

УДК 624.07

С.В. Колесніченко¹,

канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0001-5087-8354

Ю.В. Селютін¹,

канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1140-1355

І.Ю. Черних¹,

канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0003-4555-4800

К.Б. Мнацаканян¹,

старший викладач
ORCID: 0000-0001-9303-2236

¹Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
м. Краматорськ, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ ПРИЗНАЧЕННЯ ІНДЕКСУ НАДІЙНОСТІ β ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті проаналізовано принципи розрахунків безпеки сталевих будівельних конструкцій з урахуванням індексу надійності β на всіх стадіях експлуатації конструкцій. Для оцінювання безпеки проаналізовані основні розрахункові положення індексу надійності для нових конструкцій (на стадії проектування) та для будівельних сталевих конструкцій в умовах тривалої експлуатації.

Ключові слова: сталеві будівельні конструкції, індекс надійності β , безпека, нормування.

Вступ За сучасними нормами вимоги безпеки запропоновано визначати за узагальненим показником, що має назву «індекс надійності» або «індекс безпеки» β . За загальними принципами, оптимальний рівень надійності може бути встановлено за сумісним поєднанням вимог щодо коштів, які потрібно вкласти для виконання вимог з безпеки, та очікуваними наслідками можливого руйнування конструкції. За вимогами ISO 2394 [1] мінімальна надійність конструкції за призначеним проектним ресурсом має враховувати імовірність як втрати людиною життя, так і можливих ушкоджень, які вона може отримати під час руйнування конструкції.

Враховуючи той факт, що розрахункове значення індексу надійності суттєво залежить не тільки від нормованих розрахункових значень \bar{R} та \bar{F} але й від коефіцієнтів варіації, відношення їхньої змінності та рівня призначеної забезпеченості [2], задача розрахунків на безпеку та надійність перш за все полягає у призначенні нормованих значень параметрів безпеки, у даному випадку – нормуванні індексу надійності.

Значення індексу надійності, крім цього, мають бути також строго прив'язані до класів наслідків, які є визначальними для визначення коефіцієнтів надійності для подальших розрахунків при проектуванні конструкцій.

Аналіз принципів розрахунків безпеки з урахуванням індексу надійності.

Основні принципи проектування конструкцій для оцінювання безпеки здійснюються за наступними правилами:

- прийняттям відповідних значень різних випадкових змінних, що характеризують навантаження – F , та міцність (опір) R матеріалу – сталі;
- прийняттям набору коефіцієнтів надійності;
- для прийнятих моделей (навантажень, визначення напружень та переміщень, опору) встановленням більш-менш об'єктивних меж.

У загальному вигляді, оцінювання безпеки для конструкцій виконується за рівнянням:

$$F_d \leq R_d \tag{1}$$

де F_d – проектні значення ефекту навантаження, а R_d – проектні значення відповідного ефекту опору. Їхні чисельні значення які визначені із використанням методів конструктивної надійності, принципово базуються на цільовому показнику індексу надійності β . Ілюстрація імовірнісного характеру β в залежності від двох випадкових ефектів F та R надано на рис. 1, в залежності від резерву міцності – на рис. 2.

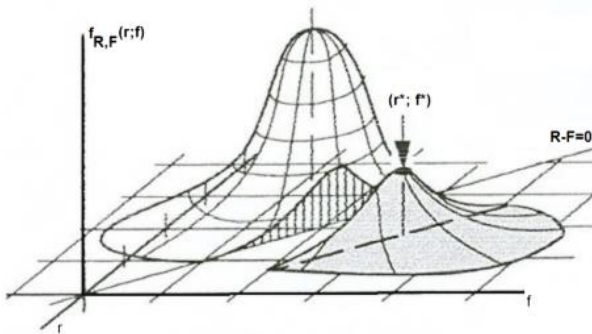


Рис. 1. Фізичне представлення принципів імовірнісного розрахунку

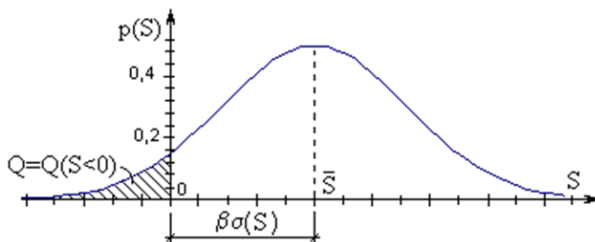


Рис. 2. Представлення β від резерву міцності S

З рисунку видно, що β являє собою кількість стандартів $\sigma(S)$, що укладаються в інтервалі від S до $S = \bar{S}$.

Розрахункові межі величин необхідно визначати таким чином, щоб вони відповідали значенням в розрахунковій проектній точці $\bar{S} = \bar{R} - \bar{F}$, що є найближчою до середньої точки у просторі нормалізованих змінних (рис. 2 та 3).

За рекомендаціями діючих міжнародних стандартів [3, 4, 5, 1], якщо робота конструкції розглядається у імовірнісній постановці, то відмова P_f може бути замінена індекс надійності, який визначається наступним рівнянням:

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f), \quad (2)$$

де Φ^{-1} – інверсія стандартизованого нормального розподілу.

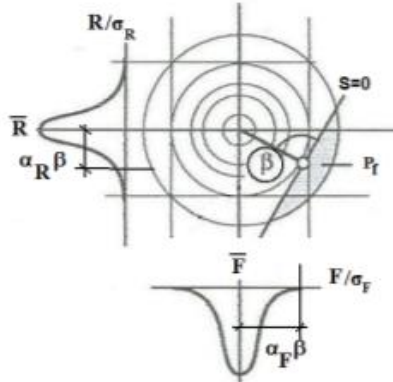


Рис. 3. Проектна точка і індекс надійності для нормально розподілених величин F та R . \bar{F} та \bar{R} – відповідні середні значення, α - коефіцієнти чутливості із знаком «-» для впливів та із знаком «+» для опору.

У тому випадку, коли основними змінними параметрами є навантаження і впливи, які характеризуються річними статистично незалежними максимумами, то для інших періодів часу значення β може бути розраховано як:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n, \quad (3)$$

де β_n – ІН для періоду у n років; β_1 – ІН для періоду за один рік.

Фактична частота руйнування (досягнення граничного стану) суттєво залежить від імовірнісного впливу фактору людини, тому значення β не обов'язково буде відповідати фактичній частоті руйнування конструкції.

Значення індексу надійності для нових конструкцій в залежності від класів наслідків об'єкта будівництва

Нормативне значення індексу надійності для нових конструкцій ще й досі чітко не визначено. Індекс надійності конструкції може бути визначений як імовірність відмови за призначений час. Індекс надійності, як видно з формули 2, має чітке співвідношення із P_f , див. табл. 1.

Таблиця 1

Залежності індексу надійності β від імовірності руйнування P_f						
β	2.25	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25
P_f	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

Для прийнятих функцій нормального розподілення випадкової величини S , імовірність руйнування:

$$P_f = F(S < 0) = P_S(0) = \frac{1}{\sigma(S)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(S-\bar{S})^2}{2\sigma^2(S)}\right] dS. \quad (5)$$

Тоді,

$$P_f = P_S(0) = \left[\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{(0-\bar{S})}{\sigma(S)}\right)\right] = \left[\frac{1}{2} - \Phi(\beta)\right] \quad (6)$$

де $\Phi(\beta)$ – інтеграл імовірності Гауса із аргументом β .

На сьогодні, проектування нових конструкцій, як і оцінювання безпеки існуючих, виконується в залежності від класу наслідків об'єкта будівництва (consequence class) – СС. За вимогами [6, 3, 7] їх існує 3 – СС1 (незначні наслідки), СС2 (середні наслідки) та СС3 (значні наслідки). У таблиці 2 для нових конструкцій надані значення β_0 для цих класів.

Таблиця 2

Значення індексу надійності β_0 для нових конструкцій у відповідності до класів наслідків

Клас наслідків	Причина руйнування		Індекс надійності β_0
	Втрата життя	Економічні пошкодження	
СС1	незначні наслідки	незначні наслідки	3,3
СС2	середні наслідки	середні наслідки	3,8
СС3	значні наслідки	значні наслідки	4,3

Також людський фактор при імовірному руйнуванні конструкцій є домінуючим і потребує однакового значення річного рівня імовірності руйнування. Імовірність нещасного випадку у країнах Європи прийнята на рівні 10^{-4} . Імовірність руйнування конструкції має бути нижчою, ніж імовірність нещасного випадку. У зв'язку з цим, встановлено, що значення імовірності руйнування конструкції складає $P_f > 10^{-5}$ на рік [8, 9, 10].

У Єврокодах [3, 4], враховані як економічні, так і соціальні фактори. Для кожного з класів наслідків можна визначити умовну імовірність втрати життя за один рік – P_f (див. табл. 3).

Таблиця 3

Умовна імовірність втрати життя за один рік – P_I

Клас наслідків	Види наслідків	Прийнята імовірність втрати життя
CC1	Малі наслідки втрати життя	$P_I = 10^{-3}$
CC2	Значні наслідки втрати життя	$P_I = 3 \cdot 10^{-2}$
CC3	Великі наслідки втрати життя	$P_I = 3 \cdot 10^{-1}$

Ці імовірності є умовними, що визначені у припущенні руйнування конструкції (або її частини) якщо людина постійно перебуває у зоні руйнування. Відповідна імовірність руйнування самої конструкції P_S за один рік може бути розрахована як:

$$P_S \cdot P_I < 10^{-5} \quad (9)$$

Для класів наслідків отримані значення зведено у табл. 4.

Таблиця 4

Імовірність руйнування конструкції P_S за один рік

Клас наслідків	P_S	β (табл.3.3.1)
CC1	$P_S \leq 10^{-5}/10^{-3} \leq 10^{-2}$	$\beta \geq 2.3$
CC2	$P_S \leq 10^{-3}/3 \cdot 10^{-2} \leq 3 \cdot 10^{-4}$	$\beta \geq 3.4$
CC3	$P_S \leq 10^{-3}/3 \cdot 10^{-1} \leq 3 \cdot 10^{-3}$	$\beta \geq 4.0$

Вплив часу t може бути ураховано шляхом зменшення значення β до βt :

$$\beta t = \beta - C \cdot \log t. \quad (10)$$

Значення коефіцієнта C розраховуються таким чином, щоб виконувались вимоги для нормованих значень β встановлених ймовірностей руйнування P_f . $C=1.1$ (для CC1), $C=0.75$ (для CC2), $C=0,6$ (для CC3). У той же час, такі значення суттєво збільшують теоретичний рівень P_f конструкцій поза межами проектного ресурсу. Тому, у таблиці 5 наведено значення βt , що узгоджені із прийнятими проектними рівнями β для відповідних класів наслідків.

Таблиця 5

Індекс надійності βt у залежності від CC

Клас наслідків	P_S	βt
CC1	$P_S \leq t \cdot 10^{-2}$	$\beta t \geq \Phi^{-1}\{t \cdot 10^{-2}\} = 2.3 - 0.7 \cdot \log t$
CC2	$P_S \leq t \cdot 3 \cdot 10^{-4}$	$\beta t \geq \Phi^{-1}\{t \cdot 3 \cdot 10^{-4}\} = 3.4 - 0.6 \cdot \log t$
CC3	$P_S \leq t \cdot 3 \cdot 10^{-5}$	$\beta t \geq \Phi^{-1}\{t \cdot 3 \cdot 10^{-5}\} = 4.0 - 0.5 \cdot \log t$

У табл. 6 наведено мінімально припустимі рівні індексу надійності за параметром імовірності втрати життя, виходячи з діючих проектних термінів для споруд і будівель за [6]: 20 років – крани (мінімальний проектний термін для

сталевих конструкцій), 30 років – резервуари (листові конструкції), 60 років – виробничі будівлі.

Таблиця 6

Значення мінімального рівня β , в залежності від СС

Клас наслідків	Один рік - β_1 (P_f)	20 років - β_{20} (P_f)	30 років - β_{30} (P_f)	60 років - β_{60} (P_f)
СС1	2,3 (0,028)	1,39 (0,1518)	1,27 (0,1781)	1,06 (0,2275)
СС2	3,4 (0,0012)	2,62 (0,0129)	2,51 (0,071)	2,33 (0,026)
СС3	4,0 ($3,5 \cdot 10^{-3}$)	3,35 (0,0016)	3,26 (0,002)	3,11 (0,0032)

Розрахунки індексу надійності для конструкцій в умовах експлуатації в залежності від класів наслідків об'єкта будівництва

Рівень індексу надійності $\beta = 3,8$ (СС2, табл. 2) для нових конструкцій можна прийнятий за базовий, тому що вищий рівень недоцільний з економічних міркувань. Встановити рівень індексу надійності β_u , нижче якого експлуатація конструкції не є доцільною можна у вигляді:

$$\beta_u = \beta_n - \Delta\beta, \quad (11)$$

де $\Delta\beta > 1,0$.

У роботах [11, 12, 13, 14] запропоновано значення $\Delta\beta = 1,5$ на підставі попередніх економічних розрахунків. Це значення приблизно дорівнює зростанню імовірності руйнування P_f на $1 \cdot 10^{-1}$. У таблиці 7 надано мінімально припустимі значення β_u . В подальшому, можливо коригування значення $\Delta\beta$.

Таблиця 7

Значення β_u в залежності від СС.

Клас наслідків	Причина руйнування		Індекс надійності β_u
	Втрата життя	Економічні пошкодження	
СС1	незначні наслідки	незначні наслідки	1,8
СС2	середні наслідки	середні наслідки	2,3
СС3	значні наслідки	значні наслідки	2,8

Індекс надійності β_r для конструкцій, які мають бути відремонтовані можна визначити як:

$$\beta_n < \beta_r < \beta_u, \quad (12)$$

що призводить до

$$\beta_r = \beta_0 - 0,5. \quad (13)$$

Попередньо прийняте значення 0,5 обумовлено тим, що конструкції, які потрібно ремонтувати (відновлювати) вже експлуатуються значний час без особливих проблем із безпекою, тому їхній рівень ресурсної надійності може бути

знижено на $0,5 \cdot 10^{-1}$. Остаточні значення індексу надійності для всіх типів конструкцій надано у табл. 8.

Таблиця 8

Значення β в залежності від СС та типів конструкцій.

Клас наслідків	β_n (нові конструкції)	β_r (ремонт)	β_i (аварійний стан)
СС1	3.3	2.8	1.8
СС2	3.8	3.3	2.3
СС3	4.3	3.8	2.8

Висновки. На етапі вирішення задач розрахунку індексу надійності для конструкцій, що експлуатуються за граничним станом, з накопиченими дефектами та пошкодженнями, необхідно вирішити двіосновні задачі:

- встановити такі значення індексу надійності, нижче яких конструкція непридатна для подальшої експлуатації;
- встановити значення індексу надійності, для можливого проведення відновлювальних робіт (реконструкція, ремонти).

Розглядаючи можливість зміни індексу надійності порівняно із новою конструкцією, враховуючи той факт, що залишковий ресурс може бути нижчим, ніж проектний, беручи до уваги економічні фактори та фактори імовірності втрати життя людини, встановлення таких значень індексу надійності необхідно для подальшого можливого зв'язку із продовженням терміну експлуатації конструкцій та визначення її залишкового ресурсу.

Список літератури:

1. ISO 2394:2015. International standard. General principles on reliability for structures. ISO 2015. Pages 112.
2. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978.- 239 с.
3. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. (EN 1990:2002, IDN). Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій. Київ, Мінрегіонбуд України., 2009. – 81с.
4. Eurocode 0: ENV 1990:2002+A1. Basic of structural design. CEN, Brussels, 2002. 116 pages.
5. ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. ISO 2010. Pages 44.
6. ДБН В.1.2-14:2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ, Мінрегі-онбуд України, 2009.-30с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ Мінрегі-онбуд України. 2009. – 217 с. (Науковий керівник Лантух-Лященко А. І.).
8. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. – Міністерства праці та соціальної політики України. Наказ № 637 від 04.12.2002.

9. Risk assessment in engineering. Principles, system representation and risk criteria. JCSS – Joint Committee on Structural Safety. Edited by M.H. Faber. – June 2008. Pages 35.

10. Background documents on risk assessment in engineering. Document #1. Theoretical framework for risk assessment and evaluation. JCSS (Joint Committee on Structural Safety). I. B. Kroon, COWI and M.A. Maes. – November 2008. Pages 14.

11. Steenbergen R.D.J.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. R.D.J.M. Steenbergen, A.C.W.M. Vrouwenvelder. HERON Vol. 55 (2010) No. 2. Pages 123-140.

12. Holicky M. Determination of target safety for structures. M. Holicky, D. Diamantidis, M. Sykora. 12th International conference on application of statistics and probability in civil engineering. ICASP12. Vancouver, Canada. 2015. pp. 1-9.

13. Diamantidis D. Risk and reliability acceptance criteria for civil engineering structures. D. Diamantidis, M. Holicky, M. Sykora. Structural reliability. Conference paper. Ostrava, Czech Republic. 2016. Pages 11.

14. Vrouwenvelder A.C.W.M.T. Reliability based structural design. Safety, Reliability and Risk Management. 2014. pp. 45-53.

References

1. ISO 2394:2015. International standard. General principles on reliability for structures. ISO 2015. Pages 112.

2. Rzhanytsyn A.R. The theory of calculating building construction for reliability. - M.: Stroyizdat, 1978. - 239 p.

3. DSTU-NB B.1.2-13: 2008. (EN 1990: 2002, IDN). System of reliability and safety in construction. Attitude. Fundamentals of structural design. Kyiv, Minregionstroy of Ukraine., 2009. - 81p

4. Eurocode 0: ENV 1990:2002+A1. Basic of structural design. CEN, Brussels, 2002. 116 pages.

5. ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. ISO 2010. Pages 44.

6. DNB B.1.2-14: 2009. System of ensuring reliability and safety of construction objects. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, structures and foundations. Kyiv, Minregionbud of Ukraine, 2009. -30p.

7. DSTU-NB V.2.3-23: 2009. Transport facilities. Guidance on the assessment and prediction of the technical condition of road bridges. Kiev Minregionbud of Ukraine. 2009. - 217 p. (Scientific adviser Lantuh-Lyashchenko A.I.)

8. A methodology for determining the risks and their acceptable levels for declaring the security of high risk entities. - Ministry of Labor and Social Policy of Ukraine. Order No. 637 of December 4, 2002.

9. Risk assessment in engineering. Principles, system representation and risk criteria. JCSS – Joint Committee on Structural Safety. Edited by M.H. Faber. – June 2008. Pages 35.

10. Background documents on risk assessment in engineering. Document #1. Theoretical framework for risk assessment and evaluation. JCSS (Joint Committee on Structural Safety). I. B. Kroon, COWI and M.A. Maes. – November 2008. Pages 14.

11. Steenbergen R.D.J.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. R.D.J.M. Steenbergen, A.C.W.M. Vrouwenvelder. HERON Vol. 55 (2010) No. 2. Pages 123-140.

12. Holicky M. Determination of target safety for structures. M. Holicky, D. Diamantidis, M. Sykora. 12th International conference on application of statistics and probability in civil engineering. ICASP12. Vancouver, Canada. 2015. pp. 1-9.

13. Diamantidis D. Risk and reliability acceptance criteria for civil engineering structures. D. Diamantidis, M. Holicky, M. Sykora. Structural reliability Conference paper. Ostrava, Czech Republic. 2016. Pages 11.

14. Vrouwenvelder A.C.W.M.T. Reliability based structural design. Safety, Reliability and Risk Management. 2014. pp. 45-53.

С.В. Колесниченко, Ю.В. Селютин, І.Ю Черных, К.Б. Мнацаканян
Методология назначения индекса надежности β для определения безопасности строительных стальных конструкций на всех стадиях эксплуатации

В статье, для оценки безопасной эксплуатации стальных конструкций, проанализированы принципы расчетов безопасности стальных строительных конструкций с учетом индекса надежности β на всех стадиях эксплуатации конструкций и основные расчетные положения индекса надежности β как для новых конструкций (на стадии проектирования) так и для строительных стальных конструкций в условиях длительной эксплуатации.

Задача расчетов на безопасность и надежность прежде всего заключается в назначении нормированных значений параметров безопасности, то есть - нормировании индекса надежности, значение которого должны быть строго привязаны к классам последствий (СС), которые являются определяющими для заданий коэффициентов надежности для дальнейших расчетов при проектировании конструкций.

В статье рассмотрены расчетные значения индекса надежности для конструкций, которые эксплуатируются за предельным сроком эксплуатации, с накопленными дефектами и повреждениями. Для усовершенствования механизма расчета значения индекса надежности для конструкций, эксплуатируемых за предельным сроком эксплуатации, с накопленными дефектами и повреждениями, поставлено несколько задач для определения таких значений индекса надежности, ниже которых конструкция непригодна для дальнейшей эксплуатации и определения и установления значений индекса надежности, для возможного проведения восстановительных работ (реконструкции, ремонта) для усиления и продления остаточного ресурса конструкций.

Ключевые слова: стальные строительные конструкции, индекс надежности β , безопасность, нормирование.

S.V. Kolesnichenko, Y.V. Selyutyn, I.Y. Chernykh, K.B. Mnacakanyn
The methodology of assigning the reliability index β to determine the safety of structural steel constructions at all operational phases

In order to assess the operational safety of steel constructions, the paper analyzes the principles of calculating the safety of structural steel constructions with consideration for the reliability index β at all phases of constructions operation and the design fundamentals of the reliability index β for both new constructions (at the design stage) and structural steel constructions in the conditions of the long-term operation.

The task of safety and reliability calculations, first of all, consists in assigning normalized safety parameter values, i.e. normalizing the reliability index, the value of

which should be strictly related to the consequence classes (CC), which are determining for setting the reliability coefficients for further calculations while designing the constructions.

The article considers the calculation values β of the reliability index for constructions operated beyond the time limit for operation, with accumulated defects and damages. To improve the mechanism for calculating the reliability index value for the constructions operated beyond the maximum operating limit, with accumulated defects and damages, several tasks were set to determine such values β of the reliability index below which the construction is no longer considered to be operational and to define the reliability index values β for possible performance of renovation works (reconstruction, refurbishment) to strengthen and extend the remaining structural lifetime.

Thus, emphasizing all of the aforementioned, the main conclusions to the article should be specified: at the stage of solving the issue of calculating the reliability index for structures being operated over the projected service life, with damages and initial defects accumulated during the operation period, it is required to perform their review and determine two main criteria for solving the issue of determining the reliability index, namely: to set such values of the reliability index below which the structure will be no longer operational, to define and set such values of the reliability index at which it is possible to carry out renovation works on steel structures, their reconstruction or repair.

Considering the possibility of changing the reliability index compared to a new structure, given that the residual service life may be shorter than the design one, taking into account the economic factors and factors of probability of losing a person's life, setting of such reliability index values is necessary for further possibility of the service life extension of a structure and determination of its residual life.

Key words: steel constructions, reliability index β , safety, normalization.

Посилання на статтю

АРА: Kolesnichenko, S.V., Selyutyn, Y.V., Chernykh, I.Y. & Mnacakanyn, K.B. (2020). Metodolohiya pryznachennya indeksu nadiynosti β dlya vyznachennya tekhnichnoho stanu budivel'nykh stalevykh konstruktsiy. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 43, 86–95.

ДСТУ: Колесніченко С.В. Методологія призначення індексу надійності β для визначення технічного стану будівельних сталевих конструкцій [Текст] / С.В. Колесніченко, Ю.В. Селютін, І.Ю. Черних, К.Б. Мнацаканян // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – 2020. – № 43. – С. 86–95.