

УДК624.046

DOI:https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.15.22

**Вікторія ДАГІЛЬ<sup>1</sup>** (ORCID: 0000-0001-7335-609X),  
**Лариса ХАТКОВА<sup>1</sup>**, кандидат педагогічних наук, доцент (ORCID: 0000-0001-5140-0213),  
**Ілля ДАГІЛЬ<sup>2</sup>** (ORCID: 0000-0003-3874-6206),

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України,

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ІМОВІРНОСТЕЙ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ

*Метою даної статті є розробка методики розрахунку надійності конструкції з використанням системного аналізу за допомогою апарату статистичного аналізу та обробки даних, що дозволяє знайти оптимальне рішення і максимально виключає необ'єктивність в обчислювальному середовищі табличного процесора MS Excel (Microsoft Corp.)*

*Дослідження виконане з метою вивчення практичних методів визначення розрахункових значень навантажень та розрахункових опорів за результатами статистичної обробки дослідних даних, отриманих в результаті випробувань.*

*В результаті проведеної роботи перевірено рівень надійності проаналізованого прогону на відповідність рекомендаціям норм, щодо доцільних значень імовірності відмови.*

**Ключові слова:** надійність, теорія ймовірності, математична статистика, міцність будівельних конструкцій, ступінь ризику, аналіз даних

Прогнозування роботи будівлі можливе тільки за допомогою оцінки показників надійності на стадіях проектування, виготовлення, експлуатації та можливої реконструкції, демонтажу та утилізації. Ці показники дозволяють контролювати обмеження ступеня ризику шляхом виконання вимог міцності, довговічності, вогнестійкості та безвідмовності роботи протягом встановленого терміну експлуатації і мають випадковий характер, що робить відмову випадковою подією.

Теорія надійності та системний аналіз – це математичний апарат, заснований на результатах таких розділів математики: теорія ймовірностей, математична статистика, теорія випадкових процесів, теорія оптимізації та дослідження операцій. Цей математичний апарат, накладає на будівельний проект ряд обмежень, виходячи з вимог до забезпечення безпечної експлуатації будівлі або споруди протягом деякого розрахункового періоду.

На ринку програмного забезпечення існує велика кількість додатків, які пропонують розв'язання задач аналізу даних: *MathCAD (Parametric Technology Corp.)*, *Mathematica (Wolfram Research, Inc)*, *MATLAB (MathWorks, Inc.)*, *MS Excel (Microsoft Corp.)*, *NCSS (NCSS Software)*, *Statistica (StatSoft, Inc.)*, та велика кількість інших додатків, які пропонують розв'язання задач аналізу даних як у пакетному режимі, так і у вигляді бібліотек функцій, які можна використовувати в інших програмних продуктах.

**Постановка проблеми.** Поведінка будівельних конструкцій під час експлуатації обумовлена взаємодією цілого ряду чинників випадкової природи. Тому методи їх розрахунку повинні бути засновані на використанні імовірнісних методів, що відображають зміст фізичних явищ за допомогою вирішення задач математичної

статистики, яка пропонує ряд обчислень і пов'язана з чисельною реалізацією обчислювального алгоритму і графічною інтерпретацією цих результатів. Цьому моменту в літературі приділяється мало уваги, що ускладнює використання методів математичної статистики на практиці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження розрахунку будівельних конструкцій на надійність проводилися такими авторами: А. Р. Ржаніцин (робота «Теорія розрахунку будівельних конструкцій на надійність»), В. В. Болотін (роботи «Прогнозування ресурсу машин і конструкцій», «Методи теорії ймовірностей і теорії надійності в розрахунках споруд», «Застосування методів теорії ймовірностей і теорії надійності в розрахунках споруд»), В. Д. Райзер (робота «Теорія надійності в будівельному проектуванні»), А. Я. Барашиков, М. Д. Сирота (робота «Надійність будівель та споруд»).

Математичні методи розрахунку надійності викладені в працях А. І. Берг, Н. Г. Бруевич, Б. В. Гнеденко, В. І. Сифоров, Б. С. Сотсков і ін. В цих роботах отримані результати, що корелюють з експериментальними.

**Мета статті.** Розробка методики розрахунку надійності конструкції з використанням системного аналізу за допомогою *апарату статистичного аналізу та обробки даних*, що дозволяє знайти оптимальне рішення і максимально виключає необ'єктивність в обчислювальному середовищі табличного процесора *MS Excel (MicrosoftCorp.)*

**Матеріали та методи.** Предметом статистичного аналізу є вибірка значень випадкової величини, отримана в результаті випробувань. Мета статистичної обробки вибірки випадкової величини полягає в отриманні закону розподілу цієї величини за наявними дослідними даними. Статистична обробка вибірок та ймовірнісне подання випадкових величин зводиться до такої послідовності операцій:

- завдання статистичної обробки вибірки випадкової величини;
- визначення числових характеристик;
- побудова гістограми розподілу;
- поширені закони розподілу випадкових величин;
- вибір теоретичного закону розподілу та перевірка його узгодженості з дослідними даними.

Завершальним етапом статистичної обробки вибірки випадкової величини є вибір теоретичного розподілу з урахуванням фізичної природи досліджуваної величини та вигляду гістограми, а також визначення параметрів обраного розподілу з умови забезпечення рівності числових характеристик теоретичного розподілу та проаналізованої вибірки. Нижче описані закони розподілу, які часто вживаються в дослідженнях надійності та при нормуванні навантажень: Гауса, Гумбеля та розподіл Вейбулла.

**Нормальний закон розподілу** (розподіл Гауса) є граничним розподілом, до якого наближається сума багатьох випадкових величин впливів на будівлю. Застосовується для опису випадкових величин, які формуються в результаті впливу багатьох випадкових факторів. Нормальний розподіл має нескінченну область визначення і задається двома параметрами, рівними математичному сподіванню  $M$  та стандарту  $S$  випадкової величини. Графік описується формулою

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\left( \frac{x-M}{S} \right)^2 \right].$$

**Закон розподілу Гумбеля** (подвійний експоненціальний розподіл), є граничним розподілом найбільшого елемента з вибірки випадкової величини, чим пояснюється його широке застосування для опису екстремальних значень показників надійності, у тому числі найбільших протягом місяця чи року значень кліматичних факторів. Графік густини імовірності описується формулою

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp \left[ \frac{\alpha-x}{\beta} - \exp \left( \frac{\alpha-x}{\beta} \right) \right].$$

Розподіл Вейбулла це неперервний розподіл ймовірностей, який використовують в теорії крихкого руйнування. Функція щільності розподілу Вейбулла має вигляд:

$$f(x) = \frac{a}{\beta^a} x^{a-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^a}, x \geq 0.$$

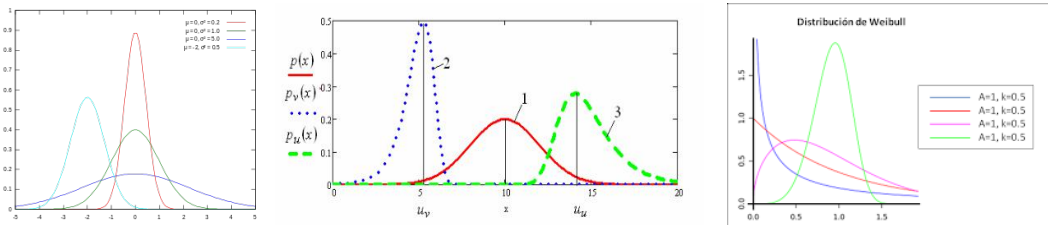


Рисунок 1. Функції розподілу випадкових величин для дослідження надійності будівель: Гауса, Гумбеля та Вейбулла

Вид теоретичного закону розподілу для опису дослідженої випадкової величини обирається, виходячи з наступних міркувань:

- фізичне обґрунтування досліджуваного явища (наприклад, нормальний розподіл є результатом впливу багатьох випадкових факторів, розподіл Гумбеля описує максимальні значення випадкових величин);
- співвідношення числових характеристик (наприклад, для експоненціального розподілу характерно  $M = S$ , розподіл Гумбеля має фіксоване значення коефіцієнта асиметрії  $A = 1,14$ );
- відповідність форми кривої густини теоретичного розподілу до дослідної гістограми розподілу.

**Постановка задачі та її розв'язання.** В проведеному дослідженні необхідно визначити рівень надійності конструкції покриття на відповідність рекомендаціям ДБН В.1.2-14-2018 щодо доцільних значень імовірності відмови несучих будівельних конструкцій.

Дослідження виконане з метою вивчення практичних методів визначення розрахункових значень навантажень та розрахункових опорів за результатами статистичної обробки дослідних даних.

У процесі виконання роботи поставлені наступні завдання:

- виконати статистичну обробку результатів:
  - розрахункового опору матеріалу конструкції;
  - розрахункових значень постійного навантаження;
  - розрахункових значень тимчасового навантаження, згідно з ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи»;
- виконати перевірочні розрахунки конструкції покриття на навантаження, визначені за ДБН В.1.2-2:2006;
- виконати перевірочні розрахунки на навантаження, встановлені за результатами статистичної обробки дослідних даних,
- порівняти результати перевірочних розрахунків,
- з урахуванням встановлених статистичних характеристик міцності матеріалу, постійного та тимчасового навантаження на покриття визначити імовірність відмови покриття та порівняти її з ймовірністю відмови, рекомендованою ДБН В.1.2-14-2018.

В роботі використано спосіб статистичної обробки даних у середовищі табличного процесора Microsoft Excel (*MicroSoftCorp.*) – найбільш поширений додаток з пакету офісних програм MS Office. Причини – має широкий набір математичних і статистичних вбудованих функції та розвинуту систему графічного подання результатів аналізу, тісну інтеграцією з MS Word і PowerPoint, наявність макросів-доповнень для MS Excel, що включають додаткові статистичні функції.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку

Вихідні дані						
проліт прогону покрівлі				6		
крок прогонів покрівлі				6		
переріз прогону покрівлі				двотавр 22		
термін експлуатації				50		
хар-ки постійного навантаження						
P0				890		
Pm				998		
Mr				806		
Sp				98		
Шурфи				20		
кількість знач. Сніг. Навант.				50 знач		
межі текучості сталі				50 знач		

Статистична обробка результатів розрахункового *опору матеріалу* конструкції з побудовою гістограми розподілу, вибір теоретичного закону розподілу та перевірка його узгодженості з дослідними даними

Опір сталі	Вихідні дані: результати випробувань зразків сталі (межа текучості в МПа):		
	Середнє значення (M)	Середнє відхилення (S)	
	303,1	29,4	
	Коефіцієнт варіації (V)	Розрахунковий опір (R)	
	9,70%	218	

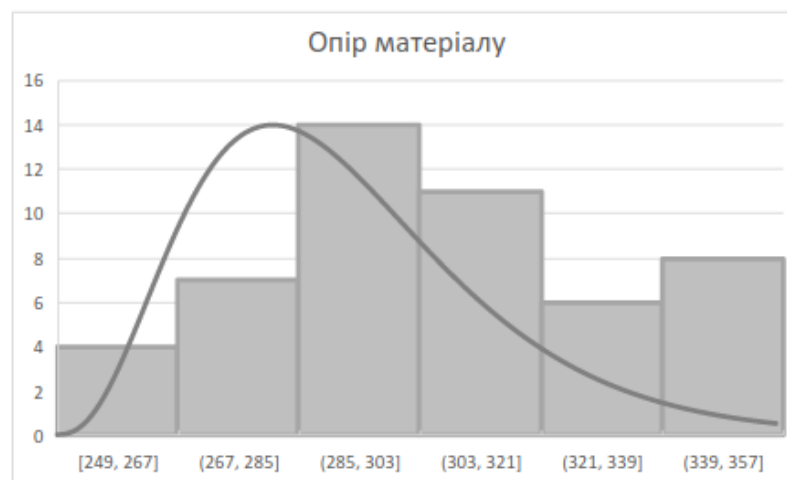


Рисунок 2. Визначення розрахункового опору сталі за результатами випробувань зразків

Статистична обробка результатів розрахункових значень *постійного навантаження* з побудовою гістограми розподілу, вибір теоретичного закону розподілу та перевірка його узгодженості з дослідними даними

<b>Постійне навантаження:</b>				
Q0= =Qe= =M=	806		Середнє значення (M)	Середнє відхилення (S)
Qm=	850		803,98	6,1
t=	1,95918 4		Коефіцієнт варіації (V)	Розрахунковий опір (R)
			0,76%	786



Рисунок 3. Визначення розрахункових значень постійного навантаження за результатами натурних обстежень

Статистична обробка результатів розрахункових значень *тимчасового навантаження* з побудовою гістограми розподілу, вибір теоретичного закону розподілу та перевірка його узгодженості з дослідними даними

<b>Тимчасове навантаження:</b>					
мін	60	МПа	Хар-не значення снігового навантаження (Sm)		970
макс	1040	МПа			
Середнє (M)	384	МПа	Нормативне значення	1200	Мпа
Відхил. (S)	225		Розрахункова різниця	19,1	%
Вариація	0,59				

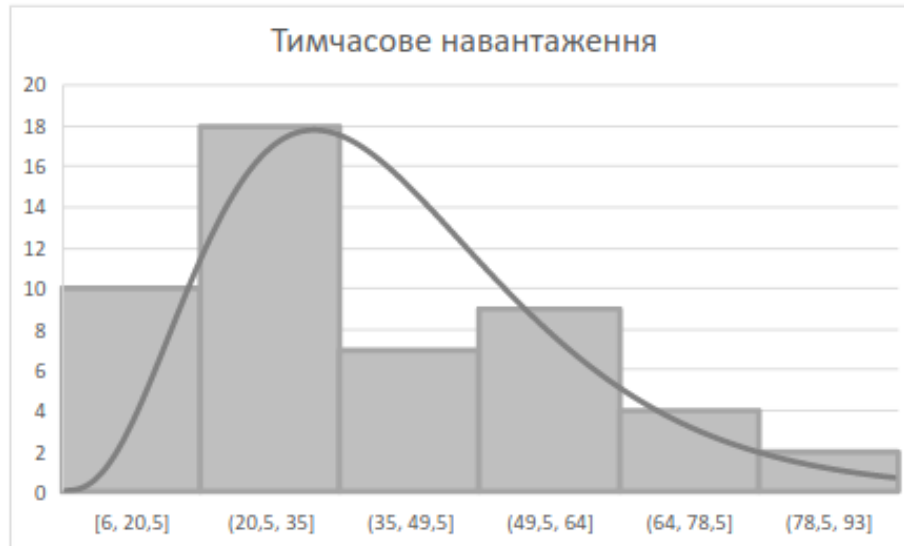


Рисунок 4. Визначення розрахункових значень тимчасового навантаження за результатами натурних обстежень

Перевірочний розрахунок міцності конструкції покриття виконано згідно з ДСТУ Б В.2.6-200:2014 Конструкції металеві будівельні. Вимоги до монтажу з урахуванням розрахункових значень постійного та тимчасового навантажень, визначених за ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування встановлені за статистичними даними у попередніх розділах даної роботи

Перевірочний розрахунок прогону						
$S_m(50)=$	1200	Па		$W=$	232	
$Q=$	2198	Па				
$q=$	13,188	кН/м				
$M=$	59,3	кН*м				
$\delta=$	255,8	>	218			
$Q=$	1820,5	Па				
$q=$	10,92	кН*м				
$M=$	49,15	кН*м				
$\delta=$	212	<	218			

Рисунок 5. Перевірочний розрахунок прогону покрівлі

З урахуванням встановлених статистичних характеристик міцності матеріалу, постійного та тимчасового навантаження на покриття визначити ймовірність відмови покриття та порівняти її з ймовірністю відмови, рекомендованою ДБН В.1.2-14-2018

Визначення імовірності відмови прогону покрівлі:					
Розрахункові параметри		Розрах. значення		Числові х-ки	
		ДБН	уточнені	М	S
Характеристика міцності сталі (Мпа)		-	218	303,1	29,4
Постійне навантаження (Па)		998	850	806	98
Снігове навантаження (Па)		1200	970	384	225
Максимальні напруження (Мпа)		255,8	212	-	-
Коефіцієнт впливу		0,116	-	-	-
Матеріал і переріз прогону		сталевий двотавр 22			
M=	85	Мпа			
S=	41,0	Мпа			
Дальність відмови	$\beta=$	2,06	Коефіцієнт впливу $P_H=1-0,02=0,0098$		0,116

Рисунок 6. Визначення імовірності відмови прогону покрівлі

**Висновки.** За результатами дослідження балка покриття згідно з ДБН В.1.2-14-2018, для розрахунків за першою групою граничних станів в сталих розрахункових ситуаціях конструкцій будівель і споруд категорії відповідальності СС1 рекомендується імовірність відмови 0,0001. Отже, рівень надійності проаналізованого прогону не відповідає рекомендаціям ДБН В.1.2-14-2018 табл.Б1 та додаток Б щодо доцільних значень імовірності відмови несучих будівельних конструкцій.

В результаті проведеної роботи розроблено методику розрахунку надійності будівельних конструкції з використанням теорії ймовірності та системного аналізу за допомогою апарату статистичного аналізу та обробки даних, що дозволило знайти оптимальне рішення і максимально виключає необ'єктивність в обчислювальному середовищі табличного процесора *MS Excel (Microsoft Corp.)*

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДБН В.1.2-14-2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.: Мінрегіонбуд України, 2018.
2. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. К.: Мінрегіонбуд України, 2007.
3. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будинків і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. К.: Мінрегіонбуд України, 2011.
4. Основи теорії надійності будівель і споруд. Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності "Промислове та цивільне будівництво" усіх форм навчання. / Укладач – Пашинський В.А. – Кіровоград: КНТУ, 2012. - 37 с.
5. Надійність будівель та споруд. /А.Я. Барашиков, М.Д. Сирота – Київ: УМК ВО, 1993 – 211 с.
6. Гмурман, В. Е. Теорія імовірності та математична статистика [Текст]: навч. посібник. / В. Е. Гмурман. – 12. – ЮРАЙТ, 2012. – 479 с.
7. Вентцель, Е. С. Теорія імовірності [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – К.: Наука, 1973. – 365 с.

## REFERENCES

1. DBN V.1.2-14-2018. Security system of reliability and security of everyday objects. General principles of security of reliability and constructive security of life and disputes. K.: Minregionbud of Ukraine, 2018.
2. DBN V.1.2-2:2006 Security system for security and safety of everyday objects. Navantazhennya and inject. Norm design. K.: Minregionbud of Ukraine, 2007.
3. DBN V.2.6-163:2010. Constructions of houses and spores. Steel structures. Standards for design, preparation and installation. K.: Minregionbud of Ukraine, 2011.
4. Fundamentals of the theory of life expectancy and spores. Methodical teachings to practical ones to take for students in the specialty "Industry and Civil Life" of the general forms of education. / Ukladach - Pashinsky V.A. - Kirovograd: KNTU, 2012. - 37 p.
5. Reliability of buildings and structures. /AND I. Barashikov, M.D. Sirota - Kiev: UMK VO, 1993 - 211 p.
6. Gmurman, V. E. Probability theory and mathematical statistics [Text]: textbook. allowance / V. E. Gmurman. – 12th ed. – M.: URAIT, 2012. – 479 p.
7. Venttsel, E. S. Probability theory [Text] / E. S. Venttsel, L. A. Ovcharov. – M.: Nauka, 1973. – 365 p.

**Victoria DAGIL**<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-7335-609X),

**Larisa KHATKOVA**<sup>1</sup>, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor  
(ORCID: 0000-0001-5140-0213),

**Illya DAGIL**<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-3874-6206),

<sup>1</sup>*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University  
Of Civil Protection of Ukraine,*

<sup>2</sup>*KNU named after Taras Shevchenko, Faculty of cybernetics and computer sciences*

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR CALCULATING BUILDING RELIABILITY INDICATORS USING PROBABILITY THEORY AND MATHEMATICAL STATISTICS

*The purpose of this article is to develop a methodology for calculating the reliability of the structure using a system analysis using a statistical analysis and data processing apparatus, which allows finding the optimal solution and maximally excludes bias in the computing environment of the MS Excel spreadsheet processor (MicrosoftCorp.)*

*The study was carried out with the aim of studying practical methods of determining the calculated values of loads and calculated resistances based on the results of statistical processing of experimental data obtained as a result of tests.*

*As a result of the work carried out, the level of reliability of the analyzed run was checked for compliance with the recommendations of the norms regarding appropriate values of the probability of failure.*

**Keywords:** *reliability, probability theory, mathematical statistics, strength of building structures, degree of risk, data analysis*