

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЯНЧУК ЛЕОНІД ЛЕОНІДОВИЧ**

УДК 624.21

**ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД НА АВТОМОБІЛЬНИХ  
ДОРОГАХ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2016**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Лантух-Лященко Альберт Іванович**  
Національний транспортний університет,  
професор кафедри «Мости та тунелі»

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кожушко Віталій Петрович**  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, завідувач кафедри мостів, конструкцій і  
будівельної механіки

кандидат технічних наук

**Полюга Роман Ігорович**

Державне підприємство «Державний дорожній  
науково-дослідний інститут ім. М.П. Шульгіна»,  
завідувач відділу штучних споруд

Захист відбудеться «\_\_\_» 2016 року о «\_\_\_» годині на засіданні вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою 01010, Київ, вул. Суворова, 1, зал засідань (ауд. 333).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою 01103, Україна, м. Київ, вул. Кіквідзе, 42.

Автореферат розісланий «\_\_\_» 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.І.Каськів

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Мости, водопропускні труби, захисні інженерні конструкції є найскладнішими і найбільш коштовними елементами транспортної інфраструктури. Аварії або обмеження руху через незадовільний стан споруди завдають великих матеріальних і соціальних збитків суспільству.

Переважну кількість мостів в Україні побудовано за технічними нормами 1948 – 1962 рр. або ще більш ранніми, ці конструкції не відповідають ні за вантажопідйомністю, ні за пропускну здатністю вимогам чинних норм. Збільшення інтенсивності транспортного навантаження та підвищення концентрації агресивних компонентів у довкіллі призводить до збільшення величини розкриття і появи нових тріщин у залізобетонних елементах мостів. Процес тріщиноутворення в залізобетонних елементах прискорює деградації конструкції в цілому та зменшує строк служби мосту.

Проблема довговічності залізобетонних елементів є предметом вивчення великої кількості науковців, в тому числі й українських. Очевидно, що сьогодні є нагальна потреба в об'єднанні наукового базису досліджень деградації залізобетону з вимогами правил проектування, умов будівництва та експлуатації, і в отриманні теоретичної моделі оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів, які стали б основою розробки практичного апарату управління життєвим циклом мостів.

Таким чином, проведення теоретичних досліджень з оцінки деградації та прогнозування ресурсу елементів автодорожніх мостів, які базуються на критерії ширини розкриття тріщин у залізобетонних елементах, є актуальною задачею, вирішення якої стане важливим кроком на шляху науково-обґрунтованого оцінювання і прогнозування технічного стану згинаних залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Основні теоретичні і прикладні дослідження дисертації були виконані згідно з науково-дослідними роботами кафедри «Мости та тунелі» Національного транспортного університету. Роботу виконано відповідно до:

- держбюджетних тем кафедри «Мости та тунелі» – «Теоретичні засади оцінки ресурсу транспортних споруд» (державний реєстраційний номер 0111U000095) та «Прогноз і оптимізація життєвого циклу транспортних споруд» (державний реєстраційний номер 0109U002145);

- госпдоговірних тем «Розроблення проекту ДСТУ-Н «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» на заміну ДСТУ-Н Б В.2.3-23: 2009», 2012 р. (державний реєстраційний номер 0112U005671) і «Розробити посібник до ДСТУ-Н Б.В.2.3-23 з оцінки і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів», 2011 р. (державний реєстраційний номер 0111U006180).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення і практична реалізація моделі прогнозування ресурсу елементів автодорожніх мостів протягом життєвого циклу експлуатації. Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі:

- провести аналіз проблеми та аналіз існуючих моделей оцінки і прогнозування технічного стану залізобетонних елементів;
- розробити детерміністичну модель життєвого циклу експлуатації згинаних залізобетонних елементів автодорожніх мостів;
- розробити стохастичну модель життєвого циклу експлуатації згинаних залізобетонних елементів автодорожніх мостів;
- розробити інженерну методику прогнозування ресурсу залізобетонних елементів мостів протягом життєвого циклу експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – процес деградації залізобетонних елементів транспортних споруд протягом життєвого циклу експлуатації.

**Предмет дослідження** – моделі прогнозування технічного стану згинаних залізобетонних елементів мостів, що знаходяться в експлуатації на автомобільних дорогах.

**Методи дослідження** – класичні методи числового моделювання та сучасних інформаційних технологій; методи теорії ймовірностей і математичної статистики; методи теорії споруд; методи системного аналізу.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Основний науковий результат дослідження характеризується як розвиток теоретичних і практичних аспектів прогнозування ресурсу залізобетонних елементів транспортних споруд. Наукова новизна роботи визначається наступним:

- *подальшим розвитком* уявлення про закономірності деградації залізобетонних елементів конструкцій транспортних споруд – сформульовано теоретичну гіпотезу про залежність довговічності згинаних залізобетонних елементів автодорожніх мостів від ширини розкриття тріщин;

- *вперше розроблено* детерміністичну модель прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів з функцією єдиного параметру – шириною розкриття нормальних тріщин;

- *вперше розроблено* стохастичну модель прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів з функцією єдиного параметра – шириною розкриття нормальних тріщин, яка придатна до застосування на всіх стадіях життєвого циклу експлуатації;

- *набули подальшого розвитку* теоретичні аспекти впливу нормальних тріщин у залізобетонних згинаних елементах на довговічність транспортних споруд.

**Достовірність отриманих результатів** підтверджується використанням методів теорії ймовірностей та математичної статистики, постановкою числових експериментів, збіжністю результатів з достовірними даними натурних спостережень, з даними, отриманими іншими авторами.

**Практичне значення роботи** полягає в наступному:

- *розроблено новітню* інженерну методику прогнозування ресурсу згинаних залізобетонних елементів автодорожніх мостів на всіх стадіях життєвого циклу експлуатації;

- розроблену методику пропонується включити як паралельну модель прогнозування ресурсу до чинного нормативного документа ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів».

- *розроблено пропозиції* з встановлення мінімального проектного рівня надійності при розрахунках залізобетонних елементів автодорожніх мостів за тріщиностійкістю для включення до нормативного документа ДБН В.1.3-22:2009 «Мости і труби. Основні вимоги проектування».

Матеріали досліджень були впровадженні в:

- ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. М.П. Шульгіна»;
- ПАТ «Київсоюзшляхпроект».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення, моделі, практичний інструментарій прогнозування ресурсу є результатом самостійно проведеного дослідження проблеми управління ресурсом залізобетонних елементів автодорожніх мостів, що знаходяться в експлуатації. Дисертація містить нові наукові результати, які було отримано безпосередньо дисертантом. Усі 8 публікацій підготовлені автором дисертації одноосібно.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи були представлені на конференціях і семінарах: Міжнародна науково-практична конференція присвячена 90-річчю з Дня народження академіка М. Г. Бондаря та 100-річчю з Дня народження професора М. Н. Гольдштейна «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, 2010 р.; Сьома науково-технічна конференція «Ресурсо-економні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне 2011р.; Науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, 2012 р.; Науково-технічна конференція «Сучасні методи і технології проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах», м. Київ, 2013 р.; Науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, 2014 р.; Збірник наукових праць української державної академії залізничного транспорту. Вісник ХНАДУ, м. Харків, 2015 р.; На щорічних конференціях НТУ «Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету» (Національний транспортний університет, м. Київ: 2008 – 2015 рр.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 14 робіт, з них 8 статей у фахових виданнях, у тому числі одна стаття у збірнику, що внесений до міжнародної наукометричної бази даних та 6 публікацій апробаційного характеру.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань та чотирьох додатків, що містять алгоритми і комп'ютерні програми прогнозування життєвого циклу, авторські свідоцтва та матеріали впровадження практичних рекомендацій на реальних об'єктах. Робота викладена на 166 сторінках, із них 145 сторінок основного тексту, що містить перелік використаних джерел, 31 рисунок, 40 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі представлено загальну характеристику дисертації та обґрунтовано актуальність роботи, подано наукову новизну та практичне значення дисертаційної роботи, зазначено необхідність розробки апарату моделювання і прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах.

У першому розділі аналізується сучасний стан проблеми прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд. Розглянуто значну кількість робіт з цієї проблеми, яка міцно пов'язана з проблемою надійності споруд. Серед великої кількості авторів назвемо найбільш відомих російських вчених: В.В. Болотін, Л.І. Йосилевський, Р. Мамажанов, О.Р. Ржаніцин, М.С. Стрелецький, В.П. Чирков та українських І. П. Гамеляк, В.П. Кожушко; А.І. Лантух-Лященко, В.В. Мозговий, Д.О. Павлюк, В.В. Панасюк, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин, В.Л. Чернявський.

В останні 30 – 40 років теорія надійності бурхливо розвивається в зарубіжних країнах. Сьогодні широко відомі роботи таких вчених: Г. Аугусти, О. Дитлевсена, А.С. Корнелла, Р.Е. Мельчерса, Д. Франгопола, К. Туркстра.

Виконаний аналіз моделей життєвого циклу показав, що майже немає теоретичних залежностей, які давали б змогу оцінити довговічність елемента на основі фізичних і механічних характеристик матеріалу та рівня навантаження. У публікаціях є дослідження, в яких визначення довговічності виконано через надійність у функції часу, проте практичного застосування такі моделі поки що не знайшли.

Класифікація моделей, проаналізованих в рамках дослідження, дає підстави зробити висновок, що тільки дві моделі – Пальмгрена-Майнера та марковські ймовірнісні набули практичного застосування.

Модель накопичення пошкоджень Пальмгрена-Майнера має свою особливість – залежність моделі від кількості циклів навантаження-розвантаження і тому застосовується у машинобудуванні та лише частково для оцінки життєвого циклу залізничних мостів.

За останні 15 – 20 років для оцінки ресурсу елементів мостів досить широкого застосування набула марковська стохастична феноменологічна модель накопичення пошкоджень, яка використана в моделі оцінювання залишкового ресурсу чинного нормативного документа (національний нормативний документ ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів»).

Прийнята у цьому документі модель є інтегральною, яка функціонально залежить від одного параметра – швидкості деградації (інтенсивність відмов), що визначається експертом на основі огляду та обстеження і не залежить від матеріалу елементів, статичної схеми конструкції, технології спорудження, екологічних умов тощо. Модель прогнозування ресурсу елементів автодорожніх мостів протягом життєвого циклу експлуатації може бути використана тільки починаючи з другого експлуатаційного стану.

Аналіз публікацій дає підставу стверджувати, що проблема прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд є актуальною задачею, суттєвою для суспільства в соціально-економічному плані. Проблема не одне десятиріччя знаходиться в центрі уваги науковців всього світу, зусилля яких спрямовані на розроблення інженерних методик для ефективного управління життєвим циклом залізобетонних елементів мостів.

Проте, серед моделей, що розглядаються, майже немає теоретичних залежностей, які давали б змогу оцінити довговічність елемента на основі фізичних і механічних характеристик матеріалу та рівня навантаження. В той же час, найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону є саме фізичний підхід. Дійсно, в цьому випадку вихідними даними моделі є фізико-механічні характеристики бетону та арматури, параметри елемента, геометричні характеристики перерізу та фактори напружено-деформованого стану.

Проведений аналіз першоджерел дав можливість сформулювати глобальну мету дослідження як науковий пошук моделі життєвого циклу, якою описується процес погіршення технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента протягом строку служби в функції одного параметра – ширини розкриття тріщин.

**Другий розділ** присвячено обґрунтуванню теоретичної гіпотези моделі: єдиний параметр – ширина розкриття нормальних тріщин, є достатньою базою для опису процесу деградації згинаних елементів у функції часу.

Аналіз технічного стану та досвід експлуатації залізобетонних мостів на території України свідчить про те, що факторами, які викликають деградацію елементів залізобетонних мостів є різноманітні ушкодження залізобетону (тріщини, відколи, відшаровування, насичення хлоридами, карбонізація), що знижують ефективність захисних функцій бетону відносно



сталевій арматурі. Основними причинами деградації залізобетонних елементів автодорожніх мостів є утворення тріщин у залізобетоні.

Сьогодні відомо десятки залежностей оцінювання ширини розкриття нормальних тріщин ненапруженого і попередньо-напруженого залізобетону. При всьому різноманітті моделей визначення ширини розкриття нормальних тріщин у згинаних елементах об'єднувальним для них є – процес тріщиноутворення, який найбільш повно відображає деформаційні властивості залізобетонного елемента. Тому в усіх відомих моделях тріщиноутворення використано як параметри: кількість арматури в перерізі елемента, її розрахунковий опір та модуль пружності, параметри розташування арматури в перерізі, а також механічні характеристики бетону.

Аналіз національних та європейських моделей оцінювання ширини розкриття нормальних тріщин показав, що всі вони емпіричного походження і мають спільну аналітичну форму виду:

$$w_b = f(\sigma, A_s, E_p, E_s, h, \Psi), \quad (1)$$

де  $\sigma$  – максимальні напруження в бетоні;

$A_s$  – площа перерізу розтягнутої арматури;

$E_p$  – модуль пружності напруженої арматури;

$E_s$  – модуль пружності ненапруженої арматури;

$h$  – геометричні параметри перерізу;

$\Psi$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив бетону розтягнутої зони й інших факторів.

Аналіз числових результатів розкриття тріщин за моделями, які розглядалися, показав що буде раціональним для дослідження прийняти традиційну модель розрахунку залізобетонних елементів мостів на тріщиностійкість О.Я. Берга, яка має вид:

$$\text{при ненапруженій арматурі} \quad a_{cr} = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot \Psi \leq \Delta_{cr}; \quad (2)$$

$$\text{при напруженій арматурі} \quad a_{cr} = \frac{\Delta\sigma_p}{E_p} \cdot \Psi \leq \Delta_{cr}, \quad (3)$$

де  $a_{cr}$  – розрахункова ширина розкриття тріщин;

$\Delta\sigma_p$  – збільшення напруження в напруженій арматурі після погашення обтиснення бетону;

$\sigma_s$  – розтягувальні напруження в арматурі;

$\Delta_{cr}$  – граничне значення розрахункової ширини розкриття тріщини.

У **третьому розділі** розроблено детерміністичну модель прогнозування довговічності елементів мостів.

Запропонована модель прогнозування строку служби залізобетонних прогонових будов побудована на одному параметрі - ширині розкриття тріщини  $a_r$  в залізобетонних елементах. Цей параметр є одним з головних чинників, які впливають на довговічність залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів і визначається на стадії проектування.

Модель є детерміністичною, в якій змінні функції деградації приймають фіксовані значення за час експлуатації. В цій моделі ігнорується випадкова природа процесу деградації.

Модель життєвого циклу представлено у вигляді:

$$A(t) = a_r \cdot f(t), \quad (4)$$

де  $a_r$  – розрахункова ширина розкриття тріщини;

$f(t)$  – функція індикатор деградації залізобетонного елемента;

$t$  – час (за одиницю часу прийнято рік).

Ширини розкриття тріщин  $a_r$  на стадії проектування, в загальному випадку є функцією таких параметрів:

$$a_r = f_a(b, h, A_{red}, I_{red}, R_{b.ser}, R_{bt.ser}, E_b, E_s, A_s, \Psi), \quad (5)$$

де  $f_a$  – функція ширини розкриття тріщини;

$b$  – ширина прямокутного перерізу, ширина стінки (ребра) таврового, двотаврового і коробчатого перерізів;

$h$  – висота приведенного перерізу;

$A_{red}$  – площа приведенного перерізу елемента;

$I_{red}$  – момент інерції приведенного перерізу;

$R_{b.ser}$  – розрахунковий опір бетону на стиск;

$R_{bt.ser}$  – розрахунковий опір бетону на розтяг;

$A_s$  – площа арматури.

Функція  $f(t)$  – індикатор деградації залізобетонного елемента, безрозмірна функція, яка має вигляд:

$$f(t) = (m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5)^{-1} \cdot s \cdot t^2, \quad (6)$$

де  $m_i$  – коефіцієнти, які визначаються;

$m_1$  – в залежності від типу армування;

$m_2$  – в залежності від проектного класу бетону;

$m_3$  – в залежності від типу конструкції;

$m_4$  – в залежності від умов експлуатації;

$m_5$  – в залежності від класу навантаження;

$s$  – розмірний коефіцієнт.

Модель життєвого циклу (4) приводиться до форми, що відповідає моделі, з поділом життєвого циклу на 5 експлуатаційних станів, використаній у ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів». Тому в моделі життєвого циклу (4)  $A(t)$  приймається таким, що дорівнює  $A_i$  – граничному значенні ширини розкриття тріщини в  $i$ -му експлуатаційному стані ( $i = 1; 2; \dots; 5$ ) відповідно до ДСТУ-Н Б В.2.3-23. Тоді проектний час досягнення  $i$ -го експлуатаційного стану визначається залежністю:

$$T_i = \sqrt{\frac{K \cdot A_i}{a_r \cdot s}}, \quad i = 1, 2, \dots, 5, \quad (7)$$

де  $K$  – узагальнений коефіцієнт типу конструкції та умов експлуатації, який є добутком п'яти коефіцієнтів моделі і визначається як:

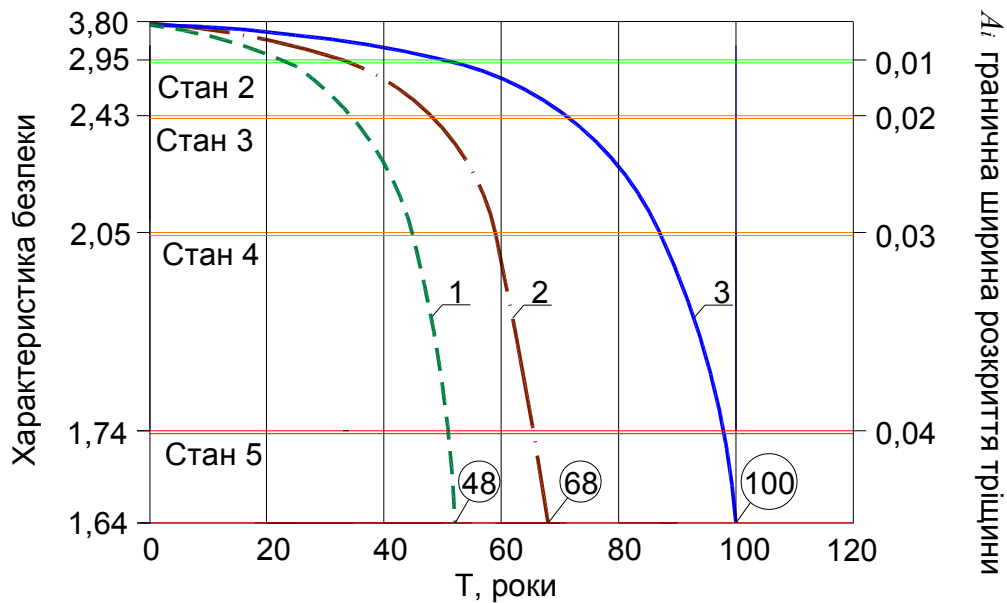
$$K = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot m_5, \quad m_i \leq 1, \quad K \leq 1; \quad (8)$$

де  $i$  – номер дискретного стану. У випадку  $i = 5$  із співвідношення (7) отримуємо залишковий ресурс.

Усі коефіцієнти моделі  $m_i$  визначені на основі статистичних даних Аналітичної експертної системи управління мостами Укравтодору (АЕСУМ).

Система коефіцієнтів моделі побудована таким чином, що при максимальних значеннях коефіцієнтів  $K = 1,0$ , які відповідають ідеальним умовам експлуатації (повне дотримання чинних норм експлуатації мостів), прогнозування проектного часу життєвого циклу експлуатації становить 100 років. Найменші значення коефіцієнтів моделі, які корелюють з даними

системи експлуатації мостів  $K < 1,0$ , що відносяться до випадку відсутності систематичної експлуатації, модель дає мінімальні значення прогнозування часу життєвого циклу (рис. 1).

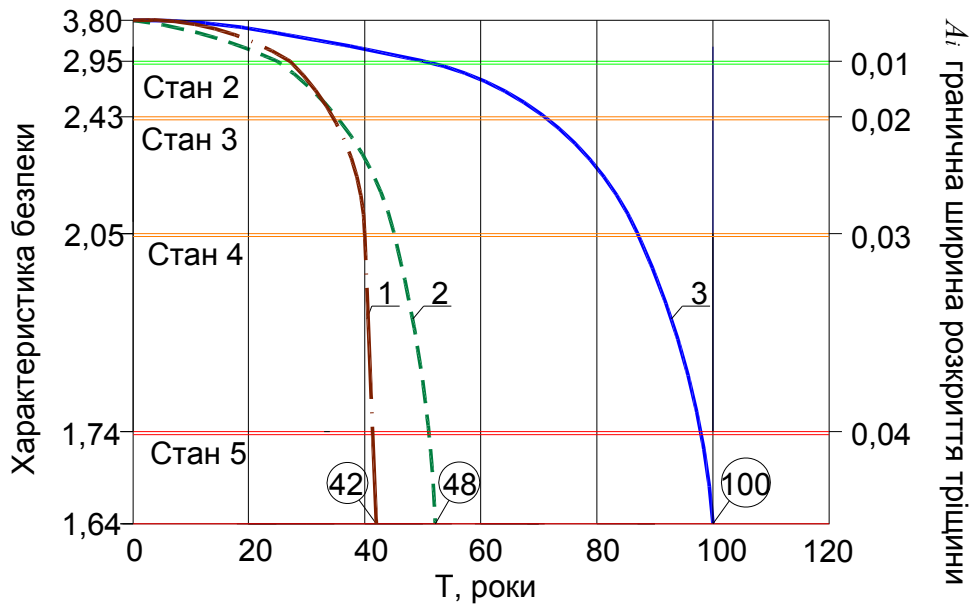


1 – відсутня систематична експлуатація; 2 – середні умови експлуатації; 3 – експлуатації згідно з вимогами чинних норм.

Рисунок 1 – Прогнозування життєвого циклу монолітних залізобетонних прогонових будов залежно від умов експлуатації

У рамках розділу 3 виконано аналіз достовірності моделі прогнозування життєвого циклу залізобетонних прогонових будов. Показано, що ресурс монолітних, збірно – монолітних та збірних прогонових будов визначених за авторською моделлю співпадає з прогнозами експертної системи АЕСУМ (рис.2). Модель дає результати достатньої збіжності з даними системи експлуатації автодорожніх мостів (у межах 7 – 14 % похибки), що є вагомим обґрунтуванням можливості застосування моделі на всіх етапах життєвого циклу експлуатації.

У проведеному дослідженні, представленому в розділі 3 доведено, що модель деградації, заснована на засадах аналізу тріщиностійкості, може бути ефективним інструментом оцінки і прогнозування ресурсу згинаних залізобетонних елементів мостів у системі експлуатації залізобетонних автодорожніх мостів.



1 – модель ДСТУ-Н; 2 – модель що пропонується; 3 – за проектними вимогами

Рисунок 2 – Прогнозування життєвого циклу монолітних залізобетонних прогонових будов за моделями

У четвертому розділі наведено теоретичне дослідження ймовірнісної оцінки результатів прогнозування строку служби та запропоновано методику визначення розрахункового строку служби із заданою забезпеченістю. Для ймовірнісної оцінки прогнозованого строку служби залізобетонних елементів автодорожніх мостів запропонована стохастична модель.

Задача розбудови моделі надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації формулюється як пошук ймовірності не перевищення граничного стану за час  $t$ :

$$P(t) = P\{a_{cr} - A(t) \geq 0\}, \quad (9)$$

де  $a_{cr}$  – критична ширина розкриття тріщин;

$A(t)$  – функція життєвого циклу залізобетонного елемента за тріщиностійкістю.

Умовою граничного стану є  $a_t \leq A_{cr}$ ; де  $a_t$  – поточна ширина розкриття тріщин від заданих постійних і тимчасових навантажень;  $A_{cr}$  – граничне значення ширини розкриття тріщин при експлуатації.

Приймаючи усталену гіпотезу нормального розподілу ширини розкриття тріщин із часом, отримаємо вираз для характеристики безпеки:

$$\beta(t) = \frac{\mu_{cr} - \mu_a(t)}{(\sigma_{cr}^2 + \sigma_s^2)^{0,5}}, \quad (10)$$

де  $\mu_{cr}$  – середнє значення критичної ширини розкриття тріщин;  
 $\mu_a(t)$  – середнє значення ширини розкриття тріщин на час  $t$ ;  
 $\sigma_{cr}$  – середньоквадратичне відхилення критичної ширини розкриття тріщин;  
 $\sigma_s$  – середньоквадратичне відхилення зовнішнього навантаження.

Середнє значення ширини розкриття тріщин на час  $t$  –  $\mu_a(t)$  в формулі (10) виражається через прийняту функцію індикатор деградації залізобетонного елемента (4).

Числовий аналіз надійності елемента за тріщиностійкістю в функції часу експлуатації за формулою (10) показав, що характеристика безпеки варіюється в межах  $\beta(t) = 4,2 \dots 1,5$  залежно від параметрів міцностних характеристик бетону і арматури, коефіцієнтів варіації матеріалів та зовнішніх навантажень.

У результаті аналізу надійності елемента, виконаного в цьому розділі, отримані нові дані, які дозволяють внести до нормативного документу пропозиції з регламентації мінімального проектного рівня надійності при розрахунках залізобетонних елементів автодорожніх мостів за тріщиностійкістю.

Виконане дослідження дає підставу стверджувати, що модель прогнозування життєвого циклу, єдиним параметром якої є ширина розкриття тріщини згинаних залізобетонних елементів мостів, може стати найбільш обґрунтованою з точки зору фізики руйнування залізобетону в часі.

**У п'ятому розділі** наведена інженерна методика прогнозування технічного стану залізобетонних елементів мостів та оцінка їх надійності протягом життєвого циклу експлуатації. У розділі представлено детальний алгоритм прогнозування ресурсу згинаних елементів мостів, для якого використано детерміністичну модель (4). Процедура прогнозування ресурсу є єдиною для плити проїзної частини і для балки прогонової будови.

Алгоритм містить опис і вимоги до початкових даних для розрахунку. Наведені рекомендації з призначення коефіцієнтів моделі в залежності від проектних характеристик бетону і арматури, геометричних параметрів елемента та умов експлуатації. Результатами розрахунку є деградаційна крива та прогнозований час досягнення  $i$  – го експлуатаційного стану.

Відповідно до алгоритму складено комп'ютерну програму. Наводяться числові приклади прогнозування ресурсу мостів бази даних «Аналітичної експертної системи управління мостами».

Другий розділ методики містить алгоритм і програму оцінки надійності за шириною розкриття тріщин протягом життєвого циклу експлуатації. Використовується стохастична модель (10), в якій характеристика безпеки виражена через ширину розкриття нормальних тріщин. Наводяться приклади оцінки надійності елементів мостів, що знаходяться в експлуатації.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача прогнозу довговічності згинаних залізобетонних елементів мостів на основі аналізу тріщиностійкості. Єдиним параметром, в функції якого прогнозується ресурс, є ширина розкриття нормальних тріщин при згині. Проведені теоретичні та числові експериментальні дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз сучасного стану проблеми прогнозування довговічності згинаних залізобетонних елементів мостів. Встановлено, що в теорії споруд до цього часу не існує моделі деградації, яка базувалась би на теорії тріщиностійкості залізобетону.

2. Вперше розроблена в рамках дисертації модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів у функції ширини розкриття тріщин придатна до застосування на всіх етапах життєвого циклу експлуатації. Дослідженням роботи доведено, що модель деградації залізобетону, яка базується на засадах аналізу тріщиностійкості може бути ефективним інструментом оцінювання і прогнозування ресурсу в системі експлуатації залізобетонних автодорожніх мостів.

3. Виконаний аналіз чутливості та достовірності моделі дає підстави стверджувати, що керувати ресурсом залізобетонних елементів можна змінюючи механічні характеристики матеріалів, площу арматури, схеми армування і в такий спосіб регулювати строк служби елемента і конструкції в цілому. Виконано порівняльні експерименти, які показують, що модель дає

результати достатньої збіжності з історичними даними системи експлуатації автодорожніх мостів (у межах 7 – 14 % похибки). Доведено, що запропонована модель, з єдиним параметром – шириною розкриття тріщин, є реалістичною, дає прийнятні для практики результати і дозволяє прогнозувати строк служби згинаних залізобетонних елементів мостів на всіх етапах життєвого циклу експлуатації.

4. Вперше розроблено стохастичну модель, в якій характеристика безпеки виражається через параметри тріщиностійкості залізобетонного елемента і дає можливість визначити надійність елемента з урахуванням мінливості фізико-механічних характеристик у часі. Виконане дослідження дає підстави стверджувати, що мінімальний проектний рівень надійності за тріщиностійкістю має призначатися таким же як і для першої групи граничних станів (характеристика безпеки  $\beta = 3,8$ , тобто, ймовірність того, що не буде перевищено граничного стану  $P = 0,9998$ ).

5. Встановлений, у рамках запропонованої моделі, зв'язок з нормативним документом ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» відкриває шлях до паралельного прогнозування залишкового ресурсу згинаних залізобетонних елементів. Представлена модель дозволяє враховувати вплив як конструктивних характеристик (фізико-механічні характеристики бетону та арматури, тип армування, тип конструкції за способом спорудження), так і експлуатаційних факторів (умов експлуатації споруди, інтенсивності тимчасового навантаження, параметрів довкілля).

6. Розроблена модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів у функції ширини розкриття тріщин призначена для системи експлуатації, проте, може бути узагальненою для використання на етапі проектування.

7. Результати дисертаційного дослідження знайшли застосування в експлуатації транспортних споруд на автомобільних дорогах України. Підготовлені пропозиції щодо включення розробленої детерміністичної



моделі в програмному комплексі «АЕСУМ» Укравтодору. Дослідженням доведено, що розроблену детерміністичну модель після експериментального застосування можна пропонувати до нормативного документу ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012 як паралельну до чинної. За результатами дослідження вноситься пропозиція внести до нормативного документу ДБН В.1.3- 22:2009 «Мости і труби. Основні вимоги проектування» положення про встановлення проектного рівня надійності за тріщиностійкістю таким же як за вимогами до першої групи граничних станів.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті у виданнях, що внесені до міжнародної наукометричної бази даних:**

1. Янчук Л.Л. Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів що знаходяться в експлуатації / Л.Л. Янчук // Збірник наукових праць ДАЗТ. – Харків, 2015. – № 151. – С. 21 – 26.

**Статті у наукових фахових виданнях:**

2. Янчук Л.Л. Детерміністична модель прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу / Л.Л. Янчук // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-тех. зб. – К. : НТУ, 2010. – Вип. 78. – С. 80 – 91.

3. Янчук Л.Л. Обґрунтування моделі прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу / Л.Л. Янчук // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 664. – С. 365 – 370.

4. Янчук Л.Л. Чутливість моделі життєвого циклу плити проїзної частини автодорожнього мосту / Л.Л. Янчук // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне, 2011. – № 22. – С.108 – 113.

5. Янчук Л.Л. Методологія оцінки ресурсу залізобетонних прогонових будов на стадії проектування / Л.Л. Янчук // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-тех. зб. – К. : НТУ, 2013. – Вип. 89. – С. 235–246.

6. Янчук Л.Л. Аналіз тріщиностійкості залізобетонних елементів мостів як практичний апарат прогнозу ресурсу / Л.Л. Янчук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – № 25. – С. 132–137.

7. Янчук Л.Л. Модель оцінки надійності за тріщиностійкістю у функції часу / Л.Л. Янчук // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-тех. зб. – К. : НТУ, 2014. – Вип. 92. – С. 183 – 191.

8. Янчук Л.Л. Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів що знаходяться в експлуатації / Л.Л. Янчук // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: наук.-тех. зб. – К. : НТУ, 2015. – Вип. 93. – С. 217 – 224.

#### **Опубліковані праці апробаційного характеру:**

9. Янчук Л.Л. Постановка задачі прогнозу довговічності елементів мостових переходів в процесі експлуатації / Л.Л. Янчук // LXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2009. – С. 125.

10. Янчук Л.Л. Детерміністична модель прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів мостового переходу / Л.Л. Янчук // LXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2010. – С. 131.

11. Янчук Л.Л. Визначення характеристики безпеки плити проїзної частини на стадії проектування / Л.Л. Янчук // LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2012. – С. 142.

12. Янчук Л.Л. Порівняльний аналіз з розрахунку ширини розкриття тріщини за ДБН та ЕС / Л.Л. Янчук // LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників

відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2013. – С. 160.

13. Янчук Л.Л. Прогноз довговічності збірно - монолітних та монолітних прогонових будов на стадії проектування / Л.Л. Янчук // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2014. – С. 141.

14. Янчук Л.Л. Довговічність залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів України / Л.Л. Янчук // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2015. – С. 181.

## АНОТАЦІЯ

Янчук Л. Л. Прогнозування технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми. – Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена актуальній проблемі оцінки технічного стану залізобетонних автодорожніх мостів, прогнозуванню ресурсу залізобетонних елементів мостів на всіх етапах життєвого циклу експлуатації.

У роботі виконано аналіз літературних джерел, присвячених дослідженням прогнозування довговічності залізобетонних елементів. Показано, що найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону, є фізичний підхід – моделі розбудовані на основі фізико-механічних характеристик та факторів напружено-деформованого стану.

Виконано обґрунтування теоретичної гіпотези дослідження: єдиний параметр – ширина розкриття нормальних тріщин, є достатньою базою для опису процесу деградації згинаних залізобетонних елементів у функції часу.

Розроблено детерміністичну математичну модель життєвого циклу експлуатації. Модель дає можливість прогнозування ресурсу елемента протягом життєвого циклу експлуатації в залежності від його фізико-

механічних характеристик у функції одного параметра – ширини розкриття тріщин. Доведено адекватність і достовірність моделі.

Виконано теоретичне дослідження ймовірнісної оцінки результатів прогнозування строку служби. Запропоновано стохастичну модель надійності залізобетонних елементів протягом життєвого циклу експлуатації.

Розроблена інженерна методика прогнозування технічного стану залізобетонних елементів мостів та оцінка їх надійності протягом життєвого циклу експлуатації. Наведено детальний алгоритм прогнозування ресурсу згинаних елементів мостів, для якого використано детерміністичну та стохастичну моделі.

**Ключові слова:** залізобетонні елементи автодорожніх мостів, детерміністична модель прогнозування ресурсу, життєвий цикл експлуатації, стохастична модель надійності, ширина розкриття тріщин.

### АННОТАЦІЯ

Янчук Л. Л. Прогнозирование технического состояния железобетонных элементов транспортных сооружений на автомобильных дорогах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 – автомобильные дороги и аэродромы. – Национальный транспортный университет Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена актуальной проблеме оценки технического состояния железобетонных автодорожных мостов, прогнозированию ресурса железобетонных элементов мостов на всех этапах жизненного цикла эксплуатации.

В работе выполнен анализ литературных источников, посвященных исследованиям прогнозирования долговечности железобетонных элементов. Показано, что наиболее полным, с точки зрения возможностей описания процесса деградации железобетона, является физический подход – модели, построенные на основе физико-механических характеристик и факторов напряженно-деформированного состояния.

Выполнено обоснование теоретической гипотезы исследования: единственный параметр – ширина раскрытия нормальных трещин, является достаточной базой для описания процесса деградации изгибаемых железобетонных элементов в функции времени.

Разработана детерминистическая математическая модель жизненного цикла эксплуатации. Модель дает возможность прогнозирования ресурса элемента в течение жизненного цикла эксплуатации в зависимости от его физико-механических характеристик в функции одного параметра – ширины раскрытия трещин. Доказана адекватность и достоверность модели.

Выполнено теоретическое исследование вероятностной оценки результатов прогнозирования срока службы. Предложено стохастическую модель надежности железобетонных элементов в течение жизненного цикла эксплуатации.

Разработана инженерная методика прогнозирования технического состояния железобетонных элементов мостов и оценка их надежности в течение жизненного цикла эксплуатации. Приведен подробный алгоритм прогнозирования ресурса изгибаемых элементов мостов, для которого использовано детерминистическая и стохастическая модели.

**Ключевые слова:** железобетонные элементы автодорожных мостов, детерминистическая модель прогнозирования ресурса, жизненный цикл эксплуатации, стохастическая модель надежности, ширина раскрытия трещин

## SUMMARY

**Ianchuk L.L. Reinforced concrete elements of transport structures on highways assessment and prediction – Manuscript.**

The thesis for the degree of technical sciences candidate, specialty 05.22.11 – roads and airports. – National Transport University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

Dissertation is devoted to the actual problem of reinforced concrete highways bridges assessment, forecasting resource concrete bridge elements at all stages of the life cycle of exploitation.

In this paper, the analysis of the literature devoted to the study of forecasting the durability of reinforced concrete elements. It is shown that the most complete in terms of features describing concrete degradation process is a physical approach - models based on physical and mechanical characteristics and factors of stress-strain state.

The justifications theoretical hypotheses of the study: a single parameter - the width of the opening of normal cracks is sufficient basis for the description of the process of degradation of flexural reinforced concrete elements against time.

A deterministic mathematical model of the operation of the life cycle. The model allows the prediction of a resource element for the life cycle of operation, depending on its physical and mechanical properties as a function of one parameter - the width of the crack opening. We prove the adequacy and accuracy of the model.

The theoretical study of the probabilistic assessment of forecasting results service life. Reliability stochastic model of reinforced concrete elements during operation of the life cycleproposed.

Developed engineering method for predicting the technical state of reinforced concrete elements of bridges and assessment of their reliability during the operation of the life cycle. A detailed algorithm for the prediction of the resource elements bent bridges for which used deterministic and stochastic models.

**Keywords:** reinforced concrete elements of road bridges, deterministic prediction model of resource life cycle operation, the reliability of a stochastic model, the width of the crack opening.

Підписано до друку 17.03.2016.  
Папір офсетний №1. Гарнітура TimesNewRoman  
Формат 60x84 / 8. Тираж 100. Зам. 4371

Редакційно-видавничий відділ НТУ.  
01010, Україна, Київ, вул. Кіквідзе, 39, тел. +(38 044) 284 26 26