

УДК 624.012

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.46.766

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

БЛІХАРСЬКИЙ Я. З.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
КОПІЙКА Н. С.², студ.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг та мостів, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, тел. +38 (097) 967-48-72, e-mail: yaroslav.z.blikharskyi@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3374 -9195

² Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, тел. +38 (098) 210-69-69, e-mail: nadiia.kopiika.mnbd.2020@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2270-4028

Анотація. Постановка проблеми. Будівельна індустрія на сьогодні – один з основних ідентифікаторів тенденцій в різних галузях життя суспільства. Останнім часом значної актуалізації набули питання оптимізації проєктних рішень шляхом використання енерго- і ресурсоощадних технологій і максимального використання ресурсів несної здатності будівельних конструкцій. Для вирішення цих питань необхідне глибоке розуміння поняття надійності і довговічності. Оскільки більшість параметрів несної здатності і навантаження є стохастичними за своєю природою, необхідні механізми їх об'єктивного оцінювання, які постають базою концепції «надійнісного проєктування». Наявність таких методик дозволяє проєктування будівель і споруд із заданим рівнем надійності і точне оцінювання залишкового ресурсу пошкоджених конструкцій, тобто оптимізує розв'язання інженерних задач широкого діапазону як під час нового будівництва, так і під час реконструкції. **Мета роботи** – детальний огляд наявних підходів до оцінювання надійності будівельних конструкцій; структурований аналіз еволюції наукової думки в напрямку розуміння стохастичної природи несної здатності конструкцій, окреслення перспективних напрямків експериментальних і теоретичних досліджень цієї проблеми. **Висновок.** Подальший розвиток концепції «надійнісного проєктування» із встановленням цільових рівнів безвідмовності є перспективним, оскільки дозволить отримати ефективні проєктні рішення, сприятиме впровадженню ресурсо- й енергоефективних технологій. Актуальним бачиться експериментальне вивчення статистичних характеристик зовнішніх впливів і несної здатності й оптимізація наявних методик імовірнісного моделювання для отримання універсального аналітичного апарату оцінювання надійності.

Ключові слова: надійність; безвідмовність; імовірнісне моделювання; ефективне проєктування; оптимізація проєктних рішень

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF THE BUILDING STRUCTURES' RELIABILITY

BLIKHARSKYI Yar.Z.^{1*}, PhD, Assoc. Prof.,
КОПІЙКА N.S.², Stud.

^{1*} Department of Highways and Bridges History, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera Str., 79013, Lviv, Ukraine, tel. +38 (097) 967-48-72, e-mail: yaroslav.z.blikharskyi@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3374 -9195

² Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera Str., 79013, Lviv, Ukraine, tel. +38 (098) 210-69-69, e-mail: nadiia.kopiika.mnbd.2020@lpnu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2270-4028

Abstract. Raising of the problem. Nowadays construction industry can be considered as one of the main identifiers of the overall progress of scientific activity, an indicator of trends in various spheres of society. Recently, the tasks of design solutions' optimization through the use of energy and resource-saving technologies and maximum use of resources have become significantly relevant. To solve these problems, it is necessary to have deep understanding of the concept of reliability and durability of buildings and structures. Since most of the parameters of bearing capacity and load are stochastic in nature, the mechanisms of their objective evaluation are necessary, which are the basis of the "sustainable design" concept. The availability of such techniques allows to design buildings and structures with given level of reliability and accurate assessment of the residual life of damaged structures, which optimizes the solution of engineering problems of a wide range in both new construction and reconstruction. **Purpose.** To conduct detailed review and comparative analysis of existing approaches to assessing the reliability of building structures. To perform a structured analysis of the evolution of scientific thought in the direction of understanding the stochastic nature of the

bearing capacity of structures, to outline promising areas of experimental and theoretical research on this problem. **Conclusion.** Further development of the "sustainable design" concept with establishment of target reliability levels is promising, as it will allow to obtain effective design solutions and will promote the introduction of resource- and energy-efficient technologies. The tasks of experimental study of statistical characteristics of external influences and bearing capacity and optimization of existing methods of probabilistic modeling to obtain a universal analytical apparatus for reliability assessment are topical.

Keywords: *reliability; sustainability; probabilistic modeling; effective design; optimization of design solutions*

Вступ. Сьогодні розвиток будівельної галузі вважається одним з основних ідентифікаторів загальних тенденцій в економічному, соціальному і виробничому житті суспільства. Так, у наукових роботах ставиться мета оптимізації проектних рішень шляхом використання енерго- і ресурсощадних технологій [1]. Досягнення її передбачає розв'язання проблеми максимального використання резервів несної здатності будівельних конструкцій [1; 8].

Очевидно, що вирішення цієї проблеми можливе лише за наявності достовірних механізмів оцінювання надійності і довговічності будівельної конструкції з урахуванням різноманітних зовнішніх впливів. Такі методики дозволяють проектувати будівлі і споруди із заданим рівнем надійності і точно оцінювати залишковий ресурс пошкоджених конструкцій, тобто оптимізують розв'язання інженерних задач як під час нового будівництва, так і у процесі реконструкції.

Основна мета роботи – детальний огляд підходів до оцінювання надійності будівельних конструкцій. Дослідження також включає структурований аналіз еволюції наукової думки в напрямку розуміння стохастичної природи параметрів несної здатності конструкцій та окреслення перспективних напрямків експериментальних і теоретичних досліджень цієї проблеми.

Аналіз публікацій. Як відомо, процес формування проектного рішення неоднозначний і передбачає глибоке занурення інженера-проектанта в кожен конкретну розрахункову ситуацію для забезпечення необхідного рівня надійності. Саме ж поняття надійності передбачає повноцінне і достовірне оцінювання всіх аспектів роботи конструкції і зазнало

багаторазових модифікацій, доки отримало сучасний вигляд.

Піонерними дослідженнями цього питання стали праці М. Майера [29] та Н. Ф. Хоціалова [17], Н. С. Стрілецького [16], в яких уперше запропоновано розглядати поняття надійності як функції стохастичних параметрів міцності і зовнішніх впливів. Недолік цих праць, який полягав у відсутності чіткої аналітичної методики оцінювання надійності, усунув А. Р. Ржаніцин [14; 15], котрий вважається засновником основних концепцій, покладених в сучасну теорію надійності.

Крім того, саме у працях [14–17; 29] зроблено перші спроби розроблення методики, яка б дозволила проектувати будівельні споруди наперед заданого рівня безвідмовності, тобто принципи так званого «надійнісного проектування».

Серед досліджень пізнішого періоду необхідно відмітити праці В. Д. Райзера [13] і В. В. Болотіна [2]. Зокрема, В. В. Болотін [2] спромігся вивести техніку імовірнісного розрахунку на якісно новий рівень, ставши одним із розробників теорії стохастичних процесів. У дослідженні [2] сформульовано та обґрунтовано метод «двох моментів», – математичний апарат імовірнісного розрахунку що використовується понині.

Публікації [2; 13–15] стали імпульсом для значного поширення і швидкого розвитку шкіл «надійнісного проектування» як в Україні, так і у світі. Важливі також праці С. Ф. Пічугіна [9; 10], який сприяв удосконаленню розрахункового апарату оцінювання надійності. Визначенням надійності конструкцій в умовах недетермінованого навантаження займався Р. І. Кінаш [4]. Аналіз сучасних норм в питаннях безвідмовності наведено в статті А. І. Лантуха-Ляценка [6].

Загалом роботи цього періоду можна охарактеризувати як трактування надійності через показник імовірності її відмови протягом певного періоду часу. Аналогічні трактування викладені в публікаціях іноземних авторів Ang [19], Ditlevsen, Madsen [20], Tang, Jiang, Li Y. [32], D. Val, F. Bljoger, D. Yankelevsky [33], M. H. Faber [22; 23], C. Wang [34], Jitao [27] та ін.

Один із найбільш актуальних напрямків досліджень – це структурований детальний аналіз основних концепцій надійності, викладених у чинних нормативних документах. Загалом, як стверджують автори [7; 24; 34], поняття безвідмовної роботи є центральним феноменом, який по-різному трактується в нормах галузі будівництва різних країн.

Як приклад охарактеризуємо підходи в українських і європейських нормах [3; 21; 26]. Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 [3], надійність можна охарактеризувати як здатність конструкції виконувати задані функції в певних умовах експлуатації, зберігаючи протягом установленого часу нормативні показники. Досить схоже трактування викладене в ISO 2394:2015 [26]. Необхідно зазначити, що в Eurocode EN 1990:2002 [21] надійність і безвідмовність конструкцій позиціонуються з точки зору можливого регулювання проектних рішень для максимальної їх оптимізації, тобто відслідковується чітке наслідування принципів «надійнісного проектування».

Багато дослідників зазначають високу ефективність такого підходу [7; 24; 34] і наголошують на необхідності удосконалення існуючих норм для отримання керованого апарату надійності.

Загалом усі підходи до визначення надійності будівельних конструкцій можна умовно поділити на дві групи [11]:

- 1) метод часткових коефіцієнтів надійності (граничних станів);
- 2) ймовірнісний метод (метод теорії надійності).

Окреслимо основні принципи методу граничних станів, що наразі постає основою сучасних норм проектування. Пошук

проектного рішення здійснюється шляхом співставлення навантажувального ефекту і несної здатності, тобто резерв міцності Z визначається як:

$$Z = \frac{R}{Q} \geq 1 \quad (1)$$

де Q , R – відповідно величини навантаження і несної здатності конструкції, які вважають детермінованими, а відхилення в значеннях навантажень і умов роботи елімінується за рахунок часткових коефіцієнтів надійності.

Необхідно зазначити, що в остаточні умови міцності ці параметри вводяться в детермінованій формі, незважаючи на саму стохастичність їх природи, що свідчить про очевидну відсутність апарату оцінювання фактичної надійності конструкції і важелів для її контролю [18]. Цей аспект досить наочно проаналізував В. Д. Райзер, який у своїй праці [13] довів очевидну невідповідність напівімовірнісного підходу реальній роботі конструкцій, що зумовлює необґрунтовані результати, коли рівень надійності конструкцій класу наслідків СС3 стає нижчим за цей рівень для класу СС1.

Якісно інші результати дає метод імовірнісного розрахунку надійності з використанням недетермінованих функцій і з урахуванням стохастичної природи вхідних параметрів навантаження і несної здатності.

Цей підхід набув значної популярності в низці останніх досліджень [30; 31], оскільки дозволяє проектувати конструкції з наперед заданим рівнем безвідмовності. Наприклад, J. Song [31] провів детальний аналіз числових методів імовірнісного моделювання і наголошує на врахуванні фактора часової невизначеності. Цікава методика керування змінними з огляду на невизначеність діапазону відмов розроблена М. Rashki [30].

У загальному ж випадку розрахунок надійності в імовірнісній постановці доцільно проводити у формі функції безпеки, яка визначає ймовірність потрапляння конструкції в область відмови. При цьому враховують невизначену природу геометричних розмірів, міцності

матеріалів, внутрішніх зусиль і зовнішніх впливів [18].

Працездатність конструкції в цьому випадку:

$$g(Q, R) = R - Q. \quad (2)$$

Нормування надійності можна виконувати різними способами. Наприклад, якщо використовувати індекси надійності, то маємо регулювання ймовірності відмови. Навпаки, для нормування допустимого рівня ризику розглядаємо добуток ймовірності відмови на кількісну характеристику наслідків.

Останнім часом проблема пошуку оптимальних методик імовірнісного моделювання надійності набула значної актуалізації. Розглянемо найважливіші досягнення цього напрямку і найбільш поширені методики оцінювання надійності.

Найчастіше застосовуваний з огляду на його простоту метод «двох моментів» [13], який визначає ймовірність відмови рівнянням:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta), \quad (3)$$

де β – індекс надійності, що характеризує рівень безпеки і визначається за формулою:

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{(s_R^2 - s_Q^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

де s_R, s_Q – стандартні відхилення внутрішнього опору R і зовнішнього навантаження Q ; \bar{R}, \bar{Q} – середні значення цих величин.

Недолік цього методу полягає в тому, що його можна застосувати лише для нормальних і логнормальних законів розподілу [13].

На противагу до попереднього, в методі «гарячих точок» це обмеження усунуте. Основний принцип у цьому випадку полягає в ітераційному наближенні вихідного довільного закону розподілу до нормального. Методика такої апроксимації докладно описана в [13]. Розглядають вихідні стохастичні величини x_1, x_2, \dots, x_n , для яких відомі інтегральні F_{xi} , і

диференціальні f_{xi} , функції розподілу. Тоді можна отримати рівняння, що описує область безвідмовної роботи, яка містить «точку підгонки» з максимальною щільністю розподілу всіх вихідних величин:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (5)$$

Підбір координат «точок підгонки» виконують поступово, шляхом багаторазової локальної нормалізації всіх вихідних величин і перевірки виконання умов безвідмовної роботи, доки чергова «точка підгонки» не виявиться шуканою «гарячою точкою» [13]. Обмеженість методу полягає в тому, що точний розв'язок він надає тільки для законів розподілу, похідних від нормального, і для його застосування є також гладкість і диференційованість функції, яку застосовуємо для опису області відмови.

В закордонних працях [24; 28] часто застосовується модифікація методу у вигляді «FORM», який усуває зазначені обмеження і може використовуватись для нестійких функцій розподілу.

Наступний метод, на який слід звернути увагу, – метод статистичних випробувань, який полягає в такому [13]. Після виконання великої кількості випробувань отримуємо ряд випадкових реалізацій досліджуваних вихідних величин. Для цих значень оцінюють ймовірність відмови P_f залежності від частоти її появи v за формулою:

$$v = \frac{k}{m} \approx P_f, \quad (6)$$

де k – кількість відмов, m – загальна кількість випробувань [13].

Цей метод простий і універсальний, однак передбачає попереднє оцінювання шуканої ймовірності і значну кількість випробувань.

Метод статистичного моделювання (метод Монте-Карло), що нині застосовується найчастіше [5; 11; 13; 34] полягає в ітераційній багаторазовій реалізації стохастичного процесу, який необхідно оцінити. При цьому ймовірнісну задачу формулюють так, щоб її параметри відповідали конкретній розрахунковій

ситуації. Таким чином, якщо розглянути математичне очікування функції несної здатності F_R і відповідну імовірність відмови P_f , отримаємо рівняння:

$$\bar{P}_f = \int_0^{\infty} F_R(x) f_Q(x) dx = \bar{F}_R(Q) \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_R(Q_i), \quad (7)$$

де F_i , і f_i , – інтегральна і диференціальна функції розподілу стохастичного параметра, m – кількість його ітераційних реалізацій.

Переваги методу Монте-Карло, порівняно з іншими методами, – це чіткість аналітичного формулювання, значно менший розкид оцінки ймовірності відмови, а також його можливість застосування для розв’язання нелінійних задач. Серед недоліків можна виділити складність розрахункового апарату і необхідність у тому, щоб одна з функцій R і Q була наперед задана. В низці досліджень [13; 24; 27] розроблено методики для спрощення математичного апарату методу статистичного моделювання шляхом зменшення обсягу вибірки при пошуку рішення.

Не можна оминати увагою також метод статистичної лінеаризації, який наразі найчастіше застосовується в прикладних інженерних задачах. Алгоритм оцінювання надійності полягає у розкладанні функції резерву несної здатності в ряд Тейлора в околі центру розподілу випадкових аргументів [11; 12]. Цей центр розподілу фактично являє собою точку математичного сподівання функції несної здатності, тобто найбільш вірогідної її реалізації. Математичний апарат досить простий і базується на введенні у формулу несної здатності замість випадкових величин їх статистичних характеристик, в результаті ж отримують детальну імовірнісну модель роботи конструкції.

Зазначимо також, що метод статичної лінеаризації може застосовуватись для систем, що не є строго лінійними, однак для яких відхилення від лінійного закону складає до 20...25 % [12]. Ця особливість методу і визначає його широке застосування для проектних задач будівельної галузі.

Принцип оцінювання надійності методом статистичної лінеаризації згідно з [11; 12] такий. Якщо прийняти, що система містить у собі n випадкових величин $(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0)$, для яких відомі їх статистичні характеристики: математичне сподівання m_{xi} , дисперсія D_{xi} , кореляційні моменти K_{xixj} ($i = 1 \dots n$), то робота системи описується нелінійною функцією виду:

$$y = \varphi(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0). \quad (8)$$

Наступний етап у розв’язанні задачі – пошук статистичних характеристик випадкової величини y : D_y , m_y . Розглянемо ряд Тейлора в околі точки (m_{x1}, \dots, m_{xn}) при опущенні членів вище ніж першого порядку й отримаємо вираз:

$$y = \varphi(X_1^0, X_2^0, \dots, X_n^0) \approx \varphi(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}) + \sum_{i=1}^n \varphi'_{xi}(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}) \cdot (X_i^0 - m_{xi}) \quad (9)$$

Тоді, за неперевіщення допустимих відхилень від лінійної залежності, застосовуємо загальновідомі математичні методи перетворень виразів і отримаємо формули:

$$m_y = \varphi(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}); \quad (10)$$

$$D_y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial X_i^0} \right)_m^2 \sigma_{xi}^2 + 2 \sum_{i>j} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial X_i^0} \right)_m \left(\frac{\partial \varphi}{\partial X_j^0} \right)_m K_{ij}; \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial X_i^0} \right)_m = \varphi'_{xi}(m_{x1}, m_{x2}, \dots, m_{xn}), \quad (12)$$

де $\sigma_i = \sqrt{D_i}$ – величина середнього квадратичного відхилення відповідного параметра.

Згідно з проведеним аналізом можна стверджувати, що прийняття конкретного рішення щодо доцільного методу ймовірнісного моделювання повинне базуватись на конкретній розрахунковій ситуації, ступені інформаційного забезпечення моделі, рівні стохастичності вихідних параметрів. Також важливою рекомендацією бачиться виконання

ймовірнісного оцінювання працездатності будівлі чи споруди як комплексної системи, а не окремих конструктивних елементів. Додатково можна зазначити важливість урахування часового параметра.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведено детальний огляд наявних підходів до оцінювання надійності будівельних конструкцій і порівняльний аналіз найбільш поширених методик для визначення фактичної безвідмовності будівель і споруд.

Додатково проаналізовано основні концепції, покладені в основу сучасних нормативних документів і відповідність їх фактичній картині роботи будівельної конструкції.

На основі проведеного огляду наявних публікацій можна зробити висновок про доцільність модифікації існуючих норм проектування з урахуванням імовірнісної

природи надійності і стохастичних параметрів міцності і навантаження.

Апарат «надійнісного проектування» з встановленням цільових рівнів безвідмовності дозволить отримувати ефективні проектні рішення, сприятиме зниженню матеріаломісткості, впровадженню ресурсо- й енергоефективних технологій.

Перспективними постають задачі експериментального вивчення статистичних характеристик зовнішніх впливів і несної здатності, і оптимізації наявних методик імовірнісного моделювання для отримання універсального аналітичного апарату оцінювання надійності.

На основі викладеного матеріалу можна надати рекомендації щодо подальшого експериментального і теоретичного розвитку означеної теми і впровадження механізмів імовірнісного моделювання для оптимального розв'язання інженерних задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бліхарський Я. З., Копійка Н. С. Дослідження пошкоджених залізобетонних елементів, основні методи їх відновлення та підсилення. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Вип. 37. Рівне, 2019. С. 316–322.
2. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений : монография. Москва : Стройиздат, 1971. 255 с.
3. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. 33 с. (Державні будівельні норми України).
4. Кінаш Р. І. Методи нормування тимчасових навантажень та оцінювання надійності будівельних конструкцій за умов неповної інформації : дис. д-ра техн. наук. Київ, 2000. 530 с.
5. Куценко В. Н. Основные принципы обеспечения безопасности строительных конструкций. *Металлические конструкции*. Макеевка : Изд-во ДонНАСА, 2009. Т. 15, № 2. С. 147–155.
6. Лантух-Лященко А. И. Развитие идей надежности в строительной отрасли. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. Київ, 2015. № 1. С. 2–8.
7. Лантух-Лященко А. І. Єврокод – новий підхід в проектуванні мостів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2013. Вип. 88. С. 277–288.
8. Лободанов М. М., Вегера П. І., Бліхарський З. Я. Аналіз впливу основних видів дефектів та пошкоджень на несучу здатність залізобетонних елементів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. Львів, 2018. № 888. С. 93–100.
9. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий : монография. Москва : Изд-во АСВ, 2011. 456 с.
10. Пичугин С. Ф. Надійність технічних систем : навч. посіб. Полтава : ПДТУ, 2000. 157 с.
11. Постернак О. М. Дослідження впливу коефіцієнта за призначенням на рівень надійності підсиленних згинальних залізобетонних елементів. *Містобудування та територіальне планування*. Київ, 2015. С. 431–439.
12. Пшеничкина В. А., Богомоллов А.Н., Чураков А. А. Надежность строительных систем : учеб. пособ. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. 40 с.
13. Райзер В. Д. Теория надежности в строительном проектировании : монография. Москва : изд-во АСВ, 1998. 304 с.
14. Ржаницын А. Р. Применение статистических методов в расчетах сооружений на прочность и безопасность. *Строительная механика и расчет сооружений*. Москва, 1952. № 6. С. 22–25.

15. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность : монография. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
16. Стрелецкий Н. С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. Москва: Стройиздат, 1947. 95 с.
17. Хоциалов Н. Ф. Запасы прочности. *Строительная промышленность*. Москва, 1999. № 10. С. 10–15.
18. Яцко Ф. В. Моделювання і прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах : автореф. дис. канд. техн. наук. Київ : Нац. трансп. ун-т, 2015. 20 с.
19. Ang A. H., Cornell C. A. Reliability bases of structural safety and design. *Journal of the Structural Division*. 1974. Iss. 100, № 9. Pp. 1755–1769.
20. Ditlevsen O., Madsen-Chichester H.O. Structural reliability methods : monograph. John & Wiley Sons Ltd, 1996. 384 p.
21. Eurocode EN 1990:2002. Basis of structural design. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2002. 87 p.
22. Faber M. H. Basics of structural reliability. Zürich, Switzerland : ETH Swiss Federal Institute of Technology, 2002. 56 p.
23. Faber M. H. Risk and safety in civil engineering : Lecture Notes. Zürich, Switzerland : ETH Swiss Federal Institute of Technology, 2007. 335 p.
24. Holický M., Retief J. V., Diamantidis D., Viljoen C. On standardization of the reliability basis of structural design. In : *12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, CASP12*. Vancouver, Canada, July 12–15, 2015. 8 p.
25. Holický Milan, Miroslav Sýkora. Reliability Approaches Affecting the Sustainability of Concrete Structures. *Sustainability*. 2021. Iss. 13, № 5. P. 2627.
26. ISO 2394 : 2015. General principles on reliability for structures. ISO/TC 98/SC 2. Reliability of structures. Warszawa, 2015. 111 p.
27. Jitao Y., Liuzhuo C., Jun G., Ren X. Structural durability and concept system of structural reliability. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 304, № . P. 052035.
28. Mahmoodian M. Structural reliability assessment of corroded offshore pipelines. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020. Pp. 1–11.
29. Maier M. Die Sicherheit der Bauwerte und ihre Berechnung nach Granz kraften statt nach zulassigen Spannungen. Berlin : Springer Verlag, 1926. 150 p.
30. Rashki M. Structural reliability reformulation. *Structural Safety*. 2021. Iss. 88. P. 102006.
31. Song J., Kang W. H., Lee Y. J., Chun J. Structural System Reliability : Overview of Theories and Applications to Optimization. *ASCE – ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems. Part A : Civil Engineering*. 2021. Iss. 7, № 2. P. 03121001.
32. Tang Y., Jiang C., Li Y. The reliability analysis of existing RC member under multifactor mechanism influencing. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*. 2005. Vol. 25, № 2. Pp. 135–139.
33. Val D., Bljucer F., Yankelevsky D. Reliability evaluation in nonlinear analysis of reinforced concrete structures. *Structural Safety*. 1997. Vol. 19, № 2. Pp. 203–217.
34. Wang C. Structural Reliability and Time – Dependent Reliability. Springer, Cham, Switzerland, 2021. 371 p.

REFERENCES

1. Blikharsky Ya.Z. and Kopiika N.S. *Doslidzhennia poshkodzhenykh zalizobetonnykh elementiv, osnovni metody yikh vidnovlennia ta pidsylennia* [Research work on damaged reinforced concrete elements and their possible strengthening methods]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy* [Resource-saving Materials, Structures, Buildings and Structures]. Rivne, 2019, no. 37, pp. 316–322. (in Ukrainian).
2. Bolotyn V.V. *Prymenenye metodov teoryy veroiatnostei y teoryy nadezhnosti v raschetakh sooruzhenyi : monohrafiya* [Application of methods of probability theory and theory of reliability in the calculations of structures : monograph]. Moscow : Stroiyzdat Publ., 1971, 255 p. (in Russian).
3. DBN V.1.2-14:2018. *Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud* [General principles for reliability and constructive safety ensuring of buildings and civil engineering works]. Publ. offic. Kyiv : Minregion of Ukraine, 2018, 33 p. (State Building Norms of Ukraine). (in Ukrainian).
4. Kinash R.I. *Metody normuvannia tymchasovykh navantazhen ta otsiniuvannia nadiinosti budivelnykh konstruktsii za umov nepovnoi informatsii : dys. d-ra tekhn. nauk* [Methods of normalization of temporary loads and evaluation of the reliability of building structures in terms of incomplete information : dis. thesis]. Kyiv, 2000, 530 p. (in Ukrainian).
5. Kushchenko V.N. *Osnovnye pryntsyipy obespecheniya bezopasnosti stroytelnykh konstruktsiy* [Basic principles for ensuring the safety of building structures]. *Metallycheskiye konstruktsyy* [Metal Structures]. Makeevka : Izd-vo DonNASA, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 147–155. (in Russian).

6. Lantukh-Liashchenko A.Y. *Razvytye ydei nadezhnosti v stroytelnoi otrasly* [Development of ideas for reliability in the construction industry]. *Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial Construction and Engineering Structures]. Kyiv, 2015, no. 1, pp. 2–8. (in Russian).

7. Lantukh-Liashchenko A.I. *Ievrokod – novyi pidkhid v proektuvanni mostiv* [Eurocode – a new approach in bridge design]. *Avtomobilni dorohy i dorozhne budivnytstvo* [Roads and road construction]. Kyiv, 2013, iss. 88, pp. 277–288. (in Ukrainian).

8. Lobodanov M.M., Vehera P.I. and Blikharskyi Z.Ya. *Analiz vplyvu osnovnykh vydiv defektiv ta poskodzhen na nesuchu zdatnist zalizobetonnykh elementiv* [Analysis of the influence of the main types of defects and damages on the bearing capacity of reinforced concrete elements]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politehnika. Teoriia i praktyka budivnytstva* [Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic. Theory and practice of construction]. Lviv, 2018, no. 888, pp. 93–100. (in Ukrainian).

9. Pychuhyn S.F. *Nadezhnost stalnykh konstruktsiyi proyzvodstvennykh zdanyi : monohrafiya* [Reliability of steel structures of industrial buildings : monograph]. Moscow : Izd-vo ASV, 2011, 456 p. (in Russian).

10. Pichuhin S.F. *Nadiinist tekhnichnykh system : navch. posib.* [Reliability of technical systems : textbook]. Poltava : PDTU, 2000, 157 p. (in Ukrainian).

11. Posternak O.M. *Doslidzhennia vplyvu koefitsienta za pryznachenniam na riven nadiinosti pidsylenykh zghynalnykh zalizobetonnykh elementiv* [Investigation of the influence of the coefficient on purpose on the level of reliability of reinforced bending reinforced concrete elements]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia* [Urban and Territorial Planning]. Kyiv, 2015, pp. 431–439. (in Ukrainian).

12. Pshenyckyna V.A., Bohomolov A.N. and Churakov A. A. *Nadezhnost stroytelnykh system : ucheb. posobye* [Reliability of building systems : textbook]. Volhohrad : VolhASU, 2010, 40 p. (in Russian).

13. Raizer V.D. *Teoriya nadezhnosti v stroytelnom proektyrovanny : monohrafiya* [Reliability theory in construction design : monograph]. Moscow : Izd-vo ASV, 1998, 304 p. (in Russian).

14. Rzhanytsyn A.R. *Prymenenye statystycheskykh metodov v raschetakh sooruzhenyi na prochnost y bezopasnost* [Application of statistical methods in strength and safety calculations of structures]. *Stroytelnaia mekhanika y raschet sooruzhenyi* [Structural Mechanics and Design of Structures]. Moscow, 1952, no. 6, pp. 22–25. (in Russian).

15. Rzhanytsyn A.R. *Teoriya rascheta stroytelnykh konstruktsiyi na nadezhnost : monohrafiya* [The theory of calculating building structures for reliability : monograph]. Moscow : Stroiyzdat Publ., 1978, 239 p. (in Russian).

16. Streletskyi N.S. *Osnovy statystycheskoho ucheta koefitsiyenta zapasa prochnosti sooruzhenyi* [Fundamentals of statistical estimation for the safety factor of structures]. Moscow : Stroiyzdat Publ., 1947, 95 p. (in Russian).

17. Khotsyalov N.F. *Zapasy prochnosti* [Safety reserves]. *Stroytelnaia promyshlennost* [Building Industry]. Moscow, 1929, no. 10, pp. 10–15. (in Russian).

18. Yatsko F.V. *Modeliuvannia i prohozuvannia dovhovichnosti zalizobetonnykh elementiv transportnykh sporud na avtomobilnykh dorohakh : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk* [Modeling and forecasting of durability of reinforced concrete elements of transport constructions on highways : Phd thesis]. Kyiv : Nat. transp. un-t, 2015, 20 p. (in Ukrainian).

19. Ang A.H.S. and Cornell C.A. Reliability bases of structural safety and design. *Journal of the Structural Division*. 1974, iss. 100, no. 9, pp. 1755–1769.

20. Ditlevsen O. and Madsen-Chichester H.O. *Structural reliability methods : Monograph*. John & Wiley Sons Ltd, 1996, 384 p.

21. Eurocode EN 1990:2002. *Basis of structural design*. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2002, 87 p.

22. Faber M.H. *Basics of structural reliability*. Zürich, Switzerland : ETH Swiss Federal Institute of Technology, 2002, 56 p.

23. Faber M. H. *Risk and safety in civil engineering: Lecture Notes*. Zürich, Switzerland : ETH Swiss Federal Institute of Technology, 2007, 335 p.

24. Holický M., Retief J.V., Diamantidis D. and Viljoen C. On standardization of the reliability basis of structural design. In : 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, CASP12. Vancouver, Canada, July 12–15, 2015, 8 p.

25. Holický M. and Sýkora M. Reliability Approaches Affecting the Sustainability of Concrete Structures. *Sustainability*. 2021, iss. 13, no. 5, p. 2627.

26. ISO 2394 : 2015. *General principles on reliability for structures*. ISO/TC 98/SC 2. Reliability of structures. Warszawa, 2015, 111 p.

27. Jitao Y., Liuzhuo C., Jun G. and Ren X. Structural durability and concept system of structural reliability. In : IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2019, vol. 304, no. 5, p. 052035.

28. Mahmoodian M. Structural reliability assessment of corroded offshore pipelines. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020, pp. 1–11.

29. Maier M. *Die Sicherheit der Bauwerte und ihre Berechnung nach Granz kraften statt nach zulassigen Spannungen* [The security of the building values and their calculation according to high forces instead of permissible tensions]. Berlin : Springer Verlag, 1926, 150 p. (in German).

30. Rashki M. Structural reliability reformulation. *Structural Safety*. 2021, no. 88, p. 102006.
31. Song J., Kang W.H., Lee Y.J. and Chun J. Structural System Reliability : Overview of Theories and Applications to Optimization. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems. Part A : Civil Engineering*. 2021, iss. 7, no. 2, p. 03121001.
32. Tang Y., Jiang C., Li Y. The reliability analysis of existing RC member under multifactor mechanism influencing. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*. 2005, vol. 25, no. 2, pp. 135–139.
33. Val D., Bljoger F. and Yankelevsky D. Reliability evaluation in nonlinear analysis of reinforced concrete structures. *Structural Safety*. 1997, vol. 19, no. 2, pp. 203–217.
34. Wang C. *Structural Reliability and Time-Dependent Reliability*. Springer, Cham, Switzerland, 2021, 371 p.

Надійшла до редакції: 07.06.2021.