

**ДО ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В  
ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**TO THE PROBLEM OF THE RESIDUAL RESOURCEASSESSMENT OF  
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN OPERATION**

**Титаренко Р. Ю., к.т.н., асистент** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів), **Хміль Р. Є., д.т.н., доцент** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

**Tytarenko R. Yu., Ph.D., Assistant,** <https://orcid.org/0000-0002-4550-6422>(LvivPolytechnicNationalUniversity,Lviv),**Khmil R. Ye.,Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,**<https://orcid.org/0000-0001-7578-8750>(Lviv PolytechnicNationalUniversity,Lviv)

**У розрізі аналізу сучасних досліджень розглянуто актуальну проблему оцінки довговічності (залишкового ресурсу) залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації. Сформульовані проблеми розрахунково-нормативної бази, переваги і недоліки існуючих моделей такої оцінки, а також рекомендації щодо майбутніх досліджень.**

**The article critically analyzes existing models and methods for the probabilistic durability evaluation of reinforced concrete (RC) structures in operation. Before that, the authors reviewed and analyzed several modern studies in this area by both Ukrainian and foreign scientists and formulated the problems of the calculation and normative base (as established, almost all normative documents consider durability only in terms of the experience of design and operation of RC structures – without taking into account their actual work, including the construction of a stochastic model, in a given environment).According to the authors, the formation of an initial data package for each specific task is necessary due to the complexity of the durability evaluation problem. That requires taking into account parameters of the bearing capacity reserve (such as strength and deformability of materials, geometric dimensions of sections, etc.) and operating conditions (for example, various types of loads, impacts temperature, humidity or aggressive environment, etc.) of a structure, which, in turn, are stochastic.**

**Based on the studies analyzed, the authors also highlight the main advantages and disadvantages of existing models and methods and also formulate the recommendations for further research in this area: it is necessary to create a fundamental basis of a single practical management apparatus for the**

**reliability and durability (residual resource) of RC structures in operation; except for the use of the Internet of Things (IoT), it is also necessary to expand the use of numerical simulations, including Monte Carlo modeling (which allows working with different laws of distribution of random variables and, accordingly, to achieve minimization of values of failure probabilities of these or those systems).**

**Ключові слова:**

залізобетон, конструкція, експлуатація, оцінка, параметр, довговічність, ресурс, процес, деградація, ймовірність, стохастичний, безвідмовність, метод reinforced concrete (RC), structure, operation, assessment, parameter, durability, resource, process, degradation, probability, stochastic, non-failure, method.

**Вступ.** Проблема оцінювання довговічності залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації, зокрема їх залишкового ресурсу (як основного кількісного показника довговічності), є дуже актуальною для будівельної галузі України протягом тривалого часу – насамперед через фізичний знос більшості будівель та споруд. Протягом тривалого періоду часу цю проблему розробляли лише на рівні наукових досліджень. Більше того, самі терміни – «довговічність», «ресурс» і т.п. – з'явилися в національних нормах проектування лише на початку ХХІст., а в практиці проектування, попри важливість проблеми, аналізу довговічності конструкцій (в т.ч. залізобетонних) не виконується й донині.

Водночас, слід зазначити, що проблема оцінювання довговічності є комплексною, а саме формування пакету вихідних даних до конкретної задачі вимагає врахування ряду параметрів резерву несучої здатності (таких як міцність й деформативність матеріалів, геометричні розміри перерізів і т.і.) та умов експлуатації (наприклад, різного роду навантажень, впливів температури, вологості чи агресивного середовища тощо) конструкції, які, своєю чергою, є стохастичними. До того ж, беручи до уваги той факт, що все більшого поширення набувають ймовірнісні методи розрахунку елементів будівель та споруд (оскільки дозволяють здійснювати кількісну оцінку параметрів їх надійності й довговічності), можна стверджувати: залишковий ресурс залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації, варто оцінювати методами теорії надійності з урахуванням стохастичних параметрів та умов згаданих вище. Таким чином, постановка задачі оцінювання довговічності (ресурсу) в підсумку зводиться до пошуку стохастичної функції деградації елемента, що, в більшості випадків, виступає предметом сучасних досліджень.

**Проблеми розрахунково-нормативної бази.** Нині глобальною проблемою оцінки довговічності (в т.ч. залишкового ресурсу) є поєднання наукової основи досліджень процесу деградації залізобетонних конструкцій,

що знаходяться в експлуатації, з вимогами норм проектування. Але, на жаль, в чинних національних нормах проектування бетонних та залізобетонних конструкцій [1, 2] проблема довговічності не розглядається в принципі – йдеться лише про напів ймовірнісний розрахунок елементів (стохастична природа вищезгаданих параметрів та умов враховується тут за допомогою системи коефіцієнтів надійності) відповідно до методу граничних станів. Через загальну складність проблеми сьогодні навіть у діючих профільних нормативних документах, що регулюють питання надійності та довговічності будівельних конструкцій – національних [3], країн ЄС й міжнародних [4–6], США [7] – поняття «оцінка довговічності» не має визначеної методологічної бази (лише рекомендації). Виходячи з цього, практично всі викладені вище документи встановлюють довговічність на основі досвіду проектування та експлуатації залізобетонних конструкцій – без урахування їх дійсної роботи (в т.ч. побудови стохастичної моделі) в умовах того чи іншого навколишнього середовища. До прикладу, в Єврокодi EN 1990 [4] орієнтовний проектний термін експлуатації(ресурс) будівель та споруд громадського призначення, незалежно від конструкції та матеріалу, складає 100 років, хоча фактичний – менший майже в 2 рази.

Додамо, що міжнародний стандарт ISO 13823 [5] – єдиний профільний нормативний документ, який окрім загальних принципів містить рекомендовані процедури оцінювання довговічності конструкцій(в т.ч. залізобетонних), які піддаються відомим або передбачуваним впливам зовнішнього середовища, включаючи механічні дії, що спричиняють руйнування матеріалів і що може призвести до відмови системи в цілому. Суттєвими недоліками стандарту [5], на нашу думку, є наступні:

1) метод граничних станів (напівймовірнісний метод), що використовується тут, унеможлиблює побудову стохастичної моделі конкретної системи, оскільки оперує значеннями часткових коефіцієнтів надійності, що визначаються статистичним методом згідно загальновідомих законів розподілу випадкових змінних, проте вводяться в розрахункові умови як детерміновані(наприклад, функція  $s(t)$ , яка описує залежність глибини карбонізації бетону від часу, включає ряд саме таких, залежних від якості бетону, впливів середовища тощо коефіцієнтів);

2) вираз  $p(t)$  для оцінювання ймовірності виникнення корозії в певний момент часу (представлений в роках)внаслідок карбонізації(див. стандарт)включає випадкові змінні, підпорядковані нормальному закону розподілу, який, своєю чергою, не відображає реальної картини стохастичної природи роботи елемента в цілому, тому що опис розподілу ймовірностей цих випадкових змінних (наприклад, міцності й деформативності матеріалів, геометричних параметрів перерізів, навантажень і впливів тощо)дозволяє виконувати лише наближено, так як вимагає розрахунку тільки двох статистичних параметрів –середнього значення та стандартного відхилення.

**Постановка мети і задач теоретичного дослідження.** З огляду на все вищенаведене, метою нашої роботи стало вивчення проблеми оцінки довговічності (в т.ч. залишкового ресурсу) залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації, в розрізі критичного аналізу останніх досліджень за цією тематикою.

Досягнення поставленої мети обумовлює необхідність вирішення таких задач:

1) сформулювати переваги і недоліки розглянутих в ході аналізу моделей та методів оцінювання довговічності (ресурсу), а також рекомендації щодо напрямків майбутніх досліджень;

2) розробити пропозиції щодо удосконалення існуючих моделей та методів, а також оцінити перспективи розвитку та формування єдиного практичного апарату управління надійністю й довговічністю (ресурсом) залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації.

**Існуючі моделі та методи: аналітичний огляд.** Проблема оцінки довговічності залізобетонних конструкцій – як на етапі проектування, так й в процесі експлуатації – завжди була найменш вивченою в теорії надійності будівель та споруд; насамперед, це пов'язано зі складністю математичного апарату такої оцінки, який би враховував усі незалежні одне від одного стохастичні параметри резерву несучої здатності та умови експлуатації конструкції протягом всього її життєвого циклу. Очевидно, що з розвитком інформаційних технологій та вдосконаленням методів розрахунку – зростає і кількість досліджень надійності тих чи інших залізобетонних елементів. Однак, незважаючи на те, що на сьогодні існує доволі багато публікацій, присвячених аналізу нелінійних деформацій балок [8], вивченню впливу реологічних властивостей матеріалу при розрахунку плити [9], огляду існуючих [10] та розробці нових [11, 12] концепцій оцінки безвідмовності конструкцій (в т.ч. підсилених під навантаженням) і т.п. – переходу від кількісних показників надійності до аналогічних показників довговічності в цих роботах не відбулося. Лише в останні роки у працях вітчизняних і зарубіжних вчених [13–20] дедалі більшої актуальності набуває проблема оцінювання довговічності (в т.ч. залишкового ресурсу) залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації.

У роботах професора Лантуха-Лященка [13–15] розглянуто ряд важливих питань щодо загальної проблематики оцінки ресурсу згинаних елементів, розробки моделей їх деградації та прогнозування довговічності (на основі детерміністичного та ймовірнісного підходів) тощо. Дані роботи присвячені розробці вдосконалених моделей оцінки залишкового ресурсу мостових конструкцій, як на етапі їх проектування, так й в процесі експлуатації [13], аналізу марковських стохастичних моделей накопичення пошкоджень в результаті природного зносу елементів [14], а також розгляду теоретичних основ моделювання їх життєвого циклу [15]. Попри новизну отриманих результатів, у роботах [13–15], на нашу думку, присутні певні недоліки, які

потребують доопрацювання в майбутніх дослідженнях: 1) модель оцінки залишкового ресурсу елемента, що знаходиться в експлуатації [13], не враховує залежність швидкостей його деградації від часу, що суттєво впливає на точність результату; 2) модель прогнозування довговічності на етапі проектування елемента [13] характеризується лише однією функцією його деградації, єдиним аргументом якої є характеристика безпеки  $\beta$ , отримана з параметрів тріщиноутворення (на практиці, залежно від конструктивних особливостей елемента, для цієї задачі знадобиться не менше декількох функцій); 3) в основі запропонованої моделі [14] приймається елементарний потік з параметром інтенсивності відмов  $\lambda = \text{const}$  (основний параметр управління життєвим циклом елемента в системах марковського типу), але фактично – описується тут стохастичною функцією часу; 4) крім того, модель [14] розроблена винятково в теорії і не апробована на реальних зразках; 5) модель прогнозування ресурсу [15] є достатньо наближеною – за рахунок використання методу двох моментів при оцінюванні надійності елемента (цей метод дозволяє працювати лише з нормальним розподілом випадкових змінних).

У статті [16] застосовано системний підхід до оцінки довговічності конструкцій при реалізації масштабного проекту Гонконг-Чжухай-Макао (HZM) – комплексу мостів та підводних тунелів – зі встановленим терміном служби 120 років. Однією з переваг даної роботи є використання методу Монте-Карло для розрахунку ймовірності відмови процесу проникнення хлоридів у захисний шар бетону, одним із недоліків – недостатня обґрунтованість отриманих результатів, особливо в розрізі визначення (прогнозування) ймовірностей відмов елементів мосту наприкінці його терміну служби.

Цікаві з точки зору практичного застосування праці науковця Taffeseta інших з фінського університету ім. Аалто [17, 18], в яких проаналізовано можливості використання сучасних комп'ютерних технологій для автономного моніторингу та оцінювання довговічності конструкцій під час експлуатації, а також встановлено, що безперервний моніторинг і довготривалий збір даних можна забезпечити за допомогою системи інтернету речей (IoT); єдиний недолік – рекомендаційний характер запропонованої концепції.

Роботи науковців Cervenka [19] та Nogueira [20] об'єднують те, що в них було проведено ймовірнісний аналіз часу початку корозії в конструкціях, що зазнавали впливу агресивних середовищ, а також ймовірнісне прогнозування їх довговічності за допомогою чисельного моделювання. Суттєвою перевагою дослідження [20] є використання там методу Монте-Карло (для побудови стохастичної моделі, а також розрахунку ймовірності відмови конструкції); більше того, результати, отримані у [19, 20], показують залежності між глибиною карбонізації бетону та часом. Але відповідей,

наприклад, на питання визначення оптимального поєднання бетонної суміші чи значення товщини захисного шару бетону в цих роботах не було.

**Висновки.** У результаті критичного аналізу останніх досліджень можна констатувати: вивчення проблеми оцінки довговічності (залишкового ресурсу) залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації, нині тільки набуває потужних масштабів. Незважаючи на те, що сучасні дослідження досягли етапу, коли моделі розрахунку конструкцій на довговічність різною мірою включені в деякі стандарти, наприклад, такі як ISO 13823 [5], до вивчення даної проблеми, все ще потрібна посилена увага дослідників. Крім того, виходячи з проведеного аналізу, стає зрозумілим: у майбутньому, для створення фундаментальної основи єдиного практичного апарату управління надійністю й довговічністю (ресурсом) залізобетонних конструкцій, що знаходяться в експлуатації, окрім використання згаданих у роботі систем інтернету речей (IoT), необхідно також поширити застосування чисельного моделювання, в т.ч. моделювання за методом Монте-Карло (що дозволяє працювати з різними законами розподілу випадкових змінних і, відповідно, досягати мінімізації значень ймовірностей відмов тих чи інших систем).

1. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. [Чинні від 2011-06-01]. Вид. офіц. Київ :Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с. (Конструкції будинків і споруд).

DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia. [Chynni vid 2011-06-01]. Vyd. ofits. Kyiv :Minrehionbud Ukrainy, 2011. 71 s. (Konstruktsii budynkiv i sporud).

2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2011-06-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 118 с. (Конструкції будинків і споруд).

DSTU B V.2.6-156:2010. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkooho betonu. Pravyla proektuvannia. [Chynnyi vid 2011-06-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2011. 118 s. (Konstruktsii budynkiv i sporud).

3. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [Чинні від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2018. 30 с. (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів).

DBN V.1.2-14:2018. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud. [Chynni vid 2019-01-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2018. 30 s. (Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh obiektiv).

4. EN1990:2002.Eurocode – Basisofstructuraldesign. Brussels : European Committee for Standardization (CEN), 2002. 116 p. (European Standard).

5. ISO 13823:2008. General principles on the design of structures for durability. Geneva : International Organization for Standardization (ISO), 2008. 39 p. (International Standard).

6. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. Geneva : International Organization for Standardization (ISO), 2015. 111 p. (International Standard).

7. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute (ACI), 2019. 623 p. (An ACI Standard).

8. Сахно С.І., Люльченко Є.В., Янова Л.А., Пищикова О.В. Аналіз нелінійних деформацій залізобетонних балок методом скінчених елементів. *Гірничий вісник*. 2020. Вип. 108. С. 27–34.

Sakhno S.I., Liulchenko E.V., Yanova L.A., Pyshchykova O.V. Analiz neliniinykh deformatsii zalizobetonnykh balok metodom skinchenykh elementiv. *Hirnychyi visnyk*. 2020. Vyp. 108. S. 27–34.

9. Гераськін О.О., Ротко С.В., Ужегова О.А. Розрахунок монолітної плити з урахуванням реологічних властивостей залізобетону. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2020. Вип. 14. С. 63–72.

Heraskin O.O., Rotko S.V., Uzhehova O.A. Rozrakhunok monolitnoi plyty z urakhuvanniam reolohichnykh vlastyvostei zalizobetonu. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2020. Vyp. 14. S. 63–72.

10. Tytarenko R., Khmil R., Dankevych I. Theoretical analysis of existing concepts to evaluate the non-failure of RC structures in operation. *Theory and Building Practice*. 2021. Vol. 3, No 2. P. 1–6.

11. Khmil R. Ye., Tytarenko R. Yu., Blikharskyu Ya. Z., Vegera P. I. Improvement of the method of probability evaluation of the failure-free operation of reinforced concrete beams strengthened under load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021, No 1. Art. No 012014.

12. Khmil R., Tytarenko R., Blikharskyu Y., Vegera P. Development of the procedure for the estimation of reliability of reinforced concrete beams, strengthened by building up the stretched reinforcing bars under load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, No 7 (95). P. 32–42.

13. Лантух-Лященко А. И. Проблема оценки долговечности железобетонных мостов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2008. № 21. С. 130–138.

Lantukh-Liashchenko A. Y. Problema otsenky dolhovechn osty zhelezobetonnykh mostov. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu*. 2008. № 21. S. 130–138.

14. Lantukh-Liashchenko A. Markov models for assessments and prediction of structure elements. *Dorogii mosti*. 2019. Issues 19-20. P. 27–37. 15. Лантух-Лященко А. И. Вероятностная оценка ресурса железобетонных элементов. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2019. № 3. С. 13–17.

16. Li K., Wang P., Li Q., Fan Z. Durability assessment of concrete structures in HZM sea link project for service life of 120 years. *Materials and Structures*. 2016. Vol. 49. P. 3785–3800.

17. Taffese W. Z., Nigussie E., Isoaho J. Internet of things based durability monitoring and assessment of reinforced concrete structures. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 155. P. 672–679.

18. Taffese W. Z., Sistonen E. Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: recent advances and future directions. *Automation in Construction*. 2017. Vol. 77. P. 1–14.

19. Cervenka J., Hajkova K., Jendele L., Sajdlova T., Smilauer V. Durability assessment of reinforced concrete structures assisted by numerical simulation. *Advances in Construction Materials and Systems : Proceedings of an International Conference (ICACMS), Chennai, September 3–8, 2017*. RILEM, 2017. Vol. 3. P. 1–10.

20. Nogueira C. G., Leonel E. D., Coda H. B. Reliability algorithms applied to reinforced concrete structures durability assessment. *IBRACON Structures and Materials Journal*. 2012. Vol. 5, No 4. P. 440–450.