

85 РОКІВ СТАНОВЛЕННЯ ІДЕЙ НАДІЙНОСТІ В БУДІВНИЦТВІ

© Лантух-Лященко А.І., 2015

Наведено короткий аналітичний огляд розвитку теорії надійності будівельних конструкцій. Аналіз розвитку теорії виконаний у межах роботи з адаптації в Україні пакета нормативних документів Єврокодів та підготовці національних додатків до них.

Ключові слова: надійність, характеристика безпеки, функція граничного стану.

A brief analytical overview of the structural reliability theory. Analysis of the development of the theory in the framework of adaptation in Ukraine Eurocode package of normative documents and preparation of national annexes carried out.

Key words: reliability, reliability index, limit state function.

Винесені в заголовок “85 РОКІВ”, умовний термін, період, до якого, за задумом автора, належать публікації, що згадуються в статті. Коли і хто сформулював саме поняття “надійність” стосовно об’єктів будівництва – автору невідомо. У всякому разі, це було значно раніше від епохи Блеза Паскаля (1623–1662 рр.) або П’єра Лапласа (1749–1842 рр.), засновників теорії ймовірностей. Думаю, що на інтуїтивному рівні, ідеї надійності вже були присутні в першому законі, що визначав технічні умови будівництва доріг у Римі, в 451 році до н. е.

Огляд, наведений в статті, – результат аналізу, виконаного автором в останні 10–15 років у зв’язку з розробленням національних норм будівництва та експлуатації, і особливо уважного вивчення проблеми надійності при адаптації (як прийнято говорити: *гармонізації*) Єврокодів, підготовки національних додатків до них. Метою цієї публікації не є формулювання будь-яких рекомендацій з проблеми надійності. Мета полягає іншому – привернути увагу проектувальників, будівельників, інженерів системи експлуатації до тези: технічна досконалість конструкції, якісне будівництво об’єкта, мінімізація відмов в експлуатації ґрунтуються на принципах надійності. (Ця теза анітрохи не скасовує вимог норм, скоріше навпаки!).

У наведеному тут короткому ретроспективному огляді ми спробуємо подати основні віхи на шляху становлення теорії надійності в будівництві. Для нас становлення і розвиток основ, сучасне загальноприйняте трактування понять надійності в сфері будівництва пов’язується, насамперед, з революційними для того часу роботами Н. С. Стрілецького [27, 28] 1947–1948 рр. і А. Р. Ржаніцина [21–23] 1947–1952 рр. У цих роботах і був закладений базис сучасної теорії надійності, що являє собою викладення двох фундаментальних наукових ідей:

- показана статистична природа міцності конструкції і параметрів її навантаження та доведено необхідність ймовірнісної оцінки працездатності споруди;
- закладені основи методу граничних станів.

Вперше ідеї статистичного підходу до оцінки міцності конструкцій були викладені в роботах М. Майєра в 1926 р. [18], Н. Ф. Хоціалова в 1929 р. [29] і Н. С. Стрілецького в 1947 р. [27]. Роботи ж А. Р. Ржаніцина (1947–1952 рр.) були істотним розвитком цих ідей, їх суворого математичного формулюванням. (Детальну бібліографію робіт А. Р. Ржаніцина і Н. С. Стрілецького зацікавлений читач знайде в монографії В. В. Болотіна [6].)

У цьому, далеко не повному списку перших, особливе місце займає робота А. Р. Ржаніцина 1952 р [21], в якій викладена концепція безпеки споруди, що являє собою фундамент теорії надійності. У роботі 1952 р. принципові положення концепції безпеки споруди А. Р. Ржаніцин сформулює як ймовірнісне вирішення проблеми

$$Z = R - E \geq 0 \text{ або } R / E \geq 1 \quad (1)$$

в припущенні, що узагальнені опір елемента R , навантаження E і резерв міцності Z суть випадкові змінні, мають нормальний розподіл і взаємно не корелюють. Вирішенням проблеми стала формула для визначення коефіцієнта запасу, названого А. Р. Ржаніциним “*характеристикою безпеки*”:

$$\gamma = \frac{\xi - 1}{\sqrt{A_r^2 \xi^2 + A_q^2}}, \quad (2)$$

де (в позначеннях і визначеннях роботи [21]) ξ – коефіцієнт запасу, який є відношенням середньої очікуваної несучої здатності до середнього навантажувального ефекту; A_q – коефіцієнт мінливості навантаження (відношення стандарту навантаження до його середнього значення); A_r – коефіцієнт мінливості несної здатності; γ – характеристика безпеки.

(У тексті роботи [0] є зауваження, без посилання на публікацію, про те, що формулу (2) автор отримав ще в 1947 р.)

Пізніше цей підхід у західній літературі буде названо “*методом другого моменту*” (*second-moment method*) [35] і стане основою проектування конструкцій заданої надійності. Робота ж А.Р. Ржаніцина 1952 р. [21] практично залишилася невідомою у світі. Тільки в 1957 р. один переклад її англійською мовою був опублікований у виданнях Канадського дослідного інституту в Оттаві [53]. (Посилання на цю роботу можна знайти у відомій монографії Р. Е. Мельчерса [50]).

П’ятдесяті – початок шістдесятих років минулого століття були роками бурхливого розвитку в усьому світі нового напрямку в прикладній математиці та інженерії – теорії надійності, що використовує фундаментальні принципи теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії випадкових функцій. З тих пір дослідження надійності розвинулися в потужну прикладну математичну дисципліну, з’явилося нове поняття – “*надійносне проектування*”.

З’явилися нові фундаментальні дослідження в теорії ймовірностей. Видатний російський математик Б. В. Гнеденко знайшов три класи граничних розподілів [7, 8, 42]. Можна вважати, що це і був перший крок у стрімкому бурхливому розвитку теорії надійності. У цей період, за висловом В. В. Болотіна [4], виявилось глибше розуміння принципів теорії надійності і перехід “від елементарних методів теорії ймовірностей до методів теорії випадкових функцій”. Три взаємопов’язані наукові ідеї лягли в основу нового напрямку:

– зовнішні впливи на конструкцію і її поведінку під час експлуатації суть випадкові процеси, що відбуваються у часі;

– надійність ототожнюється з імовірністю знаходження параметрів конструкції в деякій допустимій ділянці, викид параметрів з цієї ділянки трактується як відмова;

– відмова конструкції є наслідком поступового накопичення пошкоджень.

Ці принципи повною мірою знайшли своє втілення у фундаментальних дослідженнях В. В. Болотіна 1960 – 1970 рр. і опублікованих у монографіях [4, 5, 6]. У 1978 р. публікується монографія А. Р. Ржаніцина [25], в якій систематично викладені багаторічні дослідження автора, що становлять теоретичні засади розрахунку будівельних конструкцій на надійність і стали базисом всіх будівельних норм Радянського Союзу.

У 1982 р. А. Р. Ржаніцин видав підручник курсу будівельної механіки [24], в якому великий розділ присвячений методології розрахунку будівельних конструкцій на надійність. У будівельних ВНЗ вводиться обов’язковий курс теорії надійності. Публікуються дослідження з теорії випадкових процесів [13, 19, 26], що відкривають нові шляхи становлення теорії надійності в будівництві. Що стосується прикладних досліджень надійності у проектуванні будівельних конструкцій, то відзначимо найвідоміші монографії В. Райзера [20], В. П. Чиркова [30].

Згадані вище монографії В. В. Болотіна і А. Р. Ржаніцина у сімдесятих роках ХХ ст. були перекладені англійською мовою і стали “каталізатором” бурхливого розвитку теорії надійності в Європі і в Америці. Початок цього періоду в західній літературі пов’язують з роботою К. А. Корнелла (Cornell C. A.) [35]. Ось як описує цей період Р. Е. Мельчерс у своїй монографії [50]: “В силу йому притаманної простоти, так званій, “метод другого моменту” стає вельми популярним, завдяки раннім роботам Масра (1926 р.) [48], Фрейденталя (1956) [41], Ржаніцина (1957 р.) [53] і Баслера (Basler E., 1961 р.) [31]. Однак знадобився час до кінця 1960-х років, щоб оцінити і прийняти ідеї методу, викладеного в узагальненій формі в роботі Корнелла 1969 року [35]”.

У західній літературі цю роботу вважають основоположною в сучасній теорії надійності будівельних конструкцій. У ній центральна ідея концепції безпеки споруди А. Р. Ржаніцина (1), (2) представлена з широкими узагальненнями. Враховуючи, що змінні R і E мають спільну розмірність, вирішення проблеми (1) формулюється як пошук ймовірності руйнування елемента, виражені відомим інтегралом – згортокою у функції однієї змінної X:

$$p_f = P(R - E \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_E(x) dx, \quad (3)$$

де $F_R(x)$ – інтегральна функція розподілу узагальненого опору елемента R; $f_E(x)$ – функція щільності розподілу узагальненого навантаження E.

Інтеграл (3) у разі нормального закону розподілу має аналітичний вираз:

$$p_f = P(R - E \leq 0) = P(Z \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right), \quad (4)$$

де p_f – ймовірність відмови; μ_Z – середнє значення резерву міцності Z; σ_Z – середньоквадратичне відхилення Z; (перші моменти розподілу – математичне сподівання і стандарт); Φ – нормальна функція розподілу.

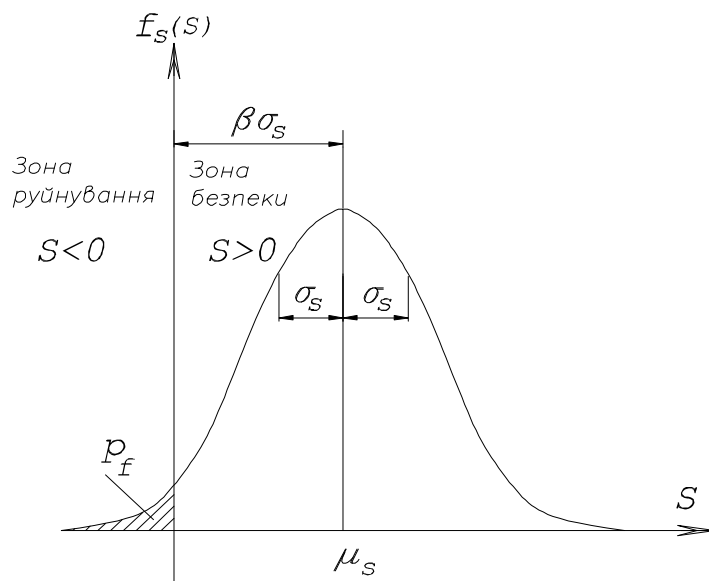


Рис. 1. Функція розподілу узагальненого резерву міцності Z

Параметр – відношення середнього значення резерву міцності μ_z до середньоквадратичного відхилення σ_z – в (4) К. А. Корнелл назвав “індекс безпеки” (“safety index”) і позначив символом β :

$$\beta = \mu_z / \sigma_z \quad (5)$$

Замінивши в (5) μ_z і σ_z їх середніми значеннями, змінних R і E

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_E \quad (6a)$$

$$\sigma_Z = (\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5} \quad (6b)$$

і підставивши в (4), отримаємо

$$p_f = \Phi \left[\frac{-(\mu_R - \mu_E)}{(\sigma_R^2 + \sigma_E^2)^{0,5}} \right] = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

Неважко бачити, що вираз характеристики безпеки (7) збігається з формулою А. Р. Ржаніцина (2), якщо чисельник і знаменник в (7) розділити на μ_E .

Використовуючи визначення характеристики безпеки по (7), можна отримати формули β для інших законів розподілу. Так, у випадку логнормального закону формула має вигляд

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left\{ \frac{\mu_R}{\mu_E} \left[\frac{(1 + V_E^2)}{(1 + V_R^2)} \right]^{1/2} \right\}}{\left\{ \ln \left[(1 + V_R^2) \cdot (1 + V_E^2) \right] \right\}^{1/2}}, \quad (8)$$

де V_R, V_E – коефіцієнти варіації відповідно узагальнених опору R і навантаження E .

Зауважимо, що при обмеженнях $V_R < 0,3$ і $V_E < 0,3$ характеристика безпеки (8) визначається простою наближеною залежністю:

$$\beta_{LN} = \frac{\ln(\mu_R / \mu_E)}{\sqrt{V_R^2 + V_E^2}} \quad (9)$$

У роботі К. А. Корнелла [35] проста модель надійності, в якій розглядаються дві випадкові величини R і E , із заданим законом розподілу, узагальнюється на випадок n величин. В узагальненій моделі розглядається n -вимірний вектор випадкових змінних, якими описується задача. У координатах ROE (рис. 1), вводиться лінійна функція граничного стану (резерв міцності в термінології А. Р. Ржаніцина), що розділяє координатну площину на дві зони – безпечну і зону руйнування

$$G(\mathbf{X}) = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n, \quad (10)$$

де $\mathbf{X} = [X_1 X_2 \dots X_n]^T$ – n -вимірний вектор незалежних випадкових змінних – топологічних, механічних параметрів елемента і параметрів навантаження; a_{i-1} – константи.

Функція граничного стану набуває значення:

- $G(x) > 0$ – в ділянці, де гарантовано не буде досягнуто граничного стану (рис. 1);
- $G(x) = 0$ – на кордоні двох ділянок;
- $G(x) < 0$ – в ділянці, де перевищено граничний стан.

(Тут $\mathbf{X} = \mathbf{x}$ – вектор випадкових змінних, відповідних до проектної точки).

Модель оцінки надійності (7) отримала елегантну геометричну інтерпретацію: в координатній площині узагальнених випадкових змінних – опору елемента R і навантаження E (рис. 2).

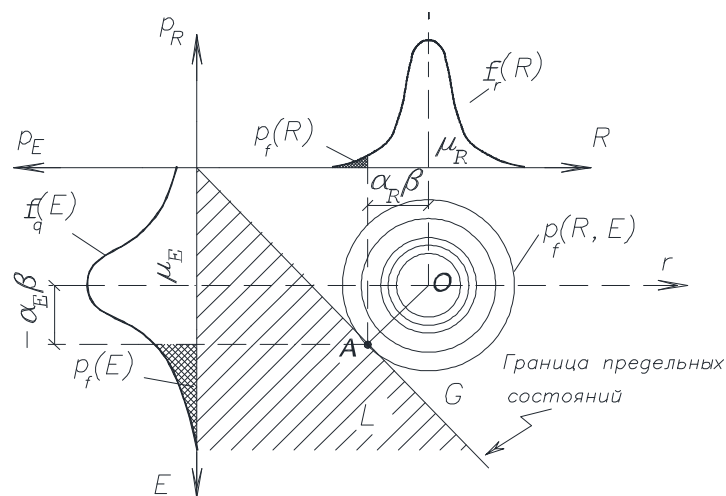


Рис. 2. Геометрична інтерпретація характеристики безпеки

У цих координатах характеристика безпеки β – це найкоротша відстань від початку координат до проектної точки, що лежить на кривій контуру щільності розподілу (у разі нормального розподілу – це окружність).

З геометричних міркувань випливає, що довжина перпендикуляра з центра кола на граничну пряму (рис. 1, 2) дорівнює характеристиці безпеки. Точку A -перетину перпендикуляра з граничною прямою $G(R=E) = 0$ називають проектною точкою. Її координати r_d , q_d суть проектні значення випадкових змінних:

$$r_d = \alpha_R \beta; q_d = -\alpha_E \beta, \quad (11)$$

де α_R , α_E – напрямні косинуси нормалі OA

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}; \quad \alpha_E = \frac{-\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (12)$$

Модель оцінки надійності у формі К. А. Корнелла сьогодні стала визнаним інструментом управління надійністю проєктованих конструкцій не тільки в країнах Європи в межах Єврокодів, але і у всьому світі. Узагальнення К. А. Корнелла [35] послужили базою для подальшого розвитку моделі в роботах П. Тофт-Крістенсена, М. І. Бейкера [59] і О. Дітлевсен [36, 37], що подали концепцію визначення характеристики безпеки в загальному випадку: довільної функції розподілу і нелінійної функції граничного стану.

У 1974 р А. М. Хасоіфер і Н. К. Лінд (AM Hasofer, NC Lind) в роботі [43] ввели безрозмірну функцію граничного стану і, використовуючи рівняння П. Тофт-Крістенсена і М. І. Бейкера [59] для визначення відстані до граничної криволінійної функції, запропонували спосіб лінеаризації проблеми.

На початок 1990 років склалося чітке математичне трактування прийомів оцінки надійності. До цього часу належать роботи О. Дітлевсен [36, 37], Д. Венціано [61, 62], в яких узагальнено характеристику безпеки як геометричну величину за довільної функції граничного стану і довільного закону розподілу. Публікуються монографії, які систематизують дослідження в теорії надійності останніх 20 років [1, 37, 47, 50, 57, 59, 60].

Особливу сторінку в історії розвитку теорії надійності займає проблема надійності в функції часу. Вже в 1970-х роках у публікаціях В. В. Болотіна [6, 4] наведено розв'язання задач будівельної механіки методами теорії випадкових функцій. Пізніше, в 1980-х роках публікується велика кількість робіт з проблеми надійності в термінах стохастичної задачі (англ. *time-variant*), тобто у функції часу:

$$p_r(t) = P[R(t) - E(t) \leq 0] \quad (11)$$

Тоді резерв міцності, відповідно до постановки проблеми (11), записується також у функції часу:

$$Z(t) = R(t) - E(t) \quad (12)$$

Аналітичні вирішення проблеми (11), (12) доволі складні і малодоступні для практичних застосувань у будівельному проєктуванні. Багато відомих сучасних аналітичних розв'язків проблеми доволі докладно подано в монографіях В. В.Болотіна [3] і Р. Е. Мельчерса [50].

Вагомою альтернативою аналітичним моделям стали в останні 30–40 років феноменологічні стохастичні моделі, що описують накопичення пошкоджень, як процес, еволюція якого в часі визначається ймовірнісними законами марковських ланцюгів. За 100 з лишнім років, що минули з часу опублікування стохастичної теорії академіка Російської академії наук А. А. Маркова, теорія інтенсивно розвивалася в усьому світі і стала базою не тільки для моделей накопичення пошкоджень, але й у всіх галузях знань – від управління економікою до медичних прогнозів. Нині багато дослідників схиляються до думки, що саме марковські стохастичні моделі і є найперспективнішим, універсальним інтегральним апаратом опису надійності елементів у функції часу.

Перші публікації такого підходу в оцінці надійності згадані вже в монографії В. В. Болотіна 1971 р. [5]. Однак широке застосування марковських моделей накопичення пошкоджень почалося в 1980 роки і особливо інтенсивно з появою у 1985 р. монографії Дж. Богдановфа і Ф. Козіна [32, 2],

в якій систематично описано феноменологічні моделі деградації за допомогою стохастичних процесів марковського типу (Джон Богданофф (John L. Bogdanoff) – професор аеронавтики і астронавтики університету Пердью. Френк Козин (Frank Kozin) – професор системотехніки Нью-Йоркського політехнічного інституту).

У передмові до монографії російською мовою [2] автори пишуть: “Зараз ми переконані, що повна і несуперечлива структура цих моделей різуче багата, а область застосування при вивченні феноменології накопичення пошкоджень є вельми широкою. Ці моделі дають змогу успішно описувати та аналізувати численні натурні дані про довговічність в умовах втоми, зносу і росту втомних тріщин”. Дійсно, сьогодні марковські феноменологічні моделі накопичення пошкоджень домінують у наукових дослідженнях, проектуванні та експлуатації будівельних об’єктів. Бібліографія публікацій тільки англійською мовою на початок 2015 р. становила не менше ніж 380 000 шт.

Істотний внесок у систематизацію, узагальнення та практичний додаток досліджень у теорії надійності зробила велика група вчених, що працюють під егідою Об’єднаного комітету безпеки конструкцій – JCSS (Joint Committee on Structural Safety). Комітет був створений в 1971 р. з ініціативи міжнародних науково-дослідних організацій у сфері будівництва. Сьогодні JCSS об’єднує вчених 67 країн світу. Вчені, котрі очолювали комітет у різний час Дж. Д. Соренсен (J. D. Sørensen) [54, 55], М. Х. Фабер (M. H. Faber) [39], Й. Феррі-Боржес (J. Ferry-Borges) [40], Й. Шнейдер (J. Schneider) [56, 57], Р. Раквітц (R. Rackwitz) [52] опублікували велику кількість монографій, які стали підручниками з надійності, безпеки, довговічності та ризику в сфері будівельних конструкцій.

Серед видатних робіт комітету слід відзначити фундаментальне теоретичне дослідження, назване “Рекомендована імовірнісна модель” (Probabilistic Model Code) [51] і стандарт ISO 2394-1998 “Загальні засади оцінки надійності будівельних конструкцій” [0].

Велику кількість прикладних досліджень було опубліковано у зв’язку з розробленням Єврокодів EN 1990: 2002 [38] в 1980–1990 рр. [31, 33–36, 44]. Концепція надійності, викладена в цих дослідженнях, та й сам Єврокод стали базисом низки нових національних нормативних документів України, як наприклад [9, 11, 12].

Говорячи про прикладні дослідження у теорії надійності не можна не згадати українську школу. До початку нового століття в Україні склалася відома національна наукова школа. Наведемо деякі, найвідоміші дослідження. Так монографії А. В. Перельмутера [14, 16] користуються настільки широкою популярністю в Україні та Росії, що перевидавалися в останні роки 3–4 рази. Стали настільними у проектувальників монографії С. Ф. Пічугіна та учнів його школи [15, 17, 18].

Завершаючи цей короткий огляд, відзначимо, що до початку нового століття теорія надійності чітко визначилася як єдиний науковий апарат контролю і прогнозу безпечного функціонування технічних систем на всіх етапах життєвого циклу. Стосовно будівельних об’єктів теорію надійності можна характеризувати, насамперед, визначенням терміну “надійність”. Визначення, прийняте в теорії споруд, походженням з відомого стандарту ГОСТ 27751-88, було вельми розпливчастим. Поняття формулювалося в термінах, які не застосовуються, за винятком терміну “довговічність”, ні в практиці проектування, ні в будівництві або в експлуатації.

Нині весь світ використовує доволі чіткі визначення термінології надійності у формулюванні європейських учених. Так, у стандарті ISO2394 [45] визначення наведено гранично коротко: “Надійність – здатність споруди або її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну служби”. У Єврокоді EN 1990: 2002 [10, 38] поняття “надійність” подано дещо ширше. Наведемо дослівну цитату: “Здатність споруди або її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного терміну служби. Надійність зазвичай виражається в імовірнісних показниках. **Примітка.** Надійність охоплює безпеку, експлуатаційну придатність і довговічність конструкції”. Примітка до визначення терміну, наведена в цитаті, має наголосити, що надійність є одночасно виміром безпеки, експлуатаційної придатності та довговічності конструкції.

Надійність поряд зі своїм основним призначенням – характеризувати рівень безпеки споруди протягом життєвого циклу має й іншу функцію – слугує інструментом оптимізації якості проекту. Так, у EN 1990: 2002 [10, 38], знаходимо: “Слід зазначити, що значення параметра надійності є

формальним або уявним показником ймовірності руйнування. Він використовується скоріше, як засіб для розвитку послідовних проектних правил, ніж для опису частоти руйнування конструкції”.

На закінчення відзначимо, що теорія надійності доволі обширна і перебуває в постійному розвитку. У межах статті неможливо висвітлити всі її аспекти стосовно будівельних конструкцій. Наведені в статті моделі оцінки надійності переважно стосуються конструкцій простого напруженодеформованого стану і мають лінійну функцію граничного стану. Однак, зацікавлений читач знайде у списку літератури багато описів доволі універсальних моделей оцінки надійності, зокрема і в функції часу. Особливо це стосується марковських стохастичних моделей накопичення пошкоджень.

1. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании/ Пер. с англ. Ю. Д.Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. 2. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. – М.: Мир, 1989. 3. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. 4. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1961. 5. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1971. 6. Болотин В. В. Статистические методы в строительной механике. – М.: Стройиздат, 1965. 7. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. – М.: Гостехиздат, 1954. 8. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. – Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. 9. ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. 10. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008“Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT)”. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. 11. ДСТУ-Н Б.В.1.2-16:2013 Визначення класу наслідків (відповідальності) об'єктів будівництва. – К.: Мінрегіонбуд України, 2013. 12. ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013 “Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів”. – К.: Мінрегіонбуд України, 2013. 13. Коваленко И. Н. Исследования по анализу надежности сложных систем. – К.: Наукова думка, 1975. 14. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / Гордеев В. Н., А. И. Лантух-Лященко, А. В.Махинько, В. А. Пашинский, А. В. Перельмутер, С. Ф. Пичугин./ Под общей ред. А. В. Перельмутера. – 4 изд. переработ. – М.: Изд-во СКАД СОФТ, издательство АСВ, издательство ДКМ Пресс, 2014. 15. Надежность стальных конструкций производственных зданий. Работа научной школы проф. Пичугина С. Ф. – Полтава: ООО “АСМИ”, 2010. 16. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. / Научное издание. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. 17. Пичугин С. Ф. Махинько А. В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции (монография). – Полтава: Изд-во “АСМИ”, 2005. 18. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий. [Текст]: монография – Полтава: Изд-во “АСМИ”, 2009. 19. Пугачев В.С. Теория случайных функций. – М.: Гостехиздат, 1957. 20. Райзер В. Д. Теория надежности в строительном проектировании. – М.: Изд-во АСВ, 1998. 21. Ржаницын А. Р. Применение статистических методов в расчетах сооружений на прочность и безопасность // Строительная промышленность. – М., 1952. – № 6. 22. Ржаницын А. Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материала. – М.: Стройвоенмориздат. – 1949. 23. Ржаницын А. Р. Статистический метод определения допускаемых напряжений при продольном изгибе. Научное сообщение ЦНИПС, вып. 3. – М.: Стройиздат. – 1951. 24. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. школа, 1982. 25. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. 26. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. 27. Стрелецкий Н. С. Об исчислении запасов прочности сооружений // Сборник трудов МИСИ, № 1, 1938. 28. Стрелецкий Н. С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. – М.: Стройиздат, 1947. 29.Хоциалов Н. Ф. Запасы прочности // Строительная промышленность. – М., 1929. – № 10. 30.Чирков В. П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. – М.: Транспорт, 1980. – 133 с. 31. Basler E. Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken, Schweizer Archiv für angewandte

Wissenschaft und Technik, 4, 1961. 32. Bogdanoff J.L., Kozin F. *Probabilistic models of cumulative damage*, Wiley & Sons, New York, 1985. 33. Calgaro, J.A. *Introduction aux Eurocodes – Securite des Construction et Bases de la Theorie de la Fiabilite/ Presses de l'ENPC, Paris : 1996.* 34. CIRIA (1977). *Rationalization of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes.* 35. Cornell, C. A. *A Probability Based Structural Code*, ACI-Journal No. 12, Vol. 66, 1969, p.p. 974–985. 36. Ditlevsen O. *Generalized second moment reliability index*. *Journal of Structural Mechanics*, 7, 1979 435–451. 37. Ditlevsen O., Madsen H.O. *Structural Reliability Methods*. – John & Wiley Sons Ltd, Chichester, 1996. 38. EN 1990:2002 *Eurocode – Basis of structural design*. European Committee for Standardization. Brussels: 2003. 39. Faber, M.H. and Sørensen, J.D. (2003). *Reliability based code calibration – The JCSS: 2003 Интернет pecypc: <http://www.jcss.byg.dtu.dk>* 40. Ferry-Borges, J. and Castanheta, M. “Structural Safety”. – *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil*. – Lissabon – 1971. 41. Freudenthal F.M. *Safety, reliability and structural design*. *J. of Structural Div. Proc. ASCE*, 87 ST3, 1961. 42. Gnedenko, B.V. (1943) *Sur la distribution limit du terme maximum d'une serie aleatoire*. *Ann. Math.*, № 44. 43. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., *An Exact and Invariant First Order Reliability Format*, *Proc. ASCE, J. Eng. Mech. Div.*, 1974, pp. 111–121. 44. HOLICKÝ, M., MARKOVA, J. and SÝKORA, M., *Partial factors for assessment of existing reinforced concrete bridges*. *Proceedings of the 6th International Probabilistic Workshop, Darmstadt 2008.* 45. ISO 2394: 1998. *General principles on reliability for structures*. 2nd ed. Geneve, Switzerland: ISO, 1998. 46. JCSS, “*Probabilistic Model Code*”, *The Joint Committee on Structural Safety*, Geneve: 2001. 47. Madsen, H.O., Krenk, S. and Lind, N.C., *Methods of Structural Safety*, Prentice Hal, Inc. Englewood Cliffs, NJ 07632, 1986. 48. Mayer M. *Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Granz kraften statt nach zulassigen Spannungen*. Springer Verlag, Berlin, 1926. 49. Melchers, R.E. *Reliability of parallel structural systems // J. Structural Div., ASCE*, 109 (11) 1983, P.2651–2665. 50. Melchers, R.E. *Structural Reliability Analysis and Prediction/ Second Edition*. John Wiley & Sons.– New York: 1999. 51. *Probabilistic Model Code ISBN 978-3-909386-79-6. Интернет pecypc: <http://www.jcss.byg.dtu.dk>* 52. Rackwitz, R. *Static properties of reinforcing steel*. Working notes, JCSS *Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance model*, 1996 <http://www.jcss.byg.dtu.dk> 53. Rzhantyn, R. (1957) *It is Necessary to Improve the Standards of Building Structures, A Statistical Method of Design of Building Structures*, Allan, D.E. (transl.), *Technical Translation No. 1368*, National Research Council of Canada, Ottawa 54. Sørensen, J.D. *Reliability Based Optimization of Structural Systems*. *Proceedings of the 13th IFIP conference. V.113: 1987.* 55. Sørensen, J.D., I.B. Kroon and M.H. Faber: *Optimal Reliability-Based Code Calibration*. *Structural Safety*, Vol. 14, 1994, pp. 197–208. 56. Schneider, J., *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, Grundwissen für Ingenieure*. VDF, Hochschulverlag AG and der EH Zürich: 1994. 57. Schneider, J., *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. IABSE. – Zurich, 1997. 58. Stewart, M. and Melchers, R. E., “*Probabilistic Risk Assessment of Engineering Systems*“, Chapman & Hall, 1997. 59. Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J., *Structural Reliability Theory and Its Applications*. Springer Verlag: 1982. 60. Turkstra C. *Theory and Structural Design*. Study No. 2: University of Waterloo, Solid Mechanics Division, Canada – 1972. 61. Veneziano D. *Contributions to Second Moment Reliability Theory*. Res. Rept. R74-33, Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, USA -1974. 62. Veneziano D. *New index of reliability // J. Engng. Mech. Div., Proc. ASCE*, N 105, – 1979. – P. 277–296.