основні позиції такого алгоритму: визначення законів розподілу параметрів деградації та їхніх статистичних характеристик; визначення відносних значень визначальних параметрів та оцінки значущості цього параметра для оцінки стану конструкції за допомогою вагових коефіцієнтів, обчислення узагальненого параметра, який визначає ступінь робочої спроможності конструкції за кількома контрольованими параметрами. Визначено залежність деградації від часу, стан конструкцій і залишковий ресурс.

**Ключові слова:** накопичення пошкоджень, феноменологічна модель, узагальнений параметр, вагові коефіцієнти, процес деградації.

### **Kichaieva O., Firsov P. Model of damages accumulation in the masonry**

One of the main methods for determining the residual resource of a building is to study changes of conditions of the building structures of civil and public funds in the course of its exploitation. The necessary parameters, which are proposed to be fixed, include: crack width expansion, their length, crack spread density (for external structures), material strength characteristics, deformation (deflections, displacement), corrosion of metal structures, etc.

As a basic hypothesis for the phenomenological model, it is proposed to take a complex of numerical parameters of cracks in a material (width of crack expansion, crack length, crack spread density) as the criterion of the brick element technical condition. A complex of numerical data parameters is a quantitative integral characteristic of the degradation process.

The reliability models of the element for fracture toughness, depending on the time of operation, are formulated as a search for the probability of limit state non-exceedance by the controlled parameter, after which it is possible to determine the probability of non-exceedance by the generalized parameter. A generic parameter is a criterion that determines the degree of a structure (system) operation capacity by several controlled parameters.

Also, the tables of degradation parameters values, based on normative data and results of experimental research, are given. This data can be used in further research and calculations.

The third part of the article presents an algorithm for solving the problem of determining the structures residual life. The main points of this algorithm are: determination of distribution laws of degradation parameters and their statistical characteristics; determination of the relative values of the determining parameters; determination of the significance estimation of this parameter for the further estimation of the structure condition, using weight coefficients; calculation of a generalized parameter that determines the construction operation capacity degree on several controlled parameters. Next, we determine the dependence of degradation on time and determine the structures condition and residual life.

**Key words:** damages accumulation, phenomenological model, generalized parameter, weight coefficients, degradation process.

**Постановка проблеми.** Дослідження змін стану будівельних конструкцій житлового та громадського фонду у процесі його експлуатації є одним з основних методів визначення залишкового ресурсу будівлі. Збір статистичних даних про зміни стану конструкцій у часі дає змогу отримати закони розподілу значень параметрів, що характеризують їхній стан, а також узагальнити залежності зміни параметрів, які можна використовувати для прогнозування терміну служби аналогічних конструкцій. До необхідних параметрів, які треба фіксувати, належать: ширина й довжина розкриття тріщин, щільність розповсюдження тріщин (для зовнішніх конструкцій), характеристики міцності матеріалу, деформації (прогини, переміщення), корозія металевих конструкцій тощо.

Серед передумов застосування теорії надійності є збір, систематизація й аналіз статистичних даних стосовно того чи іншого аспекту роботи будівельних конструкцій. Не всі експлуатаційні чинники можливо відтворити в лабораторних умовах, через що їх можна вивчити тільки на будівлях, що експлуатуються (спорудах, конструкціях). Варто зазначити, що донині немає матеріалів, які б пов'язували стан цегляних стін експлуатованої будівлі зі статистичним аналізом наявних пошкоджень при знаходженні законів розподілу параметрів, що характеризують стан зазначених конструкцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки несучі конструктивні системи будівель проєктуються здебільшого як невідновлювані, показником надійності за міцністю цих систем та їхніх елементів можна вважати ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого терміну служби. Тому для розрахунків надійності системи необхідний структурний аналіз конструктивної системи, метою якого є виявлення елементів, які впливають на надійність системи та їхній взаємозв'язок із надійністю.

Сучасна теорія надійності складних технічних систем дає змогу отримати кількісну оцінку надійності та безпеки будівельних конструкцій і споруд. Теорія надійності стала бурхливо розвиватися після впровадження методу граничних станів. Прикладні задачі теорії надійності розглянуто у працях Г. Аугусті, А. Баратта [1], Б. Беляєва, Ф. Кашиаті, Б. Кочеткова, Б. Макарова, А. Перельмутера [2], М. Складнева [3], Б. Снаркиса, Л. Авірома [4], М. Краковського [5], О. Кудзиса, О. Личова [6], В. Райзера [7], В. Чиркова [8].

В Україні варто виокремити праці А. Бамбури, А. Барашикова [9], О. Вайнберга [10], Ю. Винникова, О. Воскобійник [11], І. Коваленка [12], А. Лантуха-Лященко [13], А. Махінька, В. Пашинського [14], С. Пичугіна [15], О. Семка [16], Д. Стефанишина, С. Усаковського [17], О. Школи [18] та ін.

**Постановка завдання.** Наше завдання – створення сучасної моделі накопичення пошкоджень у цегляній кладці.

**Виклад основного матеріалу.** Гіпотезу для запропонованої феноменологічної моделі можна сформулювати так: критерієм технічного стану елемента з цегли є сукупність числових параметрів тріщин у матеріалі: ширини розкриття тріщин, довжини тріщин, щільності розповсюдження тріщин. Сукупність цих числових параметрів – кількісна інтегральна характеристика процесу деградації.

Побудову моделі надійності елемента за тріщиностійкістю залежно від часу експлуатації можна сформулювати як пошук імовірності неперевищення граничного стану за контрольованим параметром, після чого визначити ймовірність неперевищення за узагальненим параметром. Під узагальненим параметром треба розуміти такий критерій, який визначає ступінь робочої здатності конструкції (системи) за кількома контрольованими параметрами.

Запишемо основні положення запропонованої моделі:

1) за параметром ширини розкриття тріщин  $w_k$ :

$$p_{f1}(t_{ef}) = Prob\{w_k^{cr} - w_k(t) \geq 0\}; \quad (1)$$

2) за параметром довжини тріщин  $l$ :

$$p_{f2}(T_{ef}) = Prob\{l_k^{cr} - l_k(t) \geq 0\}; \quad (2)$$

3) за параметром щільності тріщин  $d_k$ :

$$p_{f3}(T_{ef}) = Prob\{d_k^{cr} - d_k(t) \geq 0\}. \quad (3)$$

Умову граничного стану запишемо так:

- за параметром ширини розкриття тріщин:

$$w_k(t) \leq w_k^{cr}; \quad (4)$$

- за параметром довжини тріщин:

$$l_k(t) \leq l_k^{cr}; \quad (5)$$

- за параметром щільності тріщин:

$$d_k(t) \leq d_k^{cr}. \quad (6)$$

При цьому  $w_k, l_k, d_k$  – відповідно значення ширини, довжини та щільності тріщин, що зале-

жать від рівня напруг  $N/N_u$ , де  $N$  – величина навантаження, що прикладається;  $N_u$  – навантаження руйнування,  $T_{ef}$  – встановлений термін експлуатації будівельного об’єкта, роки;  $t$  – час, роки;  $w_k^{cr}, l_k^{cr}, d_k^{cr}$  – відповідно максимально допустимі значення ширини, довжини та щільності тріщин.

Узагальнений параметр запишемо у вигляді:

$$P_{\Sigma}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n k_i [Par_i(t)]}{\sum_{i=1}^n k_i}, \quad (7)$$

де  $k_i$  – вагові коефіцієнти;  $Par_i(t)$  – відносні значення параметрів, які визначають за формулою:

$$Par_i(t) = \frac{[P_i(t) - P_u]}{(P_n - P_u)}, \quad (8)$$

де  $P_u$  – гранично допустиме значення параметра;  $P_n$  – нормативне значення параметра;  $P_i(t)$  – виміряні значення параметра, що відповідають напрацюванню  $t$ .

Гранично допустимі й нормативні значення ширини розкриття тріщин, довжини тріщин і щільності тріщин.

Прийняті у формулюваннях моделі надійності (1–3) – критична ширина розкриття тріщин, довжина тріщин і щільність тріщин – умова досягнення граничного стану за тріщиностійкістю,

але досить складне встановлення обґрунтованих значень цих величин.

Є чимало експериментальних досліджень тріщиностійкості залізобетонних конструкцій. Найвідоміші – модель *CEB-FIP Model Code 1990*, прийнята в Єврокодів 2, і модель Р. Фроша (R.J. Frosch) – у нормативах США. У вітчизняній методології аналізу тріщиностійкості нормативною за розрахунку залізобетонних елементів є теорія В.І. Мурашева.

Щодо встановлення обґрунтованих достовірних значень параметрів деградації для цегляних конструкцій (ширина розкриття тріщин, довжина і щільність тріщин), то такі дані невідомі або є тільки експертні оцінки. У ДБН В.2.6-162:2010 «Кам’яні та армокам’яні конструкції» [24] не наведено положень розрахунку з розкриття тріщин і даних щодо максимально допустимих параметрів тріщиноутворення. У Посібнику з проектування кам’яних і армокам’яних конструкцій (до СНиП П-22-81) подано таблицю для температурно-усадкових тріщин для експлуатованих будівель під час кладок усіх видів. Застосуємо її до неармованих конструкцій в умовах нормального температурно-вологісного режиму (табл. 1).

Складемо таблицю значень параметрів деградації, грунтуючись на нормативних даних (табл. 2, 3) і результатах власних експериментальних досліджень, поданих у [19].

Таблиця 1

**Допустиме розкриття температурно-усадкових тріщин, мм, у неармованих кладках усіх видів у період експлуатації будівель**

Конструкції	Значення, мм
Несучі стовпи і простінки. Кладка стін, пілястрів у місцях обпирання великопрольотних ( $l \geq 6$ м) ферм, балок, прогонів тощо	не допускаються
Поперечні й поздовжні стіни в місцях обпирання перекриттів	max 1,5
Суцільні (без прорізів) ділянки стін завдовжки 3 м і більше; міжвіконні пояси, цоколі, фронтони	max 2

Таблиця 2

**Параметри деградації для цегляних стовпів (категорія технічного стану «3» – непридатний до нормальної експлуатації)**

Ширина розкриття тріщин, мм	Довжина тріщин, м	Щільність тріщин, м/м <sup>2</sup>
<b>Гранично допустимі значення</b>		
3	чотири ряди кладки	0,2
<b>Нормативні значення</b>		
0	0	0

**Параметри деградації для цегляних стін (категорія технічного стану «3» – непридатний до нормальної експлуатації)**

Ширина розкриття тріщин, мм	Довжина тріщин, м	Щільність тріщин, м/м <sup>2</sup>
<b>Гранично допустимі значення</b>		
5	чотири ряди кладки	1,2
<b>Нормативні значення</b>		
2	два ряди кладки	0,15

Пропонуємо алгоритм для виконання завдання з визначення залишкового ресурсу конструкцій.

1) Визначення законів розподілу параметрів деградації та їхні статистичні характеристики.

2) Визначення відносних значень параметрів за формулою (8).

3) Оцінка значущості такого параметра для аналізу стану конструкції за допомогою вагових коефіцієнтів, які характеризують вплив кожного параметра на робочу спроможність конструкції (питома вага параметра):

$$k_i = \frac{P_i}{\sum P_i}, \quad (9)$$

де  $P_i$  – імовірність настання відмови за  $i$ -м параметром, яку обчислюють за допомогою інтегральної функції:

$$P(\alpha < x < \beta) = \Phi\left[\frac{(\beta - m)}{\sigma}\right] - \Phi\left[\frac{(\alpha - m)}{\sigma}\right], \quad (10)$$

При цьому  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx$  – функція

Лапласа.

У формулі (10)  $m$  і  $\sigma$  – відповідно математичне очікування й середньоквадратичне відхилення значень розглянутого параметра.

Умовами визначення вагових коефіцієнтів є такі:  $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ ;  $0 < k_i < 1$ .

Ці коефіцієнти визначаються на основі даних про частоту виникнення відмов конструкції через досягнення цим параметром свого граничного значення.

4) За формулою (8) обчислюють узагальнений параметр, який визначає ступінь робочої спроможності конструкції за кількома контрольованими параметрами: ширина розкриття тріщин, довжина тріщин, щільність розповсюдження тріщин.

5) Приймаємо лінійну залежність деградації від часу:

$$F(m) = P(t_n) + \Delta P_{n-1} a, \quad (11)$$

де  $a$  – крок прогнозування.

6) Визначаємо стан конструкцій та залишковий ресурс.

**Висновки.** Запропоновано феноменологічну модель накопичення пошкоджень у цегляній кладці та параметри деградації для цегляних стін і стовпів.

#### Бібліографічний список

1. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании / пер. с англ. Ю.Д. Сухова. Москва: Стройиздат, 1988. 584 с.
2. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Москва: Издательство ассоциации строительных вузов, 2007. 185 с.
3. Складнев Н. Н. О методических принципах вероятностного расчета строительных конструкций. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 3. С. 12–16.
4. Авиром Л. С. Надежность конструкций сборных зданий и сооружений. Москва: Стройиздат. 1971. 216 с.
5. Краковский М. Б. Надежность конструкций, проектируемых по советским и зарубежным нормам. *Бетон и железобетон*. 1986. № 6. С. 38–41.
6. Лычев А. С. Надежность строительных конструкций: учеб. пособ. Москва: Изд-во АСВ, 2008. 184 с.
7. Райзер В. Д. Теория надежности в строительном проектировании: монография. Москва: Изд-во АСВ, 1998. 304 с.
8. Чирков В. П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций: уч. пособ. Москва: Маршрут, 2006. 620 с.
9. Барашиков А. Я., Сирота М. Д. Надійність будівель і споруд: навч. посіб. Київ: ІСДО, 1993. 204 с.
10. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы: монография. Харьков, 2008. 304 с.
11. Воскобийник О. П. Методологія нормування технічних станів сталезалізобетонних конструкцій: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2014. 40 с.

12. Коваленко И. Н. Исследования по анализу надежности сложных систем. Киев: Наукова думка, 1975. С. 210.
13. Лантух-Лященко А. І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: зб. наук. пр. Київ: Український транспортний університет, 1999. Вип. 57. С. 183–188.
14. Пашинський В. А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України. Київ: Сталь, 1999. 185 с.
15. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий. Полтава: ООО «АСМИ», 2009. 452 с.
16. Семко О. В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій: монографія. Київ: Сталь, 2004. 316 с.
17. Усаковский С. Б. Прикладные задачи теории сооружений. О новой парадигме теории расчета сооружений: монография. Киев: КНУСА, 2014. 145 с.
18. Школа А. В. Диагностика портовых сооружений: монография. Одесса: Астропринт, 2010. 592 с.
19. ДБН В.2.6-162:2010. Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 97 с.
20. Кичаева О. В., Убийвовк А. В. Механизм разрушения кирпичной кладки при одноосном сжатии балки-стенки, опирающейся на разномодульные материалы (экспериментальные исследования). *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*: зб. наук. пр. Луцьк: ЛНТУ, 2016. Вип. 5. С. 223–231.

Стаття надійшла 23.01.2020