

ДОСВІД УПРОВАДЖЕННЯ ЙМОВІРНІСНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

EXPERIENCE IN IMPLEMENTING THE PROBABILITY METHOD FOR CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES

Пічугін С.Ф., д.т.н., професор, ORCID 0000-0001-8505-2130 (Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)

Pichugin S.F., DSc, Professor, ORCID 0000-0001-8505-2130 (National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”)

У статті послідовно розглянуто розроблені на протязі дев'яноста років підходи до впровадження загальних ймовірнісних методів розрахунку будівельних конструкцій. Описані етапи проведення статистичного аналізу коефіцієнта запасу, обґрунтування концепції резерву міцності і характеристики безпеки, залучення сучасних ймовірнісних методів з урахуванням фактору часу у національних нормах України.

The current method of calculating building structures by limit states (previously by allowable stresses) is essentially semi-probabilistic. The main parameters of the method – load values, strength characteristics of materials, dimensions of elements, etc. – have a variable statistical nature. They are described by probabilistic methods, on the basis of which deterministic design parameters are justified, which are subsequently used in calculations. Meanwhile, in parallel with this dual method, for many years, fully probabilistic (statistical) approaches to the calculations have been developed. The beginning of this process can be considered the end of the 1930s, when the probabilistic nature of the safety factor, represented in the canonical form of the product of factors, was discovered, and numerical values of the guarantee of the non-destructibility of the structure were obtained. The 1950s and 1960s were marked by proponents attempts of probabilistic methods to introduce the concept of strength reserve and safety characteristics into design practice. Since the 1970s, domestic specialists have been actively developing probabilistic methods, and their results have been implemented in regulatory documents. In recent years, publications have appeared with proposals for further implementation of probabilistic approaches in the calculation.

Ключові слова:

**Ймовірнісні методи, статистичні методи, коефіцієнт запасу, граничні стани
Probabilistic methods, statistical methods, safety factor, limit states**

Вступ. Діючий метод розрахунку будівельних конструкцій за граничними станами (раніше за допустимими напруженнями) є по суті напівймовірнісним (за кордоном названим «напівпробабілістичним»). Основні параметри методу – величини навантажень, міцнісні характеристики матеріалів, розміри елементів тощо – мають змінний статистичний характер. Їх досліджують і описують ймовірнісними методами, на основі яких обґрунтовують детерміністичні значення розрахункових параметрів. Між тим паралельно с цією двоїстою методикою на протязі багатьох років розробляють повністю ймовірнісні (статистичні) підходи до розрахунків будівельних конструкцій. Так склалося, що довгий час їх не вдавалося впровадити у методику будівельного проектування, незважаючи на перспективність результатів цього наукового напрямку.

Аналіз останніх досліджень. Початком розроблення ймовірнісного (статистичного) розрахунку будівельних конструкцій можна вважати кінець 1930-х років, коли відбувся справжній науковий наступ на коефіцієнт запасу, основу методу допустимих напружень, який здійснили вітчизняні і закордонні дослідники [1-3]. Було виявлено ймовірнісний характер коефіцієнта запасу, представленого у канонічній формі добутку співмножників, одержано чисельні значення гарантії неруйнівності конструкції [4,5]. 1950-60-ті роки відмічені безуспішними спробами прибічників ймовірнісних методів впровадити у проектну практику концепцію резерву міцності і характеристики безпеки [6,7]. Починаючи з 70-х років минулого сторіччя активно розробляють ймовірнісні методи вітчизняні фахівці, їхні результати частково впроваджені у нормативні документи України [8]. Останніми роками з'явилися публікації з пропозиціями подальшої імплементації ймовірнісних підходів у розрахунки будівельних конструкцій [9,10].

Постановка мети і задач дослідження. Треба підкреслити, що внаслідок того, що діючі норми будівельного проектування використовують фіксовані параметри, вибір яких базується на ймовірнісній основі, на протязі багаторічного проміжку часу дії методу допустимих напружень, а згодом і методу граничних станів основна увага розробників норм приділялася накопиченню і статистичній обробці даних щодо окремих компонентів методики розрахунків. Внаслідок цього поза увагою залишалися напрацювання розробників загально-ймовірнісних варіантів методики розрахунку будівельних конструкцій, які містять цінні наукові результати, актуальні і в теперішній час.

Метою і задачами дослідження є послідовний розгляд розроблених на протязі дев'яноста років підходів до впровадження загальних ймовірнісних методів розрахунку будівельних конструкцій.

Результати досліджень. Відомо, що основним принципом інженерного розрахунку є *умова неруйнівності*, відповідно до якої найбільше зусилля, яке діє в конструкції упродовж її служби S_{act} , має бути менше або, у крайньому разі, дорівнювати найменшому можливому за цей час граничному опоріві матеріалу конструкції R_{mat} . Умова неруйнівності може бути записана у розгорнутій формі в ув'язці з методикою допустимих напружень

$$\max S_{act} = nS \leq cR = \min R_{mat}, \quad (1)$$

де n – коефіцієнт запасу відносно розрахункових зусиль (напружень); c – перехідний коефіцієнт від фактичного напруження матеріалу до нормативного.

Якщо перенести коефіцієнт n у праву частину рівняння, одержується наступний вираз:

$$S \leq (c/n)R = kR, \quad (2)$$

де k – розрахунковий коефіцієнт запасу щодо нормативного опору матеріалу.

М.С. Стрілецький зазначив, що виконання нерівності (1) можна передбачати тільки з визначеною часткою ймовірності. Вперше було представлено структуру коефіцієнта запасу (2) у вигляді добутку співмножників, яку було названо *канонічною структурою коефіцієнта запасу*. Істотну особливість цих співмножників являє те, що вони можуть розглядатися незалежними один від одного. Кожний з коефіцієнтів, який характеризує яку-небудь особливість роботи споруди, залежить від великого числа причин і обставин, що можуть мати місце під час служби споруди, і тому найкраще він може бути описаний за допомогою *статистичного методу* [5].

Було показано, що умова неруйнівності (1) вимагає сполучення крайніх значень кривих розподілу nS і cR . Однак, оскільки ці криві є асимптотичними, виконання умови неруйнівності можливо тільки з певною точністю. Для цієї мети було запропоновано умовно обривати зазначені криві і відкидати площі кривих за фактичною точкою перетину, а добуток відкинутих площ $\omega_1 \cdot \omega_2$ розглядати як міру неточності твердження, що споруда неруйнівна.

Відповідно до цього, величину

$$\Gamma = 1 - \omega_1 \cdot \omega_2, \quad (3)$$

можна вважати як міру точності твердження, що споруда неруйнівна.

Тому Γ (3) було названо величиною *гарантії неруйнівності споруди*, причому підкреслено, що вона є умовною величиною, зв'язаною з виконанням вимоги (1). Оцінку наближеності даного підходу наведено у публікації [4].

Ще у 1938 р. М.С. Стрілецький визначив чисельні значення гарантії неруйнівності, тобто одержав перші результати впровадження статистичного методу розрахунку конструкцій. Розглядалися сталеві ферми під холодну залізобетонну покрівлю, враховувалися статистичні дані щодо міцності сталі, навантажень від снігу і вітру. Було показано, що сталеві ферми, розраховані за нормами 1934 р., мали дуже високі величини гарантії неруйнівності $\Gamma = 1 - 8,5 \cdot 10^{-8}$. Зазначені міркування були прийняті до уваги, коли у розпал Другої світової війни в 1942 р. допустимі напруження сталевих конструкцій було підвищено на 200 кгс/см² і прийнято для конструкцій зі сталі Ст3 такими, що дорівнюють 1600 кгс/см² (більше на 12,5 %).

У 40-і роки ХХ століття з'явилися пропозиції впровадження повністю статистичних методів проектування. Апологетом такого підходу був О.Р. Ржаніцин, який ще з 1947 р. агітував за статистичний метод [5]. Він нагадував, що неточність нормативного розрахунку за допустимими напруженнями пов'язана з наступними факторами:

- розкидом значень характеристик будівельних матеріалів, зумовлених існуючою технологією їх виготовлення;
- відхиленнями від розрахункових значень діючих навантажень, що визначаються природними впливами, які не залежать від волі людини (наприклад, вітрове навантаження);
- неточностями геометричних розмірів конструкцій, обумовлених застосовуваними методами виготовлення та збирання конструкцій.

Для отримання даних про ці статистичні неточності потрібен масовий експеримент з побудовою дослідних кривих розподілу. Характер цих кривих можна визначити також теоретичним шляхом. Допускаючи наближеність розрахунку, можна також використовувати статистичні характеристики: середню величину, стандарт, іноді коефіцієнт асиметрії.

При цьому підходить умова безвідмовної роботи (неруйнівності) конструкції має наступний вигляд:

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} \geq 0, \quad (4)$$

де $\tilde{R}$ – узагальнена випадкова несуча здатність конструкції;
 $\tilde{S}$ – узагальнене випадкове навантаження на конструкцію;
 $\tilde{Y}$ – характеристика, яку було названо *резервом міцності*.

Математичне сподівання і стандарт резерву міцності визначається, як для лінійної функції

$$\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S}; \quad \hat{Y} = \sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}. \quad (5)$$

Параметр, що дорівнює $\beta = \bar{Y} / \hat{Y}$ було названо *характеристикою безпеки* (О.Р. Ржаніцин [1]) або *індексом безпеки* (С.А. Корнелл [7]), вони

встановлюють ймовірність відмови (Q) і безвідмовної роботи (P) особливо просто у випадку нормального розподілу резерву міцності Y :

$$Q(Y < 0) = 0,5 - \Phi(\beta), \quad P(Y \geq 0) = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (6)$$

де $\Phi(\beta)$ – функція Лапласа

О.Р. Ржаніцин так формулював основну концепцію статистичного методу: «Отримавши з тим чи іншим ступенем точності шукану статистичну сукупність, наприклад, розподіл несучої здатності споруди, ми можемо зупинитися на такому мінімальному значенні цієї несучої здатності, яка має певну розумну, дуже малу ймовірність її появи. Це значення і може бути прийнято за допустиму несучу здатність, за якою має призначатися навантаження на дану споруду» [1]. Для того часу (1940–1950 рр.) цей підхід сприймався як сміливий і справжній революційний.

При цьому коефіцієнт запасу був пов'язаний з характеристикою безпеки наступною формулою:

$$\beta = (k - 1) / \sqrt{V_r^2 k^2 + V_q^2}, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт запасу, рівний відношенню середньої очікуваної несучої здатності до середніх очікуваних робочих напружень; V_r , V_q – коефіцієнти варіації несучої здатності та навантаження.

Підготовка і початок використання розрахунків за граничними станами (1950-ті роки) активізували прибічників статистичних методів проектування. Вони справедливо відмічали певні недоліки нового методу розрахунку конструкцій і в якості альтернативи пропонували статистичний метод з такими основними положеннями [5]:

- нормується умовна ймовірність переходу через граничний стан, в якості параметру якої використовується характеристика безпеки β ;
- запропоновано орієнтовні диференційовані значення $\beta = 2 - 4,5$ для будівель та споруд різної капітальності та відповідальності (мабуть, вперше);
- прийнявши відповідну β , визначаються коефіцієнти навантаження k_n , однорідності k_0 та результуючий коефіцієнт запасу k за формулою (7).

У цей же час із програмною статтею, присвяченою авторському статистичному методу, виступив авторитетний фахівець Б.І. Беляєв [5]. У ній він справедливо зазначив, що всі величини, що входять до розрахунку конструкцій (навантаження, межа текучості сталі, геометричні характеристики перерізу елементів, коефіцієнт для центрально-стиснутих елементів) є випадковими. Однак при цьому він безапеляційно стверджував, що всі їх відхилення від середніх значень підкоряються нормальному закону розподілу. Це положення, справедливе для межі текучості, кранових навантажень, геометричних характеристик, випадкових недосконалостей,

необґрунтовано поширювалося на снігові і вітрові навантаження. Як загальний результат застосування розробленого загального методу було запропоновано величини нормативного напруження для різних випадків дії сил на конструкції. Для їхнього обґрунтування використовувався відомий критерій «трьох сигма», що відповідає ймовірності двостороннього перевищення – 0,00272, одностороннього – 0,00136. Було наведено (без достатнього обґрунтування) отримані диференційовані значення коефіцієнта запасу. Таким чином, автор пропозицій консервативно залишався в рамках методики допустимих напружень, намагаючись показати, що його методика більш економічна, ніж метод граничних станів. Пізніше загальний підхід було застосовано до залізобетонних згинальних і стиснутих елементів, були отримані громіздкі формули, виконані за ними числові приклади показали економію 11 – 22%.

Пропозиції про побудову системи факторів запасу повністю на основі статистичного методу не одержали підтримки ні у 1950-ті роки, ні пізніше, хоча й було визнано доцільним використання математичної статистики як важливого допоміжного засобу.

Б.І. Беляєв продовжив боротьбу за свій статистичний метод розрахунку будівельних конструкцій (1965 р.) [5], докладно розглядаючи наступні зауваження противників статистичного методу:

а) потрібна дуже тривала робота зі збирання вихідних статистичних даних для достовірного вибору законів розподілу випадкових аргументів, особливо «хвостових частин»;

б) випадкові параметри, що визначають роботу конструкції, діляться на «постійні», що не змінюються з часом (опір матеріалів, геометричні параметри, постійні навантаження), та тимчасові навантаження, що діють багаторазово; вважається, що вони настільки принципово різні, що для їхнього спільного обліку не можна приймати закони теорії ймовірностей;

в) у статистичному методі приймається єдина характеристика безпеки $\beta = 3$, хоча для різних законів розподілу вона відповідає різній ймовірності перевищення;

г) руйнування конструкції не може бути масовою подією, і статистичне тлумачення ймовірності його втрачає сенс; крім того, однорідні умови для роботи споруди та конструкції рідко здійсненні.

Заперечення до наведених зауважень.

а) *Закони розподілу випадкових величин.* Значна частина розрахункових величин розподілена нормально (опір матеріалів, об'ємні ваги матеріалів, геометричні параметри перерізу, випадкові викривлення). Тимчасові навантаження (атмосферні, температурні, кранові) можна розглядати як статистичні сукупності максимумів, що описуються теорією розподілів крайніх членів вибірки. Для цього пропонується використовувати показовий закон, що успішно застосовується метеорологами для швидкостей вітру.

б) *Багаторазове завантаження конструкції тимчасовими навантаженнями.* Пропонується замінювати їх еквівалентними одноразовими із зміненими середнім та стандартом.

в) *Значення характеристики безпеки.* Обґрунтовується на прикладах, що і при показовому та логнормальному розподілах можна застосовувати β за нормальним законом.

г) *Метод розрахунку конструкцій не будується на статистиці руйнувань конструкцій.* Робота конструкцій, виготовлених із матеріалів із випадковими властивостями, під дією випадкових навантажень, безумовно, масове явище. «Це явище багаторазово реалізується в практично однорідних умовах (матеріал, навантаження)».

Цю дискусію було завершено оптимістичним висновком: «Можна сподіватися, що заперечення проти статистичного методу розрахунку будівельних конструкцій будуть зняті, і цей прогресивний метод знайде застосування у практиці проектування» [5]. Як ми тепер знаємо, тоді цим надіям не судилося здійснитися.

У 1967 р. О.Р. Ржаніцин опублікував короткий огляд (бібліографія з 29 джерел) розвитку ймовірнісних методів розрахунку споруд. Він зазначив, що у чинних нормах розрахунку споруд випадковий характер навантажень був відображений недостатньо повно, і перекинув місток до *теорії надійності будівельних об'єктів*: «Всю сукупність ймовірнісних розрахунків споруд на міцність іноді називають теорією надійності будівель та споруд, приєднуючи сюди питання зміни придатності в часі внаслідок корозії, старіння матеріалу тощо. Теорія надійності в будівельній справі ще не набула великого розвитку, але застосовується з успіхом для вирішення завдань машинобудування та роботи різних апаратів».

З подальшим розвитком ймовірнісного методу, пізніше (1973 р.) було вирішено завдання визначення економічно обґрунтованої надійності споруди [5]. Витрати, пов'язані зі зведенням споруди та можливими її пошкодженнями протягом заданого терміну служби визначалися як

$$R = C + VU, \quad (8)$$

де C – первісна вартість зведення споруди; V – ймовірність її пошкодження; U – збитки, викликані цим пошкодженням, що включають вартість відновлення та збиток, завданий внаслідок порушення процесу експлуатації. Далі знаходиться мінімум математичного очікування цих витрат і вибираються оптимальні забезпеченості для граничних станів.

Переходячи до 90-х років ХХ-го сторіччя, підкреслимо, що українські фахівці підготували основоположні Державні будівельні норми ДБН В.1.2-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд», які врахували набутий міжнародний досвід та суттєво розвинули основні засади ймовірнісного методу розрахунку конструкцій. Було вперше допущено можливість застосування ймовірнісних методів для оцінювання рівня безвідмовності конструкцій за наявності

достатньої статистичної інформації для унікальних та особливо відповідальних конструкцій.

Описана вище ймовірнісна модель на основі випадкових величин (3) реалізована у вітчизняних нормах у дещо іншій формі і з іншими позначеннями. В якості основних показників надійності використовуються ймовірність відмови $P_f(T_{ef})$ або дальність відмови β . Для конструкцій, відмова яких призводить лише до економічних збитків, рекомендовано призначати доцільні значення P_i^{ex} і β_i^{ex} виходячи із умови мінімізації витрат на їх виготовлення, монтаж, експлуатацію і ліквідацію збитків від відмови.

У ДБН В.1.2-14-2009 також наведено варіант імовірнісного розрахунку з урахуванням фактору часу. Цей сучасний підхід сформовано за результатами досліджень, проведених науковою школою «Надійність будівельних конструкцій», яка багато років працює у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» [8]. Було успішно застосовано ймовірнісну модель випадкових процесів, у якій у виразі (3) $\tilde{S}(t)$ – зусилля (або напруження) у конструкції у формі випадкового процесу; $\tilde{R}(t)$ – випадковий процес або випадкова величина $\tilde{R}$ несучої здатності; $\tilde{Y}(t)$ – випадковий процес резерву несучої здатності конструкції. У таких умовах відмова конструкції трактується як *викид* випадкового зусилля $\tilde{S}(t)$ за випадковий рівень несучої здатності $\tilde{R}(t)$ або як викид випадкового процесу $\tilde{Y}(t)$ у від’ємну область.

Якщо навантаження і несуча здатність описуються стаціонарними або квазістаціонарними випадковими процесами, оцінка ймовірності відмови конструкції може бути визначена за кількістю викидів $N_+(t)$ як

$$Q(t) \cong N_+(t) = \omega_q f_Y(\beta) t / (\beta_\omega \sqrt{2\pi}). \quad (9)$$

Ця формула одержана в роботі [6], у ній прийняті такі позначення: ω_q – ефективна частота випадкового процесу резерву несучої здатності; $f_Y(\beta)$ – ордината густини розподілу функції резерву несучої здатності $\tilde{Y}(t)$, що відповідає значенню характеристики безпеки β ; t – наробіток конструкції; β_ω – коефіцієнт широкосмуговості випадкового процесу $\tilde{Y}(t)$.

Якщо $\tilde{R}(t)$ та $\tilde{S}(t)$ розподілені нормально, тоді $\tilde{Y}(t)$ також має нормальний розподіл, і формула для $Q(t)$ одержує такий вигляд:

$$Q(t) = \omega_q \exp(-0,5\beta^2 t) / (2\pi\beta_\omega). \quad (10)$$

Спираючись на формулу (10) і задаючись нормативним значенням імовірності відмови $[Q]$, легко визначити відповідну характеристику безпеки

$$\beta = \{2 \ln[\omega_q t / (2\pi [Q] \beta_\omega)]\}^{1/2}. \quad (11)$$

Викладену методику включено в норми в наступній формі: вірогідність досягнення конструкцією відмови за встановлений термін служби T_{ef} визначається як

$$P_f(T_{ef}) = K_0 f_\gamma(\beta) T_{ef}. \quad (12)$$

Тут позначено: $f_\gamma(\beta)$ – щільність нормованого розподілу випадкових значень величини резерву несучої здатності $\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S}$ при значенні, що відповідає дальності відмови (характеристиці безпеки) β ; K_0 – частотна характеристика.

Відмітимо, що імовірнісний підхід враховано у ДБН В.1.2-14-2018 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» у процедурі прогнозування можливих аварійних ситуацій та оцінці ризику P виникнення збитків у наступному розгорнутому форматі:

$$P = P(H) \times P(A/H) \times P(T/H) \times P(D/H) \times C, \quad (13)$$

де $P(H)$ – імовірність виникнення небезпечної події чи явища; $P(A/H)$ та $P(T/H)$ – імовірності зустрічі небезпеки з об'єктом у просторі та у часі відповідно; $P(D/H)$ – імовірність того, що загроза H створить збитки D ; C – відносні збитки.

Сучасний погляд на перспективи переходу до нового покоління норм проєктування, побудованих на ймовірнісній основі, викладено у монографії, опублікованій А.В. Перельмутером разом з автором статті [10]. У ній підкреслено, що запаси міцності призначені для компенсування основних типів причин відмови:

- 1) навантаження мають вищі значення, ніж передбачалося;
- 2) матеріал має гірші властивості, ніж передбачалося;
- 3) теорія аналізованого механізму відмови недосконала;
- 4) можливий прояв невідомих і тому неврахованих причин відмови;
- 5) можливі людські помилки (наприклад, у проєкті).

Перші два варіанти можуть бути загалом класифіковані як мінливості розрахункових параметрів, тому вони доступні для ймовірнісного оцінювання. Останні три типи причин відмови оперують не ймовірностями, а можливостями, їх важко або навіть неможливо подати в ймовірнісних термінах, і тому вони належать до розряду нестатистичної невизначеності. «Тому ймовірнісний підхід має бути лише одним із кількох інструментів для оцінювання ризику. Очевидно, що обом підходам притаманні свої переваги, і

не конструктивно розглядати їх як конкурентів, оскільки жодний із них не може розкрити всю правду про ризик та безпеку» [10].

Висновки і рекомендації. Проаналізовано багаторічний досвід розроблення ймовірнісних (статистичних) підходів до розрахунків будівельних конструкцій. Окреслено коло задач, для яких притаманні саме статистичні моделі розв'язання. Підкреслено перспективність результатів цього наукового напрямку у створенні нового покоління норм проектування.

1. Пічугін С.Ф. Етапи розвитку методу допустимих напружень як основи методу граничних станів // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. К.: Вид-во «Сталь», 2022. Вип. 29-30. С. 21-54.

Pichuhin S.F. Etapy rozvytku metodu dopustymykh napruzhen' yak osnovy metodu hranychnykh staniv // Zbirnyk naukovykh prats' Ukrayins'koho instytutu stalevykh konstruktсий im. V.M. Shymanovs'koho. K.: Vyd-vo «Stal'», 2022. Vyp. 29-30. С. 21-54.

2. Freudenthal A.M. The Safety of Structures // Proceedings ASCE, 1947. No. 112,1. P. 125-180.

3. Wierzbicki W. Safety of Structures as a Probability Problem // Przegląd Techniczny, 1936. P. 690-696.

4. Пічугін С.Ф., Махінко А.В. Використання концепції «гарантії неруйнівності» в оцінках надійності металевих конструкцій // Металеві конструкції, 2003. Том 6.1. С. 19-26.

Pichuhin S.F., Makhin'ko A.V. Vykorystannya kontseptsiyi «harantiyi neruynivnosti» v otsinkakh nadiynosti metalevykh konstruktсий // Metalevi konstruktсийi, 2003. Tom 6.1. S. 19-26.

5. Пічугін С.Ф. Етапи розвитку загальної методики розрахунку будівельних конструкцій. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2024. 400 с.

Pichuhin S.F. Etapy rozvytku zahal'noyi metodyky rozrakhunku budivel'nykh konstruktсий. Poltava: TOV «ASMI», 2024. 400 с.

6. Пічугін С.Ф. Розрахунок надійності будівельних конструкцій. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2016. 520 с.

Pichuhin S.F. Rozrakhunok nadiynosti budivel'nykh konstruktсий. Poltava: TOV «ASMI», 2016. 520 s.

7. Cornell C.A. Bounds on the Reliability of Structural Systems // Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 93, No. ST., 1967. P. 171-200.

8. Pichugin Sergiy. Scientific School «Reliability of Building structures»: new results and perspectives // Academic journal Industrial Machine Building, Civil Engineering. 2 (53). Poltava: PolNTU, 2019. P. 5-12.

9. Перельмутер А.В., Пічугін С.Ф. Відносно нової редакції ДБН В.1.2-14:2018 // Наука та будівництво. Том 32 №2 (2022). С. 19-29.

Perel'muter A.V., Pichuhin S.F. Vidnosno novoyi redaktsiyi DBN V.1.2-14:2018 // Nauka ta budivnytstvo. Tom 32 №2 (2022). S. 19-29.

10. Перельмутер А.В., Пічугін С.Ф. Метод граничних станів. Загальні положення та застосування в нормах проектування. К.: Видавництво «Софія-А», 2024. 253 с.

Perel'muter A.V., Pichuhin S.F. Metod hranychnykh staniv. Zahal'ni polozhennya ta zastosuvannya v normakh proyektuvannya. K.: Vydavnytstvo «Sofiya-A», 2024. 253 s.