

Міністерство освіти і науки України

Національний транспортний університет

ЯЦКО ФЕДІР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 624.21

**МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ СПОРУД НА
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ**

05.23.17 – будівельна механіка

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Лантух-Лященко Альберт Іванович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри мостів та тунелів

Офіційні опоненти

доктор технічних наук,
Редченко Василь Павлович,
Державне підприємство “Державний
дорожній науково-дослідний інститут ім.
М.П. Шульгіна”, завідувач
Дніпропетровського комплексного
відділу
кандидат технічних наук,
Фаль Андрій Євгенович, головний
інженер ПАТ «Київсоюзшляхпроект»

Захист відбудеться «__» _____ 2015 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 при Національному транспортному університеті за адресою: 01001, Україна, м. Київ, вул. Суворова, 1, ауд 333.

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

Автореферат розісланий «__» _____ 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.І. Каськів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сьогодні проблема визначення ресурсу транспортних споруд в Україні є вкрай актуальною. Згідно офіційної статистики приблизно п'ята частина автодорожніх мостів, підпорядкованих «Укравтодору» знаходяться у незадовільному стані і потребують ремонту чи реконструкції, це пов'язано в свою чергу з необхідністю значних капіталовкладень.

Досвід експлуатації залізобетонних автодорожніх мостів України показав, що середній строк служби більшості прогонових будов складає 35 – 50 років, тоді як нормативний строк служби має складати мінімум 70 – 100 років. Кількість мостів, що знаходяться в 4 або 5 експлуатаційному стані і потребують терміново капітального ремонту або реконструкції, станом на 1.01.2015, збільшилася до 2130 одиниць.

Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруди. Зараз визнається, низька довговічність споруди закладається ще на стадії вишукування і проектування, тому що в проектному рішенні ніяк не відображається в яких умовах і з якою швидкістю протікатиме деградація залізобетону.

Очевидно, що існуючі моделі оцінки довговічності протягом життєвого циклу не є адекватними нашому досвіду будівництва і експлуатації мостів. Тому назріла необхідність звернення до нового інструментарію, до нових моделей прогнозу ресурсу, що відповідають українським реаліям.

Проблема прогнозування ресурсу залізобетонних елементів, як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації, – завжди була найменш вивченою в теорії споруд, а з іншого боку – найбільш вагомою в соціально-економічному плані. Що ж стосується прогнозування ресурсу залізобетонних елементів на етапі проектування, то нам невідомі дослідження в Україні або в Росії, які мають реальне практичне впровадження. Очевидно, що в цих умовах дослідження спрямовані на оцінку і прогнозування довговічності залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів будуть відповідати інтересам суспільства і державній політиці в сфері техногенної і економічної безпеки.

Зв'язок роботи з науковими програмами і планами. Тема дисертації відповідає актуальним напрямам науково-технічної політики України в галузі управління експлуатаційною надійністю і довговічністю споруд і конструкцій: з Постановою Кабінету Міністрів України від 5 травня 1997 № 409 «Про забезпечення надійності та безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж», а також з Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 червня 2003 № 351-р «Про схвалення Концепції державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки», відповідає бюджетній програмі «Фундаментальні дослідження у вищих навчальних закладах та наукових установах» (КПКВ 2201020)

та реалізована у держбюджетній темі № 3, номер державної реєстрації теми: 0111U000095 «Теоретичні засади оцінки ресурсу транспортних споруд» 2011-2013 роки, а також відповідає бюджетній програмі «Прикладні дослідження і розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ» (КПКВ 2201040) реалізований в держбюджетній темі № 69, номер державної реєстрації теми: 0109U002145 «Прогноз і оптимізація життєвого циклу транспортних споруд» 2009-2010 роки.

Об'єкт дослідження – процес деградації залізобетонних елементів будівельних конструкцій.

Предмет дослідження – моделі прогнозування ресурсу згинаних залізобетонних елементів мостів.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розробка моделей прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були вирішені такі задачі:

- виконати аналіз і систематизувати математичні моделі деградації залізобетонних елементів і зформулювати наукову задачу прогнозування життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд;
- розробити детерміністичну модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів транспортних споруд;
- розробити стохастичну модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів транспортних споруд;
- обґрунтувати і довести адекватність розроблених моделей;
- розробити практичний інструментарій управління ресурсом залізобетонних елементів автодорожніх мостів протягом життєвого циклу експлуатації.

Методи дослідження – теорія старіння будівельних матеріалів, методи аналітичної теорії дифузії, теорія ймовірностей та математичної статистики, теорія випадкових процесів, теорія надійності будівельних конструкцій, методи числового моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційному дослідженні виконано науковий пошук моделей оцінки і прогнозування ресурсу залізобетонних елементів протягом життєвого циклу. Отримані нові результати є першою спробою зв'язати фундаментальні нерівності граничних станів з часом та утворюють у сукупності теоретичну і методичну базу оцінки довговічності залізобетонних елементів. Наукова новизна найбільш істотних результатів визначається наступним:

- *вперше* розроблено узагальнену стохастичну модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів мостів у функції фізико-механічних характеристик матеріалів та часу експлуатації;
- *отримала подальший розвиток* детерміністична модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів мостів;
- *дістали подальший розвиток* теоретичні аспекти впливу фізико-механічних та експлуатаційних факторів на технічний стан автодорожніх мостів України;
- розроблена новітня інженерна методика прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на всіх стадіях життєвого циклу, починаючи з проектування;
- розроблена комп'ютерна програма практичної реалізації прогнозування ресурсу;
- розроблені пропозиції з прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування для включення до пакету нормативних документів «Споруди транспорту».

Достовірність отриманих результатів. Достовірність підтверджується використанням строгих методів теорії ймовірностей та математичної статистики, методів аналітичної теорії дифузії, постановкою числових експериментів, збіжністю результатів з достовірними даними натурних спостережень, сумірністю результатів з результатами інших авторів.

Практичне значення роботи полягає в розробленні інженерної методики оцінювання і прогнозування строку служби елементів мостів в експлуатації. Розроблені пропозиції з прогнозування ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування для включення до пакету нормативних документів «Споруди транспорту».

Матеріали досліджень були впровадженні в ДП «ДерждорНДІ», а також ПАТ «Київсоюзшляхпроект», де встановлені розроблені програмні засоби «Визначення часу карбонізації захисного шару залізобетонного елемента» та «Прогнозування довговічності згинаних залізобетонних елементів мостів», які є результатом досліджень дисертаційної роботи. Ці програмні засоби застосовуються в техніко-економічних порівняннях варіантів проектів мостів на автомобільних дорогах для оцінювання ресурсу залізобетонних прогонових будов.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, моделі, практичний інструментарій прогнозування ресурсу є результатом самостійно проведеного дослідження проблеми управління ресурсом залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування. Дисертація містить наукові результати, які були

отримані особисто дисертантом. З тринадцяти публікацій одинадцять підготовлені автором дисертації одноосібно.

У роботі [7] виведені розв'язувальні співвідношення, сформульовано алгоритм прогнозування ресурсу, проведений аналіз адекватності моделі.

У роботі [12] виведено основні залежності, проведено розрахунки надійності і довговічності.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи були представлені та доповідались на конференціях і семінарах: щорічні Наукові конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, тези доповідей (Київ, НТУ – травень 2012 р., травень 2013 р., травень 2014 р.), 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 27.05 – 28.05.2010 р. Сьома науково-технічна конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, 27 – 29 вересня 2011 р., науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 11 – 12 жовтня 2012 р., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Науково-практичний семінар «Расчет и проектирование сложных строительных объектов в среде SCAD Office», КНУБА, Київ, 4 – 6 листопада 2013 р., науково-технічна конференція «Розвідування, проектування доріг та переходів через водотоки», Київ: НТУ, 2013 р., науково-технічна конференція «Сучасні методи і технології проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах», Київ, 4 – 5 квітня 2013 р., Всеукраїнська науково-практична конференція "Современные проблемы и перспективы сохранения искусственных сооружений на автомобильных дорогах Украины", Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харків 2013 р., науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 14 – 15 жовтня 2014 р., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 8 міжнародна конференція «AMCM 2014. Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures», 16 – 18 червня 2014 р. Вроцлав, Польща.

Публікації. За темою дисертації та результатами досліджень автором опубліковано 13 робіт, з них 11 одноосібно, 8 в наукових фахових виданнях, 5 тез доповідей на наукових конференціях, 1 стаття у збірнику, що внесений до міжнародної наукометричної бази даних.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 237 сторінок, зокрема 188 сторінок основного тексту, 37 таблиць та 111 рисунків, список використаних джерел (194 найменувань) на 18 сторінках і 31 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, новизну та практичне значення дисертаційної роботи, зазначено необхідність розробки апарату моделювання і прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах.

У **першому розділі** розглядається сучасний стан проблеми прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд. Аналізуються роботи вітчизняних дослідників: В.В. Болотіна, І.П. Гамеляка, В.Н. Гордеева, Є.В. Горохова, Є.А. Егорова, В.П. Кожушко, В.П. Корольова, А.І. Лантух-Лященко, А.В. Махинько, В.В. Мозгового, В.Ф. Невінгловського, О.І. Оглоблі, А.М. Онищенко, В.А. Пашинського, С.Ф. Пичугина, А.В. Перельмутера, А.Р. Ржаніцина, В.П. Редченко, М.В. Савицького, О.М. Савицького, А.О. Титюка, С.Б. Усаковского, А.Є. Фаля, Т.Ю. Шевченко. Наводиться, сформована в результаті аналізу класифікація відомих підходів моделювання процесів деградації залізобетонних елементів.

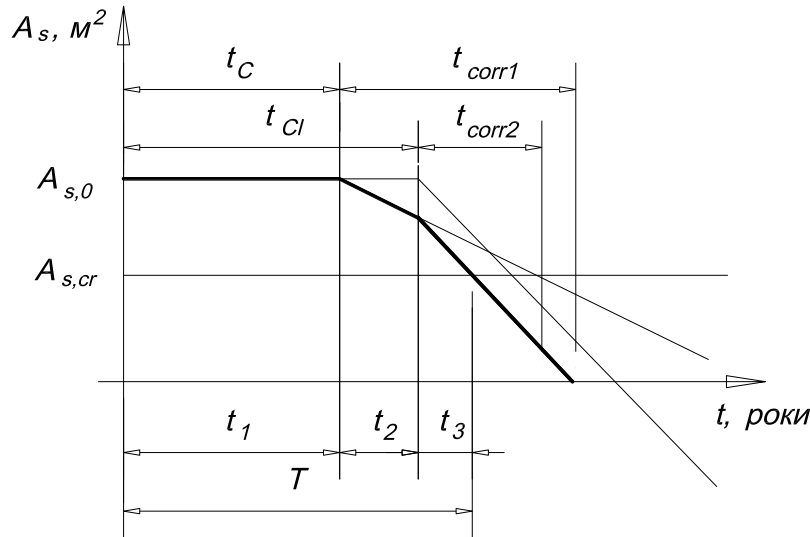
Більшість досліджень з проблеми довговічності базуються на науковій ідеї прогнозування часу деградації захисного шару залізобетонних елементів. Науковим підґрунтям такого підходу є закони дифузії Адольфа Фіка. Серед моделей цього типу, включених до нашого огляду, найбільш повною є модель, запропонована R.M. Ferreira, проте вона не містить складової напружено-деформованого стану елемента.

Виконаний аналіз стану проблеми довговічності показав, що ефективна модель прогнозу життєвого циклу побудована на фізичному підході має містити в собі також модель деградації арматури. Сьогодні для цього є солідний науковий базис. Процес деградації арматурної сталі достатньо вивчений. Моделі корозійного зносу сталі Зеленцова Д.Г., Нікітіна В.І., Овчинникова І.Г., Расулова І.Р., Liddart A. у вітчизняній науці є загальноприйнятими, перевіреними і дають реалістичні результати в розрахунках.

Серед публікацій, включених до огляду, слід виокремити ймовірносний підхід оцінки довговічності, що базується на фундаментальних принципах статистичного аналізу (метод Монте-Карло) DuraCrete, Life-365.

У **другому розділі** розроблено і узагальнено детерміністичну модель прогнозування довговічності елементів мостів. Поєднавши модель деградації залізобетону Tuutti та Овчинникова І.Г., а також результати досліджень, розглянутих

в розділі, сформована модель деградації, що в графічній інтерпретації представлена на рис. 1:



A_{s0} – проектна площа поперечного перерізу робочої арматури; A_{s0} – площа поперечного перерізу робочої арматури за граничних умов; t_C – час карбонізації захисного шару; t_{Cl} – час насичення захисного шару хлоридами; t_{corr1} – період корозії арматури в карбонізованому бетоні; t_{corr2} – період корозії арматури в бетоні насиченому хлоридами; t_1, t_2, t_3 – періоди життєвого циклу; T – ресурс

Рисунок 1 – Схема деградації залізобетону

Модель містить дві принципові складові деградації: хлоридизація і карбонізація захисного шару бетону та корозія арматури. Час хлоридизації визначається залежністю:

$$t_{Cl} = \frac{1}{D_{CL}} \left[\frac{x}{2 \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1} \right)} \right]^2, \quad (1)$$

де t_{Cl} – час накопичення концентрації хлорид-іонів, у роках, на глибині x , м; C_S – концентрація хлорид-іонів, у відсотках від маси в'язучого, на денній поверхні всередині бетону; C_1 – початкова концентрація хлорид-іонів, у відсотках від маси в'язучого, всередині бетону; C_{CR} – концентрація хлорид-іонів, у відсотках від маси в'язучого, на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури; D_{CL} – коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні; $\operatorname{erfc}()$ – додаткова функція помилок.

Коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні:

$$D_{CL} = 10^{(-12,06 + 2,4B/C)} \cdot \left[1 + \frac{(1+H)^4}{(1-H_{Cr})^4} \right]^{-1} \cdot e^{q \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K_1} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma}{f} \right) \right]^2, \quad (2)$$

де B/C – водо-цементне співвідношення; H – вологість повітря (%); H_c – критична вологість повітря (75%); q – константа активації дифузії; K_0 – нормальна температура; K – температура; A – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні (при стисканні -0,0236, розтягу +0,0496); σ – напруження в бетоні; f – граничний опір бетону.

Час повної карбонізації захисного шару визначати за формулою:

$$t_c = \frac{x^2 \cdot m_0}{2 \cdot D_e \cdot C}, \quad (3)$$

де x – товщина захисного шару; m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні; D_e – ефективний коефіцієнт дифузії; C – концентрація діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону.

Реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні:

$$m = 3 \cdot B / C - 0,6. \quad (4)$$

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури швидкість деградації арматури:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = v_0 \exp \left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T_K} \right), \quad (5)$$

де δ – глибина корозійного ушкодження арматури; v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень; V – мольний об'єм кородуючого металу; σ – напруження в арматурі; R – універсальна газова стала; T_K – температура.

Вираз для отримання різниці ΔM_n між проектною характеристичною несною здатністю M_{0n} , що відповідає проектній характеристиці безпеки $\beta(0)$ та несною здатністю $M_{\beta n}$, що відповідає $\beta(i)$ обраного експлуатаційного стану:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n}. \quad (6)$$

Рівняння рівноваги нормального перерізу, що відповідає ΔM_n визначається функцію, що залежить від часу

$$\Delta M_n = R_{sn} \cdot \Delta A_{s,corr}(\beta) \cdot \left(h_{01} - \frac{R_{sn} \cdot \Delta A_{s,corr}(\beta)}{2 R_{bn} \cdot b} \right), \quad (7)$$

тоді

$$A_{s,corr}(\beta) = \frac{R_{bn} \cdot b}{R_{sn}} \left(h_{01} - \sqrt{h_{01}^2 - \frac{2 \Delta M_n(\beta)}{R_{bn} \cdot b}} \right), \quad (8)$$

де R_{sn} – нормативний опір арматури на розтяг, МПа; R_{bn} – нормативний опір бетону на стиск, МПа; h_{01} – робоча висота перерізу шару арматури, що розташована на глибині захисного шару; b – ширина перерізу, м; $\Delta A_{s,corr}$ – площа поперечного перерізу робочої арматури знищеної корозією, м².

Припускаючи, що зменшення характеристики безпеки пов'язане зі зменшенням площі перерізу арматури внаслідок корозійного ушкодження, запишемо функцію залежності площі поперечного перерізу робочої арматури, знищеної корозією протягом часу експлуатації:

$$A_{s,corr}(t_{corr}) = \pi \cdot n_1 \cdot \left(d \cdot v_{corr} \cdot t_{corr} - v_{corr}^2 \cdot t_{corr}^2 \right), \quad (9)$$

де n_1 – кількість робочих стрижнів, що розташовані на глибині захисного шару; d – діаметр стрижнів робочої арматури; v_{corr} – швидкість корозії арматури; t_{corr} – час.

Поєднавши вирази (8) та (9) можливо аналітично отримати t_{corr} , що відповідає ΔM_n :

$$t_{corr} = \frac{d}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot d^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right)} \right). \quad (10)$$

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури визначається залежністю:

$$v = \frac{\partial \delta}{\partial t} = v_0 \exp \left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T_K} \right), \quad (11)$$

де δ – глибина корозійного ушкодження арматури, м; v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень; V – мольний об'єм кородуючого металу, м³/моль; σ – напруження в арматурі, МПа; R – універсальна газова стала 8,314472 Дж/(моль·К); T_K – температура, К.

На рис. 2 наведено порівняння результатів обчислень за розробленою моделлю з даними статистики Департаменту транспорту Канзаса, яка охоплює 2342 мости в північно-східному Канзасі.

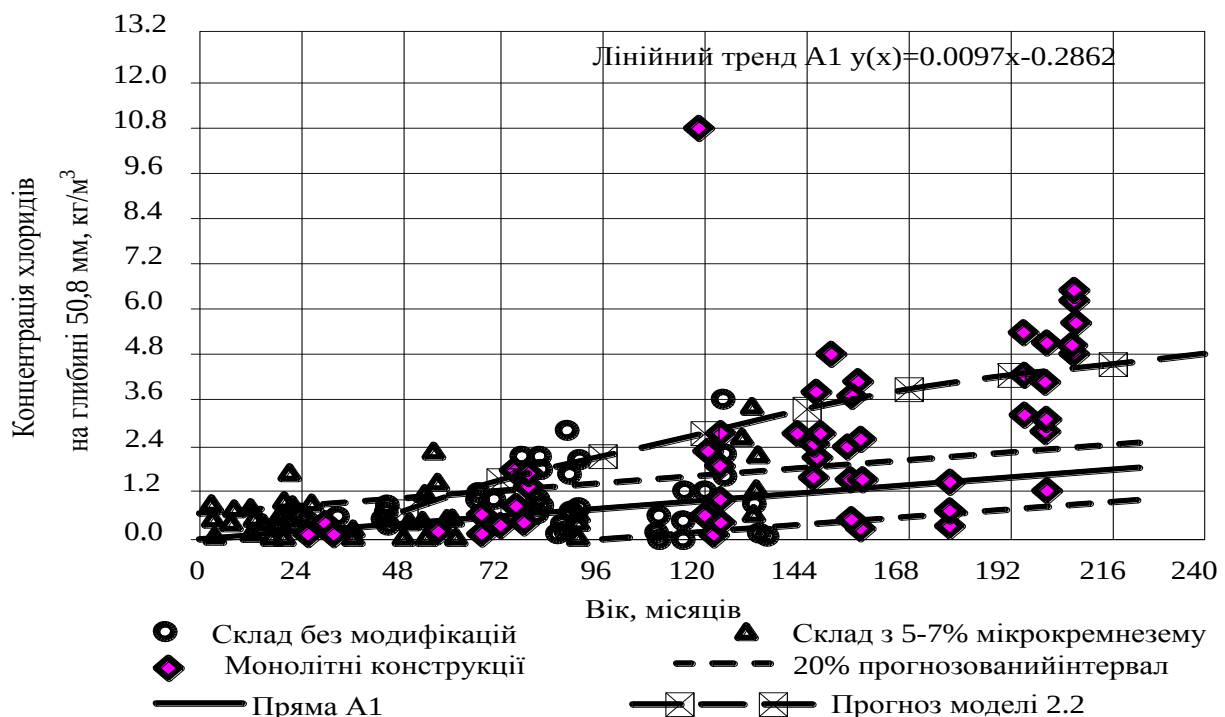


Рисунок 2 – Вміст хлоридів на глибині 50,8 мм в залежності від складу бетону і віку конструкції в ділянках без тріщин

З метою перевірки адекватності моделі результати обчислень порівнювалися з даними інших авторів. Обґрунтовано можливість використання моделі, виконано порівняльний аналіз з даними натурних спостережень. Доведена адекватність моделі.

У **третьому розділі представлено** розроблені моделі оцінки довговічності захисного шару залізобетонного елемента шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) з урахуванням сукупного впливу ймовірнісного характеру стану оточуючого середовища.

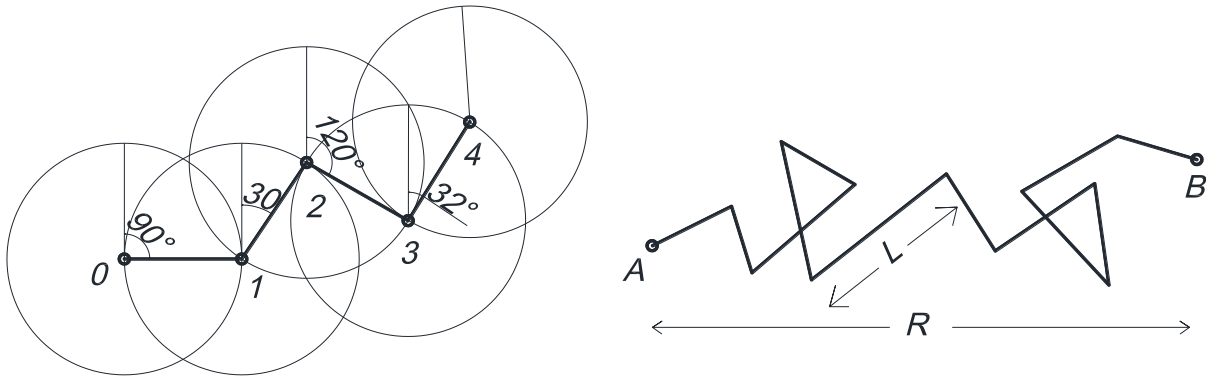


Рисунок 3 – Моделювання дифузії окремої молекули методом Монте-Карло

Молекула або атом у довільному середовищі переміщається по механізму випадкових блукань. Для опису такого процесу використовуються ймовірнісні подання, з яких виходить, що ймовірність здійснення часткою, що дифундує, елементарного акту переміщення на певну відстань визначається рухливістю цієї частки й часом проходження цієї частки від одного зіткнення до іншого в газовій фазі або від однієї потенційної ями до іншої в конденсованій фазі (рис. 3). Якщо при переміщенні частки в середовищі не виникають умови для кращого напрямку, тобто якщо напрямок переміщення частки, що дифундує, в елементарному акті не залежить від напрямку попереднього переміщення, то середній квадрат повного зсуву частки не залежно від вибраного напрямку в ізотропному середовищі складається із суми квадратів зміщень по трьох просторових координатах.

Для порівняння отриманих результатів були використані відомі аналітичні і емпіричні моделі визначення часу насичення бетону дифузантом, проте експерименти показали неможливість використання запропонованої моделі для товщин більше 10 – 15 мм, через значне навантаження на процесор ЕОМ. Ці доводи дали підставу вважати, що подібний підхід може бути ефективним тільки для випадку тонких шарів.

У **четвертому розділі представлено** розроблено модель оцінки довговічності залізобетонного елемента шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) з

урахуванням сукупного впливу ймовірнісного характеру стану оточуючого середовища, корозійних процесів і напружено-деформованого стану.

Детерміністична модель, представлена в розділі 2 побудована на фізичному підході, демонструє суттєві відхилення за певних умов від тренду експериментальних даних, а модель, представлена в розділі 3 побудована на статистичній реалізації фізичного підходу показала неефективність для типових значень товщин захисного шару в 3–5 см, тому, беручи до уваги досвід моделей, що базуються на фундаментальних принципах статистичного аналізу (метод Монте-Карло) DuraCrete, Life-365 розроблено модель оцінки довговічності залізобетонного елемента шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) з урахуванням сукупного впливу ймовірнісного характеру стану оточуючого середовища, корозійних процесів і напружено-деформованого стану, де фізичний підхід деградації захисного шару перейде від молекулярного рівня до рівня дифузійного фронту.

За процедурою метода Монте-Карло чисельне визначення кількості речовини, що проникла на глибину більшу за h , перетворюється у досить простий ймовірнісний вираз усереднений по кількості статистичних експериментів:

$$p_{x \geq h} = \frac{N_{x \geq h}}{N}, \quad (12)$$

де $p_{x \geq h}$ – частка іонів, що продифузували на глибину не меншу за h ; $N_{x \geq h}$ – кількість іонів, що пройшли на задану глибину h ; N – загальна кількість іонів (кількість випробувань).

Значення функції граничного стану за кожний проміжок часу:

$$g_i = R(x_i, \delta_i, \Delta\tau) - S_i, \quad (13)$$

де $R(x_i, \delta_i, \Delta\tau)$ – опір елемента у заданий період часу з урахуванням деградації; S_i – навантаження.

Тоді час до настання граничного стану можна записати:

$$T = \sum \Delta\tau_{g > 0}. \quad (14)$$

Запропонована модель містить в собі цілу низку факторів, які для правильного функціонування моделі необхідно розділити на дві групи: параметри, описані випадковими величинами, величини та параметри, що являють собою стохастичний процес.

Алгоритм моделі:

1. Ввод даних. N_{cicle} – кількість циклів ітерацій; a_s – товщина захисного шару, м; C_0 – початкова концентрація хлоридів на поверхні арматури, % від маси в'язучого; C_{cr} – критична концентрація хлоридів на поверхні арматури, % від маси в'язучого;

C_s – поверхнева концентрація хлоридів на денній поверхні бетону, % від маси в'язучого; RH_c – критична вологість, 75%; RH – вектор-стовпчик середньомісячної вологості повітря, %; RH – вектор-стовпчик середньомісячної температури повітря, K ; W_C – водо-цементне співвідношення; σ – напруження в бетоні на рівні арматури, МПа; $R_{bt,ser}$ – тимчасовий опір бетону розтягу, МПа; A_c – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні; m_t – коефіцієнт, що залежить від часу; C_C – концентрація діоксиду вуглецю на денній поверхні бетону, % від маси в'язучого; m_C – коефіцієнт реакційної здатності бетону; b – ширина стиснутої зони бетону, м; h_p – висота перерізу, м; d – діаметр робочої арматури, м; n – вектор-стовпчик кількості прутків в кожному ряді армування; $\Delta h_{ряд}$ – відстань між рядами армування, м; $V_{cor,C}$ – швидкість корозії в карбонізованому бетоні; $V_{cor,Cl}$ – швидкість корозії в бетоні, насиченому хлоридами, мм/рік; M_{pn} – характеристичний згинальний момент від танделу АК; M_{vn} – характеристичний згинальний момент від смугового навантаження АК; M_{pn} – характеристичний згинальний момент від натовпу на тротуарах; M_{HK} – характеристичний згинальний момент від навантаження НК; M_{gn} – характеристичний згинальний момент від постійного навантаження; R_{bn} – характеристичний тимчасовий опір бетону стисканню; R_{pn} – характеристичний тимчасовий опір арматури розтягу.

1 крок – один місяць експлуатації. Кількість кроків до утворення критичної концентрації хлоридів є часом t_2 у місяцях (модель 2.1.1), а кількість кроків до карбонізації захисного шару – t_1 у місяцях (модель 2.1.1).

2. Розіграш випадкових миттєвих значень кожного фактору за обраними законами розподілу для кожного i -го місяця життєвого циклу. В рамках алгоритму використовуються розподіли: нормальний, лог-нормальний і Гумбеля.

3. Визначення зміщення фронту карбонізації $X_{C,i}$ та хлоридизації $X_{CL,i}$

4. Відповідно до глибини просування фронтів карбонізації і хлоридизації обирається швидкість деградації кожного шару арматури і обчислюється величина корозійного ушкодження арматури.

5. Обчислення M_{ui} – несної здатності і M_i – згинальному моменту від всіх видів навантажень, для i -го місяця. Порівняння M_{ui} і M_i .

Кроки 1 – 4 повторюються, поки $M_{ui} \geq M_i$. Записується кількість кроків i – кількість місяців до вичерпання ресурсу.

Кроки 1 – 5 повторюються N_{cicle} разів. Будуються гістограми результатів, визначається прогнозований ресурс з заданою забезпеченістю.

Перший приклад являє собою сучасний тип збірно-монолітної прогонової будови. Прогонова будова довжиною 24 м у поперечному перерізі мосту розташовано 6 балок висотою 1,15 м і відстанню в осях 2,1 м. Товщина монолітного шару бетону

плити проїзної частини над балками дорівнює 14 см. Габарит 10 м. Поперечний переріз показано на рис. 4.

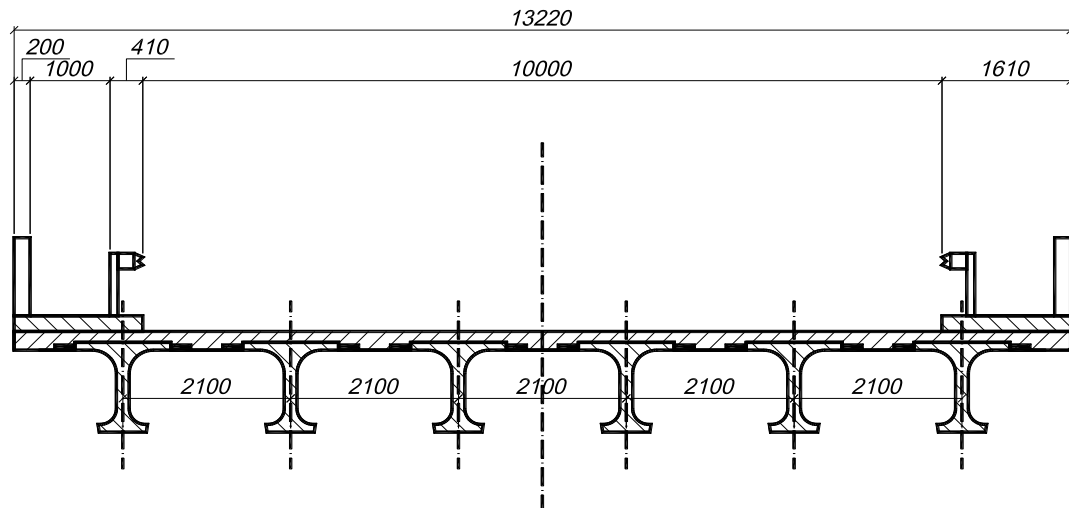


Рисунок 4 – Поперечний переріз мосту

Тротуари виконано у монолітному варіанті, огорожа безпеки – металева бар'єрного типу висотою 75 см, поручнева огорожа – металева безстоякова висотою 110 см.

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В40. Робоча арматура балок – попередньо напружена з дроту діаметром 5 мм зі сталі класу В-П. Балка армована пучками, кожен з яких містить 24 дроти.

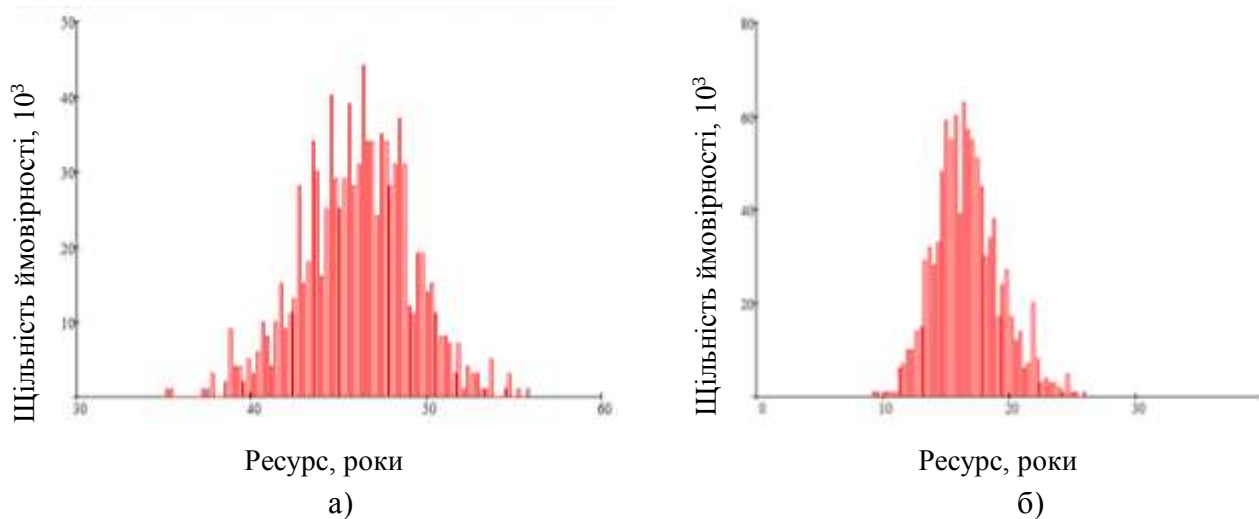
Плита проїзної частини монолітна, висота $h'_f = 26,0$ см; клас бетону плити В40 з $R_b = 20,0$ МПа (205 кгс/см²), $R_{bt} = 1,25$ МПа (13,0 кгс/см²), робоча арматура класу А-III з $R_s = 350$ МПа (3550 кгс/см²). Захисний шар нижньої арматури (робоча арматура $\varnothing 10$ крок 200 мм) 2 см, верхньої (робоча арматура $\varnothing 10$ крок 100 мм) 5 см.

Робоча арматура – 11 арматурних пучків загальною площею 51,81 см² (площа одного пучка $24 d 5 f = 4,71$ см²).

Інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження від натовпу на 1 м² тротуару $p_T = 1,96$ кПа; навантаження АК від автотранспортних засобів на кожну смугу навантаження приймається у вигляді рівномірно розподіленого з інтенсивністю: $\nu = 0,98 \cdot K$ кН/м та тандему з навантаженням на вісь $P = 9,81 \cdot K$ кН, де $K = 15$ – клас навантаження.

Постулюється що карбонізація проходить від зовнішньої поверхні елемента вглиб перерізу, поступово активуючи корозійні процеси в арматурі, розташованій на різній відстані від денної поверхні.

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 5а, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu = 46,025$ років, $\sigma = 3,1$).



- а) Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури;
 б) Прогноз карбонізації захисного шару на поверхні арматури.

Рисунок 5 – Ресурс захисного шару

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 5б ($\mu = 16,29$ років, $\sigma = 2,6$). Модель передбачає оцінку ресурсу не тільки карбонізації захисного шару як такого, але усього бетону, що контактує з арматурою.

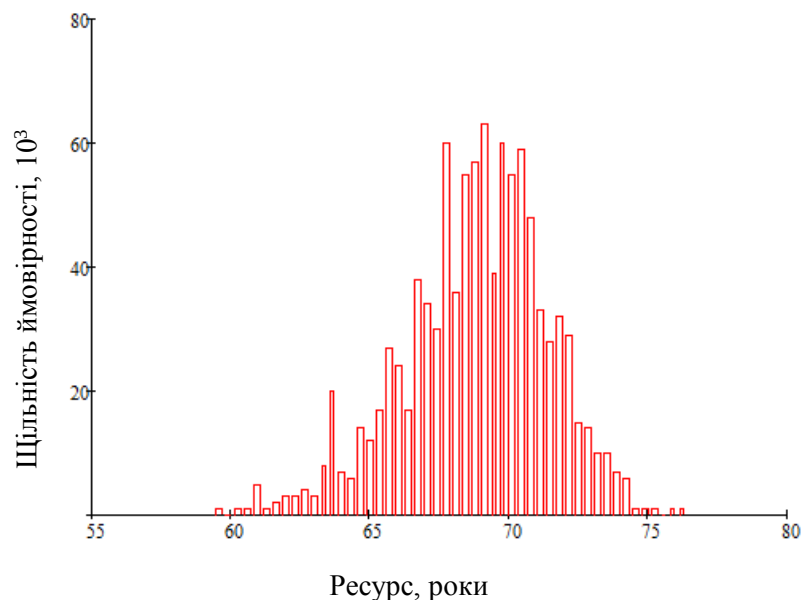


Рисунок 6 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Гістограма, зображена на рис. 6, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu = 68,8$ років, $\sigma = 2,6$).

Стохастичну модель деградації бетону захисного шару і арматури згинаного елемента моста узагальнено і об'єднано для реалізації в єдиний алгоритм, що дало можливість шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) розв'язати

задачу визначення ресурсу з урахуванням впливу стану оточуючого середовища, навантажень, корозійних процесів і напружено-деформованого стану.

Представлений аналіз моделі, оснований на декількох типах залізобетонних елементів прогонових будов автодорожніх мостів різних періодів виробництва, як попередньо напружених так і армованих каркасною арматурою, доводить можливість практичної реалізації моделі в розрахунках.

У **п'ятому розділі** представлено розроблену інженерну методику прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів містить два підходи: напівймовірнісний та ймовірнісний. Обидва підходи самодостатні, проте можливе паралельне використання підходів для аналізу і корегування отриманих результатів. Запропоновано імовірнісне трактування прогнозу ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів. Логічна схема алгоритму представлена на рис. 7.

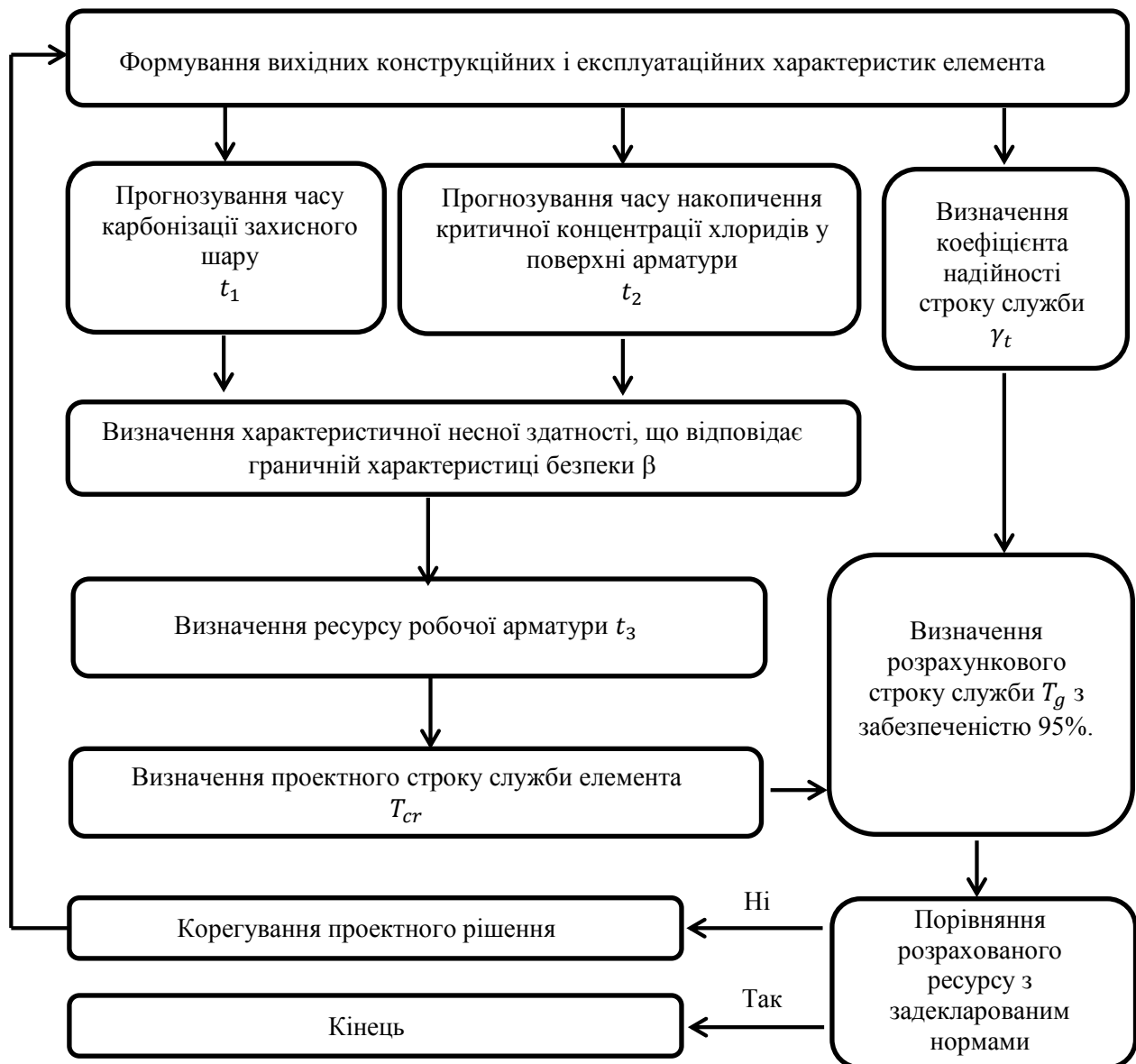


Рисунок 7 – Логічна схема алгоритму обчислення розрахункового строку служби

В термінах часу, ресурс елемента:

$$T_{cr} = t_2 + t_3, \quad (15)$$

де t_2 – період, впродовж якого арматура кородує в умовах карбонізованого бетону; t_3 – період активної хлоридної корозії, характеризується активним зниженням несної здатності в часі.

Запропонована практична інженерна методика прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів в повній мірі відповідає національним нормам ДБН В.1.2-14:2009 та Єврокоду, дає можливість на етапі проектування оцінити ресурс елемента, поєднуючи в собі не тільки характеристики самого перерізу і навантажень, але і умови середовища. Таким чином проектувальник на етапі проектування має апарат, що дозволить обґрунтувати з певним рівнем не тільки надійності, а і довговічності розроблений варіант поперечного перерізу елемента. Такий підхід відкриває шлях для оцінки ефективності використання ресурсів та розбудови життєвого циклу, близького до реальності, дає можливість прогнозувати експлуатаційні витрати, являє собою інструмент для керування довговічністю.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна наукова задача прогнозування довговічності залізобетонних мостів на стадії проектування на основі закономірностей кінетики корозійних процесів в бетоні і арматурі в згинаних елементах. Виконані теоретичні дослідження та числові експерименти дозволяють зробити такі висновки:

1. Цим дослідженням доведено, що модель прогнозування основана на закономірностях кінетики корозійних процесів в бетоні і арматурі з урахуванням параметрів оточуючого середовища може бути найбільш достовірним апаратом прогнозування життєвого циклу на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування.

2. Виконаний аналіз публікацій показав, що всі відомі моделі орієнтовані на оцінку і прогнозування *залишкового ресурсу*, тоді як в сучасних умовах є необхідність оцінювання ресурсу вже в процесі проектування. Водночас аналіз публікацій дає підставу вважати, що найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону, є фізичний підхід.

3. Розроблено детерміністичну модель прогнозування ресурсу залізобетонних елементів транспортних споруд. Доведено, що запропонована детерміністична модель заснована на принципах аналітичної теорії дифузії А.Фіка та сучасних рівняннях деградації арматури є адекватною, реалістично відображає процес втрати початкових проектних характеристик, може бути ефективним апаратом прогнозу ресурсу.

4. Розроблено стохастичну модель деградації залізобетонних елементів мостів, що дала можливість, шляхом статистичних випробувань, розв'язати задачу визначення ресурсу з урахуванням впливу стану оточуючого середовища, навантажень, корозійних процесів і напружено-деформованого стану на всіх етапах життєвого циклу.

5. В дослідженні обґрунтовано і доведено адекватність розроблених моделей шляхом співставлення отриманих результатів з даними історії експлуатації автодорожніх мостів, з результатами інших авторів та числових експериментів. Співставлення виконані в рамках дослідження дають розбіжність часу ресурсу, що не перевищує 12 ...18 %.

6. Розроблено практичний інструментарій управління ресурсом залізобетонних елементів автодорожніх мостів протягом всього життєвого, починаючи з проектування.

7. Виконане дослідження виявило низку проблем на шляху подальшого наукового розвитку задачі прогнозування ресурсу залізобетонних елементів мостів, серед них: відсутність досліджень в Україні з оцінки агресивності оточуючого середовища; необхідність створення бази даних щодо концентрації карбонатів та хлоридів на автомобільних дорогах України; необхідність впровадження сучасних моделей прогнозування ресурсу в практику проектування залізобетонних споруд.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

1. Яцко Ф.В. До проблеми прогнозу ресурсу залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // Збірник наукових праць ДАЗТ. – Харків, 2015. – № 151. – С. 150–158.

Статті у наукових фахових виданнях

2. Яцко Ф.В. Довговічність захисного шару залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – № 34. – С. 154–158.

3. Яцко Ф.В. Прогноз довговічності залізобетонних елементів мостів. Статистичний підхід / Яцко Ф.В. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 664. – С. 371–378.

4. Яцко Ф.В. Ймовірнісна модель прогнозу терміну служби залізобетонних мостів / Яцко Ф.В. // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне, 2011. – № 22. – С. 114–121.

5. Яцко Ф.В. Чутливість моделі деградації залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // Вісник ХНАДУ. – Харків, 2012. – № 58. – С. 124–129.

6. Яцко Ф.В. Застосування методу Монте-Карло для оцінки довговічності залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – № 23. – С. 238–247.

7. Яцко Ф.В. Прочность, надежность и долговечность железобетонных элементов автодорожных мостов / Яцко Ф.В., Медведев К.В., // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – Дніпропетровськ, 2013. – № 4 ISSN 2227-1252. – С. 52–61.

В роботі виведені розв'язувальні співвідношення, сформульовано алгоритм прогнозування ресурсу, проведений аналіз адекватності моделі.

8. Яцко Ф.В. Практична інженерна методика оцінки ресурсу залізобетонних елементів мостів в процесі проектування / Яцко Ф.В. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – № 25. – С. 138–147.

Опубліковані праці апробаційного характеру

9. Яцко Ф.В. Ймовірнісна модель прогнозу терміну служби залізобетонних мостів / Яцко Ф.В. // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2012. – С. 143.

10. Яцко Ф.В. Довговічність збірно-монолітних прогонових будов автодорожніх мостів / Яцко Ф.В. // LXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2013. – С. 161.

11. Яцко Ф.В. Оцінка довговічності залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // LXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2014. – С. 142.

12. IATSKO F. Comparative analysis of carrying capacity and reliability of reinforced concrete beams in accordance with National Regulations and Eurocode 2 / Fedir IATSKO, Albert LANTOUKH-LIASHCHENKO, Kostiantyn MEDVEDIEV // 8-th international conference AMCM 2014. Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures: тези доповідей. – Wroclaw, 2014. – P. 194.

13. Яцко Ф.В. Моделювання і прогноз довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах / Яцко Ф.В. // LXX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та

працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2015.– С. 181.

АНОТАЦІЯ

Яцко Ф.В. Моделювання і прогнозування довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Національний транспортний університет Міністерство освіти і науки України, Київ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена розробці моделей прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах.

У дисертації вирішена актуальна наукова задача прогнозу довговічності залізобетонних мостів на стадії проектування на основі закономірностей кінетики корозійних процесів в бетоні і арматурі в елементах конструкцій транспортних споруд.

Розроблено об'єднану детерміністичну модель деградації бетону захисного шару і арматури згинаного елемента моста з урахуванням впливу стану оточуючого середовища, навантажень, корозійних процесів і напружено-деформованого стану на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування.

Розроблено об'єднану стохастичну модель деградації бетону захисного шару і арматури згинаного елемента моста для реалізації в єдиному алгоритмі, що дало можливість шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) розв'язати задачу оцінки ресурсу з урахуванням змінного в часі впливу стану оточуючого середовища, навантажень, корозійних процесів і напружено-деформованого стану на всіх етапах життєвого циклу, починаючи з проектування.

Встановлена процедура отримання коефіцієнта надійності строку служби, використання якого дозволяє прогнозувати розрахунковий строк служби із заданою забезпеченістю для заданого рівня проектної надійності.

Розроблено альтернативні інженерні методики прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів.

Представлений аналіз моделі, оснований на декількох типах залізобетонних елементів прогонових будов автодорожніх мостів різних періодів виробництва, як попередньо напружених так і армованих каркасною арматурою, доводить можливість практичної реалізації моделі в розрахунках і дозволяє прогнозувати строк служби елементів на всіх етапах життєвого циклу.

Ключові слова: автомобільна дорога, автодорожній міст, деградація, дифузія, довговічність, згинаний залізобетонний елемент, корозія, прогнозування, ресурс, транспортна споруда.

АННОТАЦІЯ

Яцко Ф.В. Моделирование и прогнозирование долговечности железобетонных элементов транспортных сооружений на автомобильных дорогах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Национальный транспортный университет Министерство образования и науки Украины, Киев, 2015.

Диссертация посвящена разработке моделей прогноза жизненного цикла железобетонных элементов транспортных сооружений на автомобильных дорогах.

В диссертации решена актуальная научная задача прогноза долговечности железобетонных мостов на стадии проектирования на основе закономерностей кинетики коррозионных процессов в бетоне и арматуре в элементах конструкций транспортных сооружений.

Разработана объединенная аналитическая модель деградации бетона защитного слоя и арматуры изгибаемого элемента моста с учетом влияния состояния окружающей среды, нагрузок, коррозионных процессов и напряженно-деформированного состояния на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования.

Разработана объединенная стохастическая модель деградации бетона защитного слоя и арматуры изгибаемого элемента моста для реализации в едином алгоритме, что позволило путем статистических испытаний (метод Монте-Карло) решить задачу оценки ресурса с учетом переменного во времени влияния состояния окружающей среды, нагрузок, коррозионных процессов и напряженно-деформированного состояния на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования.

Установлена процедура получения коэффициента надежности срока службы, использование которого позволяет прогнозировать расчетный срок службы с заданной обеспеченностью для заданного уровня проектной надежности.

Разработаны альтернативные инженерные методики прогнозирования ресурса железобетонных изгибаемых элементов мостов.

Представленный анализ модели, основанный на нескольких типах железобетонных элементов пролетных строений автодорожных мостов различных периодов производства, как предварительно напряженных, так и армированных каркасной арматурой, доказывает возможность практической реализации модели в

расчетах и позволяет прогнозировать срок службы элементов на всех этапах жизненного цикла.

Ключевые слова: автомобильная дорога, автодорожный мост, деградация, диффузия, долговечность, изгибаемый железобетонный элемент, коррозия, прогнозирование, ресурс, транспортные сооружения.

ABSTRACT

Yatsko F. Modeling and prediction of durability of reinforced concrete elements of transport structures on the roads. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.17 – building mechanics. – National Transport University, Kyiv, 2015.

Thesis is devoted to the development of prediction models of the life cycle of reinforced concrete elements of transport structures on the roads.

The thesis solved an actual scientific problem forecast durability of reinforced concrete bridges in the design stage based on the kinetics of corrosion processes in concrete and reinforcement in structural elements of transport structures.

Developed a unified analytical model of degradation of the protective layer of concrete and rebar bending element of the bridge with the influence of environmental conditions, loads, corrosion processes and stress-strain state at all stages of the life cycle, from design.

Developed a united stochastic model of degradation of protective layer of concrete and reinforcement of bending element of bridge for the implementation in a single Monte-Carlo algorithm, which allows to solve the problem of estimating the resource taking into account the time-varying influence of the environment, stress-strain state, and corrosion processes at all stages of the life cycle, from design.

Established the procedure for obtaining the safety factor life, the use of which allows to predict the expected lifetime with a given security for a given level of design reliability.

Developed alternative methods to predict resource of reinforced concrete bending elements bridges.

The presented analysis of the model based on several types of concrete elements of road bridges span of different periods of production as prestressed and reinforced, proves the possibility of practical implementation of the model calculations and allows to predict the service life of the elements at all stages of the life cycle.

Keywords: roads, road bridges, degradation, diffusion, durability, bending reinforced concrete element, corrosion, forecasting, resource, transport structures.