УДК 624.014.2

doi:10.31650/2707-3068-2021-25-48-55

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕВИХ
КОНСТРУКЦІЙ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ІНДЕКСУ НАДІЙНОСТІ****С.В. Колесніченко**¹ д.т.н., доц.ksv@donnaba.edu.ua ORSID: 0000-0001-5087-8354**Ю.В. Селютін**¹ к.т.н., доц.yu.v.selyutin@donnaba.edu.ua ORSID: 0000-0003-1140-1355**Д.Ф. Оболонков**¹ старший викладачd.f.obolonkov@donnaba.edu.ua ORSID: 0000-0003-2893-3980**О.С. Карабанов**¹ старший викладачo.s.karabanov@donnaba.edu.ua ORCID: 0000-0003-0120-2547¹Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
м. Краматорськ, Україна

Анотація. У статті автори пропонують розрахункову методику рівня ресурсної надійності конструкцій, які потрібно ремонтувати (відновлювати), які експлуатуються значний час без особливих проблем із безпекою. У статті розглянуті розрахункові значення індексу надійності для конструкцій, які експлуатуються за граничним терміном експлуатації, з накопиченими дефектами і пошкодженнями. Для удосконалення механізму розрахунку значення індексу надійності для конструкцій, що експлуатуються за граничним терміном експлуатації, з накопиченими дефектами і пошкодженнями, поставлено кілька завдань для визначення таких значень індексу надійності, нижче яких конструкція непридатна для подальшої експлуатації і визначення та встановлення значень індексу надійності, для можливого проведення відновлювальних робіт (реконструкції, ремонту) для посилення і продовження залишкового ресурсу конструкцій.

Остаточні значення індексу надійності для всіх типів конструкцій та порядок визначення залишкового ресурсу на основі аналізу індексу надійності розраховано у імовірнісній постановці.

Ключові слова: ресурсна надійність, сталеві конструкції, індекс надійності, безпека, нормування;

1. Вступ

Загальна задача безпечної експлуатації конструкцій повинна враховувати не тільки визначення технічного стану за результатами обстеження, але й призначення залишкового ресурсу, який розраховується за даними всієї історії експлуатації. Найбільш універсальним показником є індекс надійності β , запропонований Єврокодами та реалізований у сучасних будівельних нормах.

2. Аналіз досліджень

За сучасними нормами вимоги безпеки запропоновано визначати за узагальненим показником, що має назву «індекс надійності» або «індекс безпеки» β (в подальшому – ІН). 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 ІН суттєво залежить не тільки від нормованих розрахункових значень 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 – для конструкцій, що експлуатуються необхідно вирішити два класи задач:

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

Встановлення таких значень також можна зв'язати із продовженням терміну експлуатації – визначення залишкового ресурсу. Зрозуміло, що економічні фактори, як і імовірність втрати життя людини потрібно брати до уваги. Розглянемо можливість зміни індекс надійності порівняно із новою конструкцією, враховуючи той факт, що залишковий ресурс може бути нижчим, ніж проектний.

3. Мета роботи

Метою даної роботи є визначення залишкового ресурсу сталевих конструкцій в умовах довготривалої їх експлуатації. Метою розрахунків залишкового ресурсу сталевих конструкцій в умовах довготривалої їх експлуатації насамперед полягає в призначенні нормованих значень параметрів безпеки, тобто - нормуванні індексу надійності, значення якого повинні бути строго прив'язані до класів наслідків (СС), які є визначальними для завдань коефіцієнтів надійності для подальших розрахунків при проектуванні конструкцій.

Для удосконалення механізму розрахунку значення індексу надійності для конструкцій, що експлуатуються за граничним терміном експлуатації, з накопиченими дефектами і пошкодженнями, поставлено кілька завдань для визначення таких значень індексу надійності, нижче яких конструкція непридатна для подальшої експлуатації і визначення та встановлення значень індексу надійності, для можливого проведення відновлювальних робіт (реконструкції, ремонту) для посилення і продовження залишкового ресурсу конструкцій.

4. Основна частина роботи

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

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

У таблиці 1 надано залежності індексу надійності β від імовірності руйнування P_f .

Таблиця 1. Значення P_f в залежності від β .

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 визначення P_f використана асимптотична формула

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\beta^2 - 1}{\beta^3} \exp \frac{-\beta^2}{2} \quad (2)$$

На сьогодні для оцінювання безпеки існуючих конструкцій (як і нових), обчислювання виконуються 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). За вимогами [3, 4, 8, 9, 10] у таблиці 2 надано значення β_0 для цих класів.

Таблиця 2. Значення β в залежності від СС.

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

Рівень ІН $\beta = 3.8$ (СС2, Таблиця 2) для нових конструкцій можна прийнятий за базовий, тому що вищий рівень недоцільний з економічних міркувань. Встановити рівень ІН β_u , нижче якого експлуатація конструкції не є доцільною можна у вигляді:

$$\beta_u = \beta_n - \Delta\beta, \quad \text{де } \Delta\beta > 1.0. \quad (3)$$

Значення $\Delta\beta = 1.5$ запропоновано на підставі економічних розрахунків [11]. Це значення приблизно дорівнює зростанню імовірності руйнування P_f на $1 \cdot 10^{-1}$.

У таблиці 3 надано мінімальні припустимі значення β_u . В подальшому, можливо коригування значення $\Delta\beta$.

Таблиця 3. 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_g для конструкцій, які мають бути відремонтовані можна визначити як:

$$\beta_n < \beta_g < \beta_u, \quad (4)$$

що призводить до

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

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 ІН для всіх типів конструкцій надано у таблиці 4.

Таблиця 4. Значення β в залежності від СС та типів конструкцій.

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

Враховуючи факт того, що індекс надійності β є комплексним інтегральним показником конструктивної безпеки складної системи, надаємо нижче порядок визначення ЗР на основі аналізу ІН у імовірнісній постановці.

1. Складається графік залежності β_i від років експлуатації $T_{E,i}$ (обстеження) (приклад на мал. 1).

2. Підбирається тип апроксимуючої кривої, що найбільш точно відповідає значенням графіку (приклад - рис. 2).

3. На підставі отриманого рівняння лінії тренду, визначаємо термін залишкового ресурсу (приклад на рис. 3), який повинен знаходитись у межах задовільного технічного стану 1 прийнятого класу наслідків СС конструкції або будівлі/споруди за значеннями, що наведені у табл. 3.

Рис. 1. Графік залежності β_i від років експлуатації t_i (приклад).

Рис. 2. Розрахунок апроксимуючої залежності (приклад).

Рис. 3. Розрахунок залишкового ресурсу (приклад).

На даному етапі імовірність визначення терміну залишкового ресурсу можна вважати за імовірність рівня достовірності апроксимації R^2 прийнятої функціональної залежності.

4. Вважаємо, що сталеві будівельні конструкції експлуатуються як відновлювальні системи – тобто після виконання відновлювальних робіт рівень індексу надійності буде підвищений до проектного. Тоді, для випадку, що розглядається, залишковий ресурс буде обчислений за новим значенням β (див рис. 4.)

При цьому, слід мати на увазі, що коригування теоретичної залежності β здійснюється після першого планового обстеження конструкції. Цей термін може бути розрахований на підставі визначених (наперед заданих) значень ІН, або за попередніми розрахунками ЗР як невідновлювальної системи (рис.3.). Для коректного розрахунку нової апроксимуючої кривої (рис. 3.), пропонується наявність не менш, ніж чотирьох точок: початкове значення ІН - β_0 (точка 1); значення ІН після відновлення системи (точка 3); значення ІН першого планового обстеження після відновлення (точка 4). За точку 2 може бути прийняте будь-яке значення β між точкою 1 та точкою 2 із значенням, близьким до β_0 . Цим вимогам, як правило, задовольняє значення β першого обстеження.

Рис. 4. Розрахунок залишкового ресурсу після відновлювальних робіт

5. Висновки

Для наданої методики можна додати деякі практичні рекомендації:

- якщо значення β_0 перевищують ті, що рекомендовані як початкові для відповідного класу наслідків СС (див. табл. 2, 3), можна приймати ці початкові значення;
- якщо під час експлуатації конструкції було виконано ремонтні роботи відновлення несучої здатності окремих елементів, ІН всієї конструкції має бути перерахований із зміненими значеннями β для цих елементів та новими значеннями геометричних характеристик, перерізів.

Таким чином, на даному етапі, після виконання робіт з обстеження, у технічному звіті результат призначення технічного стану – **результат розрахунків конструктивної безпеки** - повинен мати вигляд:

СС; β_0 (T_0); β (T_E); T_3 (R^2 , %); «технічний стан», $T_{об}$.

Наприклад:

Клас наслідків конструкції - СС2;

Проектне значення індексу надійності $\beta_0 = 4,3$ (T_0);

Значення індексу надійності на час обстеження $\beta = 3,34$ ($T_E = 37$ років експлуатації);

Визначений залишковий ресурс $T_3 = 11$ років (імовірність визначення $ZP=97\%$);
Технічний стан конструкції – «задовільний»;
Термін наступного планового обстеження $T_{об} = 6$ років.

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. = 169 EC0 англ
4. Eurocode 0: ENV 1990:2002+A1. Basic of structural design. CEN, Brussels, 2002. 116 pages. = 27
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, Мінрегіонбуд України, 2009.-30с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ Мінрегіонбуд України. 2009. – 217 с. (Науковий керівник Лантух-Лященко А. І.).
8. Calgaro J.-A. Safety philosophy of Eurocodes. ISGSR 2011 - Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (eds) – 2011. Pages 29-36.
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.

References

- [1] ISO 2394:2015. International standard. General principles on reliability for structures. ISO 2015. Pages 112.
- [2] Rzhantsyn A.R. The theory of calculating building structures for reliability. - M.: Stroyizdat, 1978. - 239 p.
- [3] DSTU-N B V.1.2-13: 2008. (EN 1990: 2002, IDN). The system of reliability and safety in business. Nastanova. Basics of the design of constructions. Kiev, Ministry of Regional Development of Ukraine., 2009. - 81p. = 169 EC0 eng.
- [4] Eurocode 0: ENV 1990:2002+A1. Basic of structural design. CEN, Brussels, 2002. 116 pages. = 27.
- [5] ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. ISO 2010. Pages 44.
- [6] DBN V.1.2-14: 2009. A system for securing the reliability and safety of alarm systems. The basic principle of securing the reliability and constructive safety of the awakening, construction, awakening constructions and foundations. Kiev, Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009.-30p.

- [7] DSTU-N B V.2.3-23: 2009. Equip transport. Nastanov from the assessment and forecasting of the technical stand of road bridges. Kiev Ministry of Regional Development of Ukraine. 2009.- - 217 p. (Science book Lantukh-Lyashchenko A. I.).
- [8] Calgaro J.-A. Safety philosophy of Eurocodes. ISGSR 2011 - Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (eds) – 2011. Pages 29-36.
- [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.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ

С.В. Колесніченко¹

[ORSID: 0000-0001-5087-8354](#)

Ю.В. Селютін¹

ORSID:0000-0003-1140-1355

Д.Ф.Оболонков¹

ORSID:0000-0003-2893-3980

О.С. Карабанов¹

ORCID:0000-0003-0120-2547

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

Аннотация. 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 заданных 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.

THE DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF BUILDING STEEL STRUCTURES BY THE RELIABILITY INDEX INDICATORS

S.V. Kolesnichenko¹

[ORSID: 0000-0001-5087-8354](#)

Y.V. Selyutyn¹

ORSID:0000-0003-1140-1355

D.F. Obolonkov¹

ORSID:0000-0003-2893-3980

O.S. Karapanov¹

ORCID:0000-0003-0120-2547

¹Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. 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.