

УДК 519.718

Н.В. СЕСПЕДЕС ГАРСІЯ\*

## ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС МОСТІВ І МОСТОВИХ СПОРУД

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Стаття присвячена визначенню актуальних методів оцінки залишкового ресурсу мостів та мостових споруд. Подовження терміну експлуатації мостів, визначення залишкового ресурсу мостів та мостових споруд залишаються актуальними питаннями, тому що капітальне відновлення чи будівництво нових мостів є дуже трудомістким та витратним процесом для будь-якої країни світу. Проведено аналіз діючих зарубіжних і вітчизняних нормативних документів, дослідження щодо загального стану проблеми стосовно видів руйнування, впливу аварій та факторів зовнішнього середовища. Великий обсяг інформації про характер виникнення й накопичення пошкоджень у залізобетонних мостових конструкціях показує, що на руйнування мостів в основному впливають виробничі фактори та фактори довкілля. Поступове руйнування конструкції виникає внаслідок накопичення різного роду ушкоджень, які виникають від багаторазових повторюваних тимчасових навантажень, аварій, від перепадів температур, появи корозійних процесів. Для розрахунку залишкового та загального ресурсу елементів мостів було обрано критерій тріщинистості, який враховує вид конструкції мостів, призначення, умови експлуатації. Як визначальний параметр обрано ширину розкриття тріщини для елементів автодорожніх і міських мостів, які армовано напруженою стрижневою арматурою, та встановлено граничне значення цього параметра. За відсутності великої статистики відмов пропонується використовувати ймовірно-фізичний підхід щодо оцінки довговічності. Основні параметри ймовірнісної моделі з ДМ-розподілом відмов – це середня швидкість зміни визначального параметра та коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації. Результати розрахунків показують значення, які відповідають статистичним та нормативним показникам. Якісний збір інформації щодо параметрів руйнування мостів, мостових конструкцій та ймовірно-фізичний підхід до оцінки реального технічного стану об'єкта дають більш точні результати розрахунків і дозволяють прогнозувати момент досягнення їх граничного допустимого значення.

**Ключові слова:** залишковий ресурс мостів, мостових споруд, ймовірно-фізичний підхід, ДМ-розподіл відмов, прогнозування довговічності.

**Abstract.** The article is devoted to the definition of current methods of assessing the residual resource of bridges and bridge structures. Extending the service life of bridges and determining the residual resource of bridges and bridge structures remain topical problems because capital restoration or construction of new bridges is a very time-consuming and costly process for any country in the world. An analysis of current foreign and domestic regulatory documents and research on the general state of the problem concerning the types of destruction, the impact of accidents, and external environmental factors were carried out. A large volume of information on the nature of occurrence and accumulation of damage in reinforced concrete bridge structures shows that the destruction of bridges is mainly influenced by production factors and environmental factors. The gradual destruction of the structure occurs as a result of the accumulation of various types of damage that arise from multiple repeated temporary loads, accidents, temperature changes, and the appearance of corrosion processes. To calculate the residual and total life of bridge elements, the crack resistance criterion was chosen, which takes into account the type of bridge construction, purpose, and operating conditions. As a determining parameter, the crack opening width was chosen for the elements of road and city bridges reinforced with tension rod reinforcement, and the limit value of this parameter was established. In the absence of large failure statistics, it is suggested to use a probabilistic-physical approach to durability assessment. The main parameters of the probabilistic model with DM-failure distribution – are the average rate of change of the determining parameter and the coefficient of variation of the generalized degradation process. The results of the calculations show values that correspond to statistical and regulatory indicators. Qualitative collection of information on parameters of the

*destruction of bridges and bridge structures and a probabilistic-physical approach to assessing the real technical condition of the object provide more accurate calculation results and allow for predicting the moment of reaching their maximum allowable value.*

**Keywords:** *residual resource of bridges, bridge structures, probabilistic-physical approach, DM-failure distribution, durability prediction.*

DOI: 10.34121/1028-9763-2023-3-151-157

## **1. Вступ**

У сучасному світі аварії та руйнування будівельних конструкцій, у тому числі і мостових споруд, останнім часом стали звичайним явищем. Ця проблема стосується багатьох країн світу, незалежно від їх економічного стану. Це США, Південна Корея, Канада, Чехія, Індія, Росія, Китай, Португалія, Україна, Японія, Великобританія, Білорусь, Швеція, Грузія, Іспанія, Чилі, Латвія, Казахстан, Ірак, ОАЕ та інші країни. Мости проєктують більших розмірів, більшої довжини, складних форм і це у деяких випадках стає причиною аварії та їх руйнувань. Але в основному руйнування відбувається у мостових спорудах, які перебувають у тривалій експлуатації, що завдає суттєвих матеріальних, екологічних та людських збитків.

Основна частка експлуатації мостів та мостових перетин припадає на автомобільні та пішохідні мости. Подовження терміну експлуатації мостів, визначення залишкового ресурсу мостів та мостових споруд залишаються актуальними питаннями, тому що капітальне відновлення чи будівництво нових мостів є дуже трудомістким та витратним процесом для будь-якої країни світу. На сьогоднішній день у світовій практиці проблема визначення залишкового ресурсу мостів та мостових споруд повністю не вирішена. Існують різні підходи та способи визначення нормативного та залишкового термінів служби мостів і залізобетонних прогонових будов.

*Мета дослідження* – визначення актуальних методів оцінки залишкового ресурсу мостів та мостових споруд, дослідження та застосування ймовірно-фізичного методу розрахунку залишкового ресурсу мостів на основі динаміки зміни визначального параметра.

## **2. Стан проблеми та аналіз останніх досліджень**

На даний час на території України експлуатується не менше 12 тисяч мостів та мостових споруд, із них 73% – це автомобільні мости, 21% – пішохідні мости та 6% – шляхопроводи. Але лише 50% з них відповідають нормам та стандартам, тоді як інша частина потребує негайного ремонту. Більшість українських мостів – це споруди будівництва 50–80-их років минулого століття. За останні 40 років ремонт проводився не більш, як на 27% цих споруд. Також на посилення руйнування та аварійність мостів впливає понад нормова вага вантажівок 100 тон (норма – не більше 40 тон) та відсутність контролю цієї ваги. Більшість мостів спроектовано під навантаження, що дозволяє пропускати без обмежень рухомий склад до 30–40 тон та експлуатувати близько 70–85 років. Але на практиці термін експлуатації прогонових будов, запроектованих під навантаження до 30 тон, зазвичай не перевищує 55 років.

На вантажопідйомність та довговічність мостів суттєво впливають такі небезпечні деградаційні процеси, як корозія та втома сталевих конструкцій та арматури [1]. Внаслідок змінного навантаження мостових конструкцій від рухомих навантажень, дії вітру та інших зовнішніх умов виникає втомний знос, що також призводить до зниження вантажопідйомності і довговічності. На теперішній час є багато досліджень щодо характеру та темпів корозійного і втомного зносу конструкцій, а також впливу у зростаючих у часі експлуатаційних автомобільних навантажень на зниження запасів вантажопідйомності.

Корозійний знос сталевих мостових конструкцій залежить від агресивності навколишнього техногенного середовища, кліматичних умов, а також напруженого стану. Наприклад, авторами [1] стверджується, що ймовірнісний розподіл впливу автомобільних навантажень на мости подібний апроксимованому нормальному закону (розподіл Гауса). Також авторами [1] введено поняття забезпеченості граничного стану як величини перевищення вантажопідйомності середнього значення експлуатаційних навантажень, обчисленої в середніх квадратичних відхиленнях. Як критерій граничного корозійного зносу для всього терміну експлуатації моста вибрано нормативне значення забезпеченості першого граничного стану. Для нових мостів рекомендується на стадії проєктних розрахунків проводити перевірку конструкцій на втому з огляду на ймовірнісний розподіл експлуатаційних навантажень від вантажних автотранспортних засобів, руйнування покриттів та прогноз зростання навантажень у часі.

Стосовно нормативних документів на проєктування залізобетонних конструкцій (у тому числі мостів) у більшості закордонних, а саме EN 1992-1-1: Eurocode 2, ES ISO 2394:2012 (Ефіопія), DIN 1045-1-2008 (Німеччина), термін служби мостів встановлюють рівним 100 років [2]. У нормах Великобританії BS:5400 із проєктування мостових конструкцій встановлюють проєктний термін служби 120 років [2]. Вказані нормативні документи регламентують терміни служби мостів при виконанні всіх вимог того чи іншого документа та у залежності від конструктивних характеристик моста (товщина захисного шару, клас бетону, армування). Однак у них відсутні апарат оцінки довговічності та моделі прогнозування, що дозволяють визначати та нормувати термін служби залізобетонних мостів [2].

У міжнародних нормах, нормативних документах, технічних умовах проєктування, відновлення та будівництва нових мостів, таких як СН 200-62, СН 365-67, СП 35.13330.2011, СНіП 2.05.03–84 «Мости та труби», за якими побудовано більшість вітчизняних мостів та мостів СНД, що нині експлуатуються, також відсутні рекомендації щодо оцінки довговічності мостів та регламентування їх термінів служби [2].

Відповідно до норм України (ДБН В.2.3-22:2009) оцінка технічного стану прогонових будов здійснюється шляхом ідентифікації їх експлуатаційного стану. Враховується, що протягом усього терміну служби міст загалом чи його конструктивний елемент послідовно перебувають у одному з п'яти експлуатаційних станів. Кожному експлуатаційному стану відповідають певний рівень зносу елемента та регламентовані експлуатаційні чи ремонтні заходи. Залишковий ресурс моста прогнозують згідно з визначенням часу переходу елементів моста з одного експлуатаційного стану до іншого.

Згідно з ДБН В.2.14-22: 2006 для визначальних елементів споруди, а також споруди у цілому проєктний термін служби становить 100 років. Відповідно до ДБН В.2.14-22: 2006 розглядаються дві групи граничних станів споруди, при яких настає або повна, або часткова неможливість її експлуатації. Такі граничні стани настають при зсувах, розмивах ґрунтів, використанні неякісних матеріалів, відсутності контролю якості на всіх етапах проєктування, виготовленні та встановленні споруди, наявності надмірних коливань, навантаженнях та тріщинах, слабких або вагомих руйнівних аварійних впливах. Але все ж таки до такого класу споруд, як мости, застосовуються надлишкові вимоги, щоб споруда була такою, що при певному рівні аварій, пожеж та інших видів руйнацій і впливів бути здатною до нескладного ремонту та відновлення.

Конструктивно мостові споруди виготовляють із можливістю витримувати понад нормативні навантаження, впливи факторів зовнішнього середовища та мати доступність для обстеження значущих елементів мостів. Відповідно до ДБН В.2.14-22: 2006 споруда повинна бути довговічною, тобто здатною виконувати деякий час експлуатаційні функції при руйнації одного з елементів споруди.

Для фахівців із проектування, будівництва та експлуатації мостових споруд також важливим є аналіз аварій та руйнувань мостових споруд. Групою авторів [3] проведено докладний огляд вітчизняних та іноземних публікацій на тему досліджень причин аварій мостових споруд. Наведено багато прикладів аварій та руйнувань мостів по всьому світу та виділено групи, до яких можна віднести основні аварії мостових споруд.

У залізобетонних конструкціях можуть мати місце дефекти та пошкодження, що виникають на стадіях виготовлення, транспортування й монтажу: технологічні тріщини, температурно-усадкові пошкодження, дефекти бетонування, інші пошкодження, наприклад, відколи бетону, силові тріщини через непередбачені впливи, тріщини, що утворилися у процесі складування та транспортування елементів.

При оцінці технічного стану та визначенні категорій дефектів слід користуватися діючими інструкціями та рекомендаціями. Моніторинг мостів, що експлуатуються, слід проводити з урахуванням галузевих документів.

### 3. Постановка задачі

Результати досліджень показують, що основні методи розрахунків надійності мостів та мостових споруд базуються на детерміністичних оцінках, які не враховують випадкову фізику процесів руйнування та деградації, або на ймовірнісних розподілах подібних апроксимованому нормальному закону (розподіл Гауса). Згідно з ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» пропонується перевіряти рівень надійності та прогнозувати залишковий ресурс безаварійної експлуатації мостових споруд через оцінювання їх технічного стану.

Залізобетонні конструкції мостів та труб залежно від їх виду та призначення, застосовуваної арматури та умов роботи повинні задовольняти, наприклад, категоріям вимог щодо тріщиностійкості згідно з нормативними документами. Тріщиностійкість характеризується значеннями напруг, що розтягують і стискають бетон, і розрахунковою шириною розкриття тріщин. Відповідно СніП 2.05.03-84 граничне значення ширини розкриття тріщини встановлено 0,2 мм для елементів автодорожніх і міських мостів, які армовані напруженою стрижневою арматурою. Зазвичай вимоги відповідають нормальним умовам експлуатації у середовищі. При виявленні середовища, агресивного по відношенню до арматури чи бетону, можуть пред'являтися жорсткіші вимоги або слід застосовувати інші заходи забезпечення експлуатаційної надійності.

Останні дослідження в області розрахунків залишкового ресурсу різноманітних споруд, приладів показують, що найбільш придатними є ймовірнісно-фізичні методи, що засновані на дослідженні динаміки зміни визначальних параметрів. Вони дають більш точні результати розрахунків об'єктів, відображають реальну природу руйнування та деградації і дозволяють прогнозувати момент досягнення їх граничного допустимого значення [4].

### 4. Ймовірнісно-фізичний метод розрахунку залишкового ресурсу елементів автодорожніх і міських мостів, які армовані напруженою стрижневою арматурою

Оскільки процес руйнації елементів мостів є монотонним, незворотним та розвивається, наприклад, із постійною швидкістю, пропонується використовувати ймовірнісно-фізичний метод розрахунку залишкового ресурсу, який враховує динаміку зміни визначального параметра з використанням *DM*-розподілу випадкової величини (наробітку до відмови) [4]. У процесі прогнозування необхідно виміряти та встановити значення визначального параметра  $\varphi(t)$  та його граничне значення  $\varphi(t)=P_{np}$  [5].

У нашому випадку теоретична модель надійності – це *DM*-розподіл наробітку до відмови [4]:

$$F(t) = DM(t; a, v) = \Phi \left( \frac{at + \Pi_1 - \Pi_0}{v\sqrt{at(\Pi_0 - \Pi_1)}} \right),$$

де  $a$  – середня швидкість зміни визначального параметра – критерію придатності;

$\Pi_0$  – початкове значення визначального параметра;

$\Pi_1$  – максимально вимірне значення визначального параметра.

Параметрами  $DM$ -розподілу є середня лінійна швидкість розкриття тріщин  $a$  і коефіцієнт варіації процесу розкриття тріщин  $v$  елементів автодорожніх і міських мостів, які армовані напруженою стрижневою арматурою.

Вимірювання визначального параметра проводяться через однакові проміжки часу  $\Delta t$ . За даними вимірів обчислюють середню швидкість зміни визначального параметра [4]:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i.$$

Коефіцієнт варіації приростів (швидкості зміни визначального параметра) визначають для багатоциклової втоми [5].

Якщо визначальний параметр виробу змінюється монотонно з постійною швидкістю, тоді обчислюють середній залишковий ресурс за формулою [5]

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi_{np} - \Pi_1)}{a} \left( 1 + \frac{v^2}{2} \right),$$

де  $\Pi_{np}$  – граничне значення визначального параметра.

*Приклад розрахунку залишкового ресурсу елементів мостів, які армовані напруженою стрижневою арматурою за показником тріщиностійкість*

Обчислити залишковий ресурс елементів моста після  $t_1 = 25$  років експлуатації. Через кожні 5 років експлуатації елементів моста проводилися обстеження процесу тріщиноутворення і обчислювалася середня ширина розкриття тріщини  $l_i$  (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність середньої ширини розкриття тріщини від терміну експлуатації

Інтервал вимірювання, $i$	Час експлуатації, $t_i$ , років	Середня ширина розкриття тріщини, $l_i$ , мм
1	5	0,01
2	10	0,029
3	15	0,055
4	20	0,082
5	25	0,11

*Рішення.*

1. Обчислимо середню швидкість зміни ресурсного визначального параметра  $l_i$  [4]:

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \varphi_i,$$

$$\Delta t = 5 \text{ років} = 43800 \text{ годин} \quad n = 5,$$

$$\Delta\varphi_i=(0,01; 0,019; 0,026; 0,027; 0,028),$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i=0,11 \text{ мм},$$

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \frac{0,11}{43800 \cdot 5} = 5,023 \cdot 10^{-7} \text{ мм/год.}$$

2. Коефіцієнт варіації процесу руйнування вибираємо для багатоциклової втоми  $V=0,5$ .

3. Визначимо значення визначальних параметрів. Граничне значення ширини розкриття тріщини становить 0,2 мм.

$$P_{np}=l_{\max}=0,2 \text{ мм}; P_l=l_1=0,11 \text{ мм}.$$

4. Визначимо середній залишковий ресурс елементів моста:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(P_{np} - P_l)}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2}\right) = \frac{(0,2 - 0,11)}{5,023 \cdot 10^{-7}} \left(1 + \frac{0,5^2}{2}\right) = 201572 \text{ годин} = 23,01 \text{ років}.$$

5. Визначимо повний середній ресурс елементів моста, який становить

$$\pi = t_1 + \tilde{\pi}(\tau) = 25 + 23,01 \approx 48,01 \text{ років}.$$

Розрахунок залишкового ресурсу елементів моста *ймовірно-фізичним методом* показав величину 23,01 років і повний ресурс 48,01 років, що і підтверджується статистикою експлуатації реальних строків служби мостів та мостових споруд порядку 45–65 років.

Для порівняння застосуємо *детерміністичний підхід* для оцінки залишкового ресурсу елементів мостів, які армовані напруженою стрижневою арматурою. Середню швидкість ширини розкриття тріщини  $a_\delta$  вираховуємо використовуючи результати обстеження процесу тріщиноутворення елементів мостів протягом 25 років експлуатації нового об'єкта згідно з табл. 1:

$$a_\delta = \frac{l_1 - l_0}{t_1} = \frac{0,11 - 0}{25} = 0,0044 \text{ мм / років}.$$

Залишковий ресурс елементів мостів, які армовані напруженою стрижневою арматурою  $T_{zp}$ , вираховуємо як відношення залишкової ширини розкриття тріщини  $P_{zp}$  до середньої швидкості розкриття тріщини  $a_\delta$ :

$$T_{zp} = \frac{P_{zp}}{a_\delta} = \frac{(P_{np} - P_l)}{a_\delta} = \frac{(0,2 - 0,11)}{0,0044} = 20,5 \text{ років}.$$

Детерміністичний підхід показав менший залишковий ресурс елементів моста порівняно з *ймовірно-фізичним методом*, який враховує випадкову природу процесів руйнування (деградації) та має підвищену достовірність прогнозування залишкового ресурсу.

## 5. Висновки

Технічний стан основних несучих конструкцій мостів та прогонових будов обумовлений переважно терміном їхньої служби, конструктивними особливостями та умовами експлуатації. У період експлуатації на залізобетонні прогонові будови, крім постійних і тимчасових навантажень, впливають фактори зовнішнього середовища, які мають в основному негативний вплив на залізобетон, знижуючи його споживчі властивості. При дослідженні

питань залишкового ресурсу мостів необхідно вирішувати питання прогнозування зниження вантажопідйомності та скорочення довговічності, вирішувати питання розробки дієвих заходів подовження терміну експлуатації мостів.

Запропонований у статті ймовірно-фізичний метод на основі дослідження динаміки зміни визначального параметра дозволяє вираховувати залишковий ресурс елементів автодорожніх і міських мостів з урахуванням появ тріщин – 23,01 років та вираховувати повний ресурс – 48,01 років після 25 років експлуатації. Отримані результати відповідають реальній статистиці експлуатації, що дає можливість зробити висновок про дієвість запропонованого підходу. Ймовірно-фізичний метод на основі  $DM$ -розподілу відмов враховує випадкову природу процесів руйнації (деградації), які є незворотними, з монотонними реалізаціями та розвиваються з постійною швидкістю. Ймовірно-фізичний метод дає більш адекватні результати розрахунків і в деяких випадках дозволяє зменшувати експлуатаційні витрати об'єктів.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Васильев А.И., Валиев Ш.Н., Шмидт В.С., Овчинников И.Г. Длительные деградационные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации. *Вестник евразийской науки*. 2022. Т. 14, № 2. С. 1–15.
2. Бокарев С.А., Прибытков С.С., Ефимов С.В. Остаточный ресурс железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 3. С. 169–183.
3. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Ч. 4. *Транспортные сооружения*. 2018. № 1. URL: <https://ts.today/PDF/05SATS118.pdf>.
4. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.
5. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (терміни служби) технічних систем. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/activity/Napriam%20Standarty/Standart\\_Zalyshkovij\\_resurs.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/activity/Napriam%20Standarty/Standart_Zalyshkovij_resurs.pdf).

*Стаття надійшла до редакції 31.05.2023*