

Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет

На правах рукопису

ЯЦКО ФЕДІР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 624.21

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

05.23.17 – будівельна механіка

Дисертація
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Лантух-Лященко Альберт Іванович,
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність всіх екземплярів дисертації
ПІДТВЕРДЖУЮ:
вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.059.02

Каськів В.І.

Київ – 2015

ЗМІСТ

Вступ	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ З ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ	
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	11
1.1 Терміни і визначення понять	11
1.2 Проблема надійності і довговічності мостів	12
1.3 Загальна модель деградації залізобетону.....	15
1.4 Деградація бетону	18
1.4.1 Моделі деградації бетону	21
1.4.2 Огляд моделей насичення захисного шару хлоридами	22
1.4.3 Карбонізація бетону.....	34
1.4.4 Сумісна дія хлоридизації і карбонізації.....	36
1.5 Деградація арматури залізобетонних елементів.....	37
1.5.1 Моделі оцінки довговічності арматури залізобетонних елементів.....	37
1.6 Висновки і формулювання цілі і задач дослідження	41
1.6.1 Висновки до розділу 1	41
1.6.2 Формулювання задачі наукового дослідження	43
РОЗДІЛ 2 ДЕТЕРМІНІСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ	
ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ.....	46
2.1 Детерміністична модель прогнозування довговічності захисного шару елементів мостів	46
2.1.1 Гіпотези	46
2.1.2 Модель.....	49
2.1.3 Аналіз аналітичної моделі деградації захисного шару залізобетонних елементів	54
2.1.4 Перевірка адекватності аналітичної моделі деградації захисного шару залізобетонних елементів	64
2.2 Детерміністична модель прогнозування довговічності арматури згинаних залізобетонних елементів мостів.....	79

2.2.1	Математична модель деградації арматури	80
2.2.2	Перевірка адекватності моделі деградації арматури	82
2.3	Висновки до розділу 2	82
РОЗДІЛ 3 СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ		
ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАХИСНОГО ШАРУ ЗГИНАНИХ		
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ НА		
МОЛЕКУЛЯРНОМУ РІВНІ		
		84
3.1	Теоретична база моделі.....	84
3.1.1	Мета.....	84
3.1.2	Гіпотези	84
3.1.3	Загальний опис моделі.....	85
3.1.4	Прогноз часу карбонізації.	86
3.1.5	Прогноз часу хлоридизації.	87
3.2	Теоретичний базис розв'язку дифузійної задачі	
	методом Монте-Карло	87
3.2.1	Алгоритм моделі карбонізації.....	90
3.2.2	Алгоритм моделі хлоридизації.....	95
3.3	Перевірка адекватності моделі	96
3.4	Висновки до розділу 3	100
РОЗДІЛ 4 СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ		
ДОВГОВІЧНОСТІ ЗГИНАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ		
ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ.....		
		101
4.1	Теоретична база моделі.....	101
4.1.1	Мета.....	101
4.1.2	Модель прогнозування	102
4.2	Параметрична база моделі	104
4.3	Алгоритм моделі	105
4.4	Аналіз моделі.....	106
4.5	Аналіз адекватності моделі	150
4.6	Висновки до розділу 4	154

РОЗДІЛ 5 ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ

РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГИННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ. 156

5.1	Концепція методики.....	156
5.1.1	Теоретичні засади	156
5.1.2	Визначення коефіцієнта надійності детерміністичної моделі	158
5.1.3	Алгоритм прогнозування ресурсу.....	164
5.1.4	Приклад оцінки ресурсу попередньо напруженої залізобетонної балки мосту	171
5.1.5	Приклад оцінки ресурсу залізобетонної плити проїзної частини армованої ненапруженою арматурою	176
5.2	Стохастичний підхід	180
5.2.1	Алгоритм прогнозу ресурсу	180
5.3	Прогноз залишкового ресурсу елементів мостів в експлуатації	182
5.3.1	Приклад оцінки залишкового ресурсу залізобетонної плити проїзної частини армованої ненапруженою арматурою	182
5.4	Висновки до розділу 5.....	185
ВИСНОВКИ.....		187
Список використаних джерел		189
Додаток А	Комп'ютерна програма «Визначення часу карбонізації захисного шару залізобетонного елемента»	208
Додаток Б	Комп'ютерна програма «Прогнозування довговічності згинаних залізобетонних елементів мостів».....	212
Додаток В	Авторські свідоцтва.....	220
Додаток Г	Акти впровадження	236

ВСТУП

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 [7], тоді як нормативний термін служби має складати мінімум 70 – 100 років. По даним обласних експлуатаційних організацій кількість мостів, що знаходяться в 4 або 5 експлуатаційному стані і потребують терміново капітального ремонту або реконструкції, в 1996 році становила 220 одиниць, тоді як за станом на 1.01.2013 кількість таких мостів збільшилася до 1975 одиниць. Сьогодні 90-95% залізобетонних прогонових будов мостів мають дефекти бетону й арматури, які знижують довговічність і несну здатність.

Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруди. Зараз визнається, що зниження середнього строку служби закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди, тому що в проектному рішенні ніяк не відображається в яких умовах і з якою швидкістю протікатиме деградація залізобетону [37].

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, новим моделям прогнозу ресурсу, що відповідають українським реаліям.

Проблема прогнозу 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. Сьогодні, в умовах вкрай обмеженого фінансування системи експлуатації

транспортних споруд, стратегічне планування видатків на утримання споруд має опиратися на реалістичний прогноз ресурсу залізобетонних елементів.

Наукові пошуки останніх років з створення засад оцінювання і прогнозування технічного стану транспортних споруд [18, 19, 24, 51, 59, 60, 71, 73, 79, 80, 84, 93, 102, 103, 115, 116, 161,] склали базу перших в Україні і СНД чинних нормативних документів [7, 14, 26, 37], які сьогодні в системі експлуатації мостів регламентують обов'язкову процедуру інтегральної оцінки прогнозу технічного стану конструктивних елементів і споруди цілком в функції часу і, таким чином, прогнозувати її залишковий ресурс. Проте, згадані нормативні документи ще далекі від досконалості і потребуються значні зусилля з подальшого їх розвитку та вдосконалення.

Що ж стосується прогнозу 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 прогноз 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 напрямами науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ» (КПКВ 2201040) реалізовані 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 прогнозу 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 сформулювати 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, співставленням з достовірними даними натурних спостережень, співставленням з результатами інших авторів.

Практичне значення роботи полягає в розробці інженерної методики оцінки і прогнозу строку служби елементів мостів в експлуатації. Розроблені пропозиції з прогнозу ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на

стадії проектування для включення до пакету нормативних документів «Споруди транспорту».

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, моделі, практичний інструментарій прогнозу 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. Дисертація містить наукові результати, які були отримані особисто дисертантом. З тринадцяти публікацій одинадцять підготовлені автором дисертації одноосібно.

У роботі [131] виведені розв’язувальні співвідношення, сформульовано алгоритм прогнозування ресурсу, проведений аналіз адекватності моделі.

У роботі [160] виведено основні залежності, проведено розрахунки надійності і довговічності.

Апробація результатів дисертації.

Результати роботи були представлені та доповідались на конференціях і семінарах: 64-70 Наукові конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету, тези доповідей, Київ, НТУ – травень, 2008-2014, 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. Сьома науково-технічна конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», Національний університет водного господарства та природокористування, м.Рівне, 27-29 вересня 2011р., науково-практична конференція «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика», 11-12 жовтня 2012 року, 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, науково-технічна конференція «Сучасні методи і технології проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах», Київ. 4-5 квітня 2013 р., Всеукраинская научно-практическая конференция "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 року, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПУБЛІКАЦІЙ З ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1 Терміни і визначення понять

У дослідженні використовуються загальноприйняті терміни, що наведені в чинних нормативних документах пакету «Мости і труби» [37], проте сфера дослідження дисертації в останні роки стрімко розвивається, з'являються нові теоретичні підходи, що в свою чергу потребує формулювання нових термінів. Щоби наше дослідження мало чітку трактовку нижче вводиться декілька порівняно-нових для теорії споруд термінів.

Деградація – втрата початкових механічних, фізико-хімічних і естетичних характеристик. Рівень деградації в функції часу може прогнозуватись відповідними моделями.

Дефект – Відхилення якості, форми, фактичних розмірів елементів та конструкцій від вимог нормативної або проектної документації, яке виникає при проектуванні, виготовленні, транспортуванні, будівництві або в процесі експлуатації.

Довговічність – Здатність споруди зберігати протягом певного часу роботоспроможний стан при встановленій системі технічного обслуговування. Довговічність визначається в роках.

Експлуатаційний стан – Технічний стан, що описується добіркою загальноприйнятих числових і неформальних лінгвістичних характеристик.

Залишковий ресурс – Строк роботи елемента в роках від моменту діагностики і оцінки технічного стану, впродовж якого надійність і експлуатаційна придатність задовольняють нормативним вимогам експлуатації.

Знос споруди – Погіршення початкових проектних показників, таких як несна здатність, вантажопідйомність, невідповідності розрахункових параметрів споруди сучасним вимогам (наприклад, за габаритом тощо).

Надійність – Здатність споруди виконувати задані функції в певних умовах експлуатації, зберігаючи протягом встановленого часу нормативні експлуатаційні показники. Надійність визначається ймовірністю того, що не буде досягнуто граничного стану, що розглядається.

Пошкодження – Дефект, відхилення параметрів і/або характеристик елементів та конструкцій від передбачених проектом, що виникли в результаті природного старіння матеріалів та механічних, фізико-хімічних, теплотехнічних впливів у процесі транспортування, монтажу або експлуатації. Пошкодження не може бути прогнозовано моделлю деградації.

Ресурс – Строк роботи елемента в роках, впродовж якого надійність і експлуатаційна придатність задовольняють нормативні вимоги.

1.2 Проблема надійності і довговічності мостів

Одним з найважливіших елементів транспортної системи держави є мости. З досвіду розвинених країн Європи відомо, що до 50 відсотків витрат на мостову галузь припадає на утримання споруд, тому природньо постає питання про необхідність визначення довговічності мостів.

Проблема довговічності елементів мостів сьогодні є вкрай актуальною для України. В рішенні від 13 жовтня 2009 р. Міжвідомчої комісії з питань науково-технологічної безпеки при Раді національної безпеки і оборони України відмічається критичний стан автодорожніх мостів та транспортних споруд, що підвищує ризик виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характерів та становить, відповідно до статті 7 Закону України «Про основи національної безпеки України», загрозу національній безпеці України в економічній та екологічній сферах. Стосовно технічного стану автодорожніх мостів, що підпорядковані «Укравтодору» в постанові підкреслюється, що 52 % мостів на дорогах загального користування не задовольняють частково чи повністю вимогам чинних норм експлуатації і, тим самим, порушуються вимоги безпечної експлуатації. Значна кількість автодорожніх мостів – біля 25%,

потребують капітального ремонту або реконструкції. Середній строк служби прогонових будов є вкрай низьким. Зауважимо, що 93% автодорожніх мостів в Україні є залізобетонними.

Досвід експлуатації залізобетонних мостових споруд показав, що середній строк служби більшості прогонових будов складає всього 36 років [7]. По даним обласних експлуатаційних організацій кількість мостів, стан яких не відповідає нормальним умовам експлуатації, вимагають капітального ремонту або реконструкції, в 1996 році становила 220, за станом на 1.01.2001 кількість таких мостів збільшилася до 330, а на 1.01.2004 становила вже 428. Сьогодні 90-95% залізобетонних прогонових будов мостів мають дефекти бетону й арматури, які знижують довговічність і несну здатність.

Причини зниження очікуваного ресурсу є на всіх стадіях життєвого циклу споруд. Низький технічний стан та мала довговічність залізобетонних мостів пояснюються, в першу чергу, низькою якістю будівництва та відсутністю належної системи експлуатації. Проте, сьогодні все частіше визнається [59], що зниження середнього строку служби до 45 – 50 років закладається ще на стадії вишукування і проектування споруди, тому що в проектному рішенні ніяк не відображається в яких умовах і з якою швидкістю протікатиме деградація залізобетону. На етапі проектування ми не маємо ніяких важелів контролю і прогнозу довговічності, розрахункові нерівності за першим і другим граничними станами не зв'язані із змінною часу [27, 29]. Нормативні документи з розрахунку залізобетонних елементів мостів не мають апарату керування довговічністю, не містять регламентацій з кількісної оцінки впливу на довговічність елемента фізичних і механічних характеристик матеріалів, кількісної оцінки впливу оточуючого середовища. В результаті з'ясовується що декларований нормами проектування мостів строк служби залізобетонних прогонових будов 80-100 років [30] для України є нереальним.

Сьогодні майже немає теоретичних залежностей, які дають змогу вирахувати довговічність елемента на основі фізичних і механічних

характеристик матеріалу та рівня навантаження. Проте існують визначення довговічності через надійність, як функцію часу.

В найбільш загальній формі сучасне формулювання проблеми наведено в документі Об'єднаного комітету з безпеки споруд (Joint Committee on Structural Safety [176] – 2000 р. та в монографії Р. Мельчерса (Robert E. Melchers) [171] – 1999 р., як ймовірність досягнення граничного стану за час t . Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу:

$$g(\mathbf{X}, t) = R(\mathbf{X}, t) - Q(\mathbf{X}, t), \quad (1.1)$$

де $R(\mathbf{X}, t)$ – узагальнений опір елемента;

$Q(\mathbf{X}, t)$ – узагальнений навантажувальний ефект;

$\mathbf{X}$ – вектор базових змінних;

t – змінна часу.

Сама функція надійності, як ймовірність досягнення граничного стану за час t має вид:

$$P(t) = \text{Prob}[\min g(\mathbf{X}(\tau), \tau) < 0 \text{ для } 0 < \tau < t] \quad (1.2)$$

або в термінах функції граничного стану

$$P(t) = \text{Prob}[R(\mathbf{X}, t) - Q(\mathbf{X}, t) < 0]. \quad (1.3)$$

Таким чином, залежностями (1.2), (1.3) довговічність формулюється як поняття функціонально зв'язане з надійністю. Максимальне значення t що задовольняє залежностями (1.2), (1.3) і є довговічність T .

Цей загальний підхід було викладено, в дещо іншій формі, в монографії В.В.Болотіна 1971 р. [9]. Так для випадку елемента, експлуатація якого закінчується після першої відмови, середня довговічність T визначається інтегралом:

$$T = \int_0^{\infty} t p(t) dt, \quad (1.4)$$

де t – час;

$p(t)$ - частота відмов, щільність часу досягнення граничного стану

$$p(t) = \frac{-dP(t)}{dt}, \quad (1.5)$$

Інтегруванням (1.4) по частинам, з урахуванням (1.2), отримується інтеграл, що дає середнє значення довговічності

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (1.6)$$

де $P(t)$ – випадкова функція надійності.

1.3 Загальна модель деградації залізобетону

Модифіковане графічне представлення процесу деградації залізобетону Tuutti [191], запропоноване в 1982 році, являє собою кусково-лінійну функцію (рис. 1.1), що описує ознаки деградації з плином часу в залежності від стану захисного шару бетону. Загальноприйнятим є поділ процесу деградації залізобетону на дві фази: пасивація (зниження рН) бетону і активна корозія арматури.

Ідеалізована схема деградації, що показана на рис. 1.1, має чотири характерних інтервали часу:

t_0 – час пасивації захисного шару арматури;

t_1 - початок корозії арматури, час руйнування пасивуючого шару арматури і незначного тріщиноутворення;

t_2 – час корозії арматури не захищеної пасивуючим шаром та інтенсивного тріщиноутворення;

t_3 - час інтенсивної корозії, що супроводжується сколюванням захисного шару і сягає свого граничного рівня, припинення експлуатації.

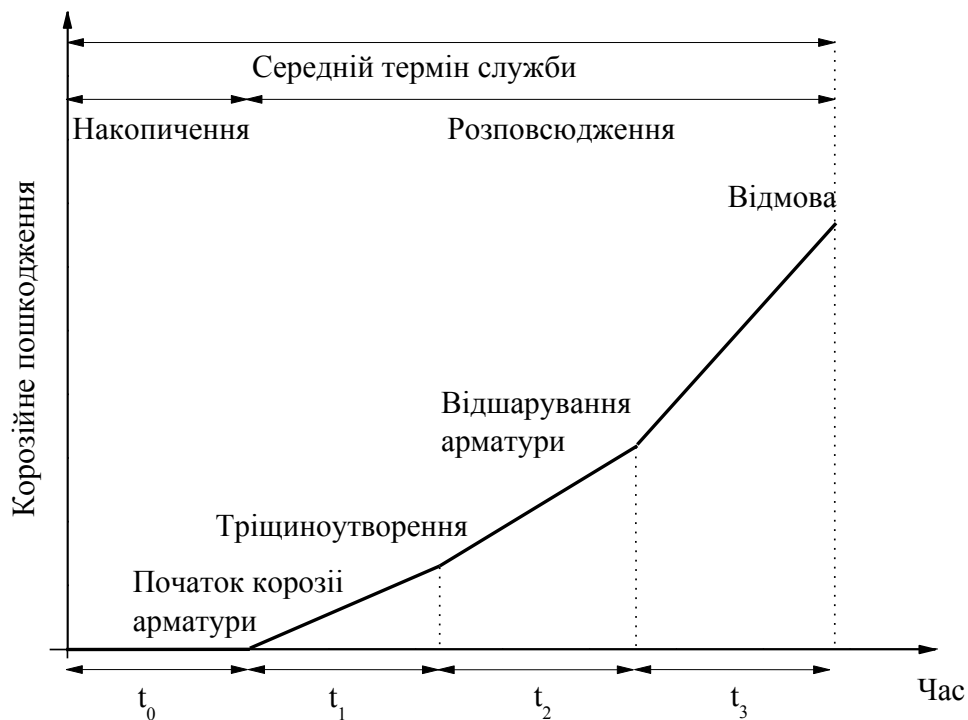


Рисунок 1.1 – Схема деградації

Гіпотеза Tuutti [191], що дозволяє прогнозувати ресурс залізобетонного елемента, полягає в наступному:

Постулюється, що можна прогнозувати ресурс елемента сумою прогнозів кожного із чотирьох етапів:

$$T = t_0^P + t_1^P + t_2^P + t_3^P. \quad (1.7)$$

Інтегрально деградацію залізобетону прийнято розділяти на дві фази: насичення захисного шару карбонатами та хлоридами і активна корозія арматури. Модель, представлена Tuutti [191] часто використовується в науковому світі для представлення процесу деградації.

В моделі Tuutti рівень корозійного ушкодження залізобетону може бути представлений як функція, що залежить часу. Рис. 1.1 – представляє модифіковану модель Tuutti. Тут життєвий цикл залізобетонного елемента під впливом корозії ідеалізовано як двофазний процес: фаза накопичення хлоридів, карбонізація захисного шару (деградація бетону захисного шару елемента) та

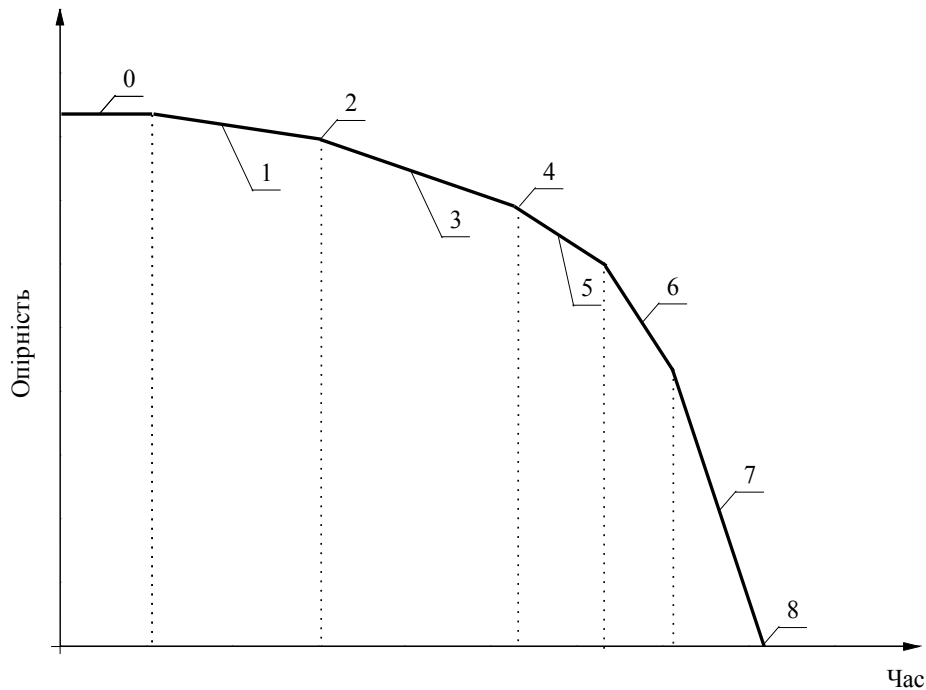
фаза розповсюдження корозійних ушкоджень арматури, в якій через небезпечну концентрацію хлоридів на поверхні арматури, та низький рівень рН після карбонізації і вилуговування проходить необернене корозійне руйнування арматури, що прямим чином зменшує міцнісні характеристики елемента. Процес депасивації приходить впродовж певного періоду часу, позначеного t_p , який продовжується починаючи з моменту будівництва і до початку активної корозії арматури. Фаза розповсюдження корозійних ушкоджень арматури, позначається t_{CORR} , починається з часу закінчення де пасивації бетону t_p , супроводжується тріщиноутворенням, відшаровуванням захисного шару і продовжується до відмови елемента t_{CR} . Моделі оцінки тривалості кожного з доданків розробляються окремо.

Відтак час служби елемента до відмови t_{CR} визначається як сума часу де пасивації захисного шару t_p та часу розповсюдження корозійних ушкоджень арматури t_{CORR} :

$$t_{CR} = t_p + t_{CORR}. \quad (1.8)$$

Модель Овчиннікова І.Г. (рис 1.2), розроблена одночасно з моделлю Tuutti (рис. 1.1) та описана в роботі [76]. В ній стверджується, що процес деградації залізобетонного елемента при його взаємодії з хлоридвмісним середовищем слід розглядати у вигляді суми тривалості всіх етапів.

Також у роботі [76] наведені наслідки пошкодження агресивним хлоридвмісним середовищем залізобетонного елемента: зменшення суцільності, зниження адгезії і розшарування; зменшення площі поперечного перерізу арматури; зміна механічних властивостей (пластичності) арматурної сталі; порушення зчеплення арматури з бетоном; розтріскування бетону захисного шару від зростаючого тиску, спричиненого продуктами корозії арматури, а значить порушення в спільній роботі арматури і бетону, що прямо означає зниження несної здатності і ресурсу залізобетонного елемента.



0 – Захисний шар повністю виконує свою функцію; 1 – Проникання хлоридів у захисний шар; 2 – Перевищення критичної концентрації хлоридів на поверхні арматури; 3 – Розвиток корозійного ураження арматури; 4 – Розтріскування бетону; 5 – Проростання тріщин; 6 – Відшаровування захисного шару; 7 – Порушення зчеплення; 8 – Настання граничного стану.

Рисунок 1.2 – Схема деградації

1.4 Деградація бетону

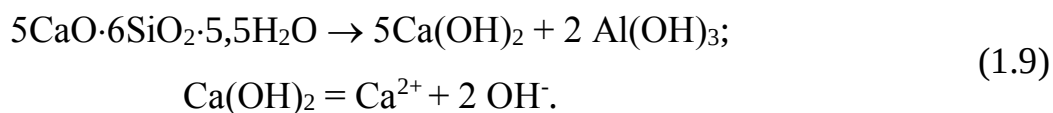
В силу великої кількості чинників, що впливають на швидкість деградації залізобетону, в дослідженні деградація залізобетонного елемента розглядається як два процеси: процес деградації бетону і деградації арматури.

Використовують дві класифікації видів корозії бетону: за назвою агресивного середовища (класифікація В.В. Кінда [46]) і за механізмом агресивного впливу середовища на матеріал (класифікація В.М.Москвіна [72]).

Корозія бетону першого виду

Відповідно до класифікації В.М. Москвіна [72] до першого виду хімічної корозії бетону й залізобетону відносять корозію вилуговування.

Процес вилуговування виникає в цементному камені, бетоні або з/б при дії на них слабо мінералізованих вод. Вплив такого виду корозії зазнають наливні й ємкісні споруди, труби, греблі, мостові конструкції, причальні стінки морських і річкових портів, палі підвалин і т.п.). Вилуговування виникає в цементному камені і бетоні при дії вод з малою тимчасовою жорсткістю, що призводить до фізико-хімічного розчинення продуктів гідратації цементу, а для конструкцій, які працюють під напором таких вод спостерігається винос розчинених складових цементного каменю разом з водою, що фільтрується крізь конструкції. Поки немає фільтрації, усі гідратні сполуки цементного каменю знаходяться в рівновазі із Ca(OH)_2 , розчинність якого досить висока і дорівнює 1,2 г CaO /л. У процесі фільтрації вапно вилугується і починається східчасте розчинення всіх гідратних сполук цементного каменю. Якщо 10 % вапна виноситься, то міцність зменшується на 10 %, якщо - 30 %, то втрачається 30 % міцності бетону і відбувається руйнування:



При вмісті 1,05 ммоль HCO_3^- /л і менше – вода є слабоагресивною стосовно бетону з водонепроникністю W4, при W6 – середовище прийнято вважати не агресивним.

Корозія бетону другого виду

За класифікацією другий вид корозії характеризується впливом на бетон розчинів кислот, лугів і магнезіальних солей.

Найбільш небезпечна і розповсюджена кислотна корозія бетону залізобетонних елементів мостів – це корозія під впливом соляної кислоти HCl .

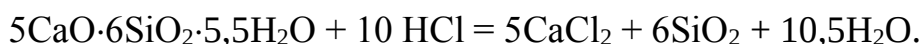
Концентрація хлоридів на поверхні залізобетонних елементів C_s визначається згідно аналізу даних системи експлуатаційних організацій.

Згідно з даними системи експлуатації мостів США. Кількість хлоридів в районах, де для очистки від снігу проїзної частини застосовують матеріали з хлоридами, на поверхні плити мостового полотна може бути у межах: $C_s = 0,5 - 3,5 \text{ кг/м}^3$.

Визначення концентрації хлоридів на поверхні залізобетонних елементів для районів, що прилягають до моря хлоридів надається в функції відстані конструкції від границі морської поверхні:

$$\begin{aligned} C_s &= 2,95 \text{ кг/м}^3, & l < 0,1 \text{ км}, \\ C_s &= [1,15 - 1,81 \cdot \lg(l)] \text{ кг/м}^3, & 0,1 \text{ км} < l < 2,84 \text{ км}, \\ C_s &= 0,03 \text{ кг/м}^3, & l > 2,84 \text{ км}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Під впливом соляної кислоти бетон розчиняється внаслідок утворення легкорозчинних сполук і швидко руйнується:



Згідно зі [109] при $\text{pH} < 4$ жоден зі звичайних видів цементу не витримує впливу кислих рідких середовищ.

Звичайний портландцемент витримує вплив кислих вод із $\text{pH} > 6$, при цьому коефіцієнт фільтрації повинен складати менше 0,1 м/добу.

В залежності від типу в'язучого і типу сталі робочої арматури критичною концентрацією хлоридів на поверхні арматури з [181] варіюється в межах від 0,06 до 0,2 відсотка від маси в'язучого, в той же час в роботі [175] це значення фіксується на рівні 0,2 відсотка від маси в'язучого в усіх випадках.

Поверхнева концентрація іонів Cl^- змінюється у межах 0,4-1,2 відсотка від маси в'язучого і залежить від багатьох умов.

Особливим різновидом хімічної корозії є вуглекислотна корозія або карбонізація.

Серед кислих газів в середовищі в атмосферному повітрі міститься до 0,03% CO_2 . Цей постійно діючий фактор забезпечує протікання карбонізації в бетоні незалежно від присутності в повітрі інших газів, що дозволяє вважати карбонізацію бетону одним із процесів, які визначають швидкість нейтралізації бетону при дії на нього суміші кислих газів. Інші кислі гази, як правило, вже взаємодіють з частково карбонізованим зовнішнім шаром бетону.

Карбонізація підвищує міцність бетону на 40-70 %, на 5 % зменшує пористість та водопоглинення і хоча цей процес супроводжується усадкою до 1,6

мм/м, але тріщини в бетоні не утворюються. Тому для бетону CO_2 прийнято вважати безпечним. Але для з/б вуглекислий газ є агресивним, тому що він реагує з гідроксидом кальцію і продуктами гідратації цементу, в результаті чого величина рН порового електроліту знижується з 12,6 - 13 до 8,5 - 9, а це вже небезпечно для арматурної сталі, пасивність якої забезпечується при $\text{pH} > 11,8$.

Відповідно до досліджень, викладених в роботі [109], показником агресивності цього виду корозії є вміст у воді агресивного вуглекислого газу CO_2 . Вуглекислота дисоціює у воді в два етапи:



Якщо бетон був вже частково карбонізований, корозія в чистому вигляді виявляється в розчиненні карбонатної плівки на поверхні бетону:



При відповідних умовах може бути досягнутий стан рівноваги. Але якщо вода, в якій розчинена вільна кислота, рухається щодо бетону, вкритого карбонатною плівкою, і концентрації Ca^{2+} і HCO_3^- не збільшуються, то карбонатна плівка розчиняється безперешкодно, тобто вугільна кислота є агресивною кислотою як для бетону, так і для металів.

Морозне руйнування бетону

При морозному руйнуванні на бетон впливають не тільки температура і вологість, але і фазові перетворення води й осмотичні сили. Це досліджували С.В. Шестоперов [123], Б.Г. Скрамтаєв [107], Нерепст П. [74] та інші. Установлено, що основну роль у процесах морозного руйнування бетону відіграє характер капілярно-пористої структури матеріалів, що впливає на швидкість тепломасообміну з довкіллям.

1.4.1 Моделі деградації бетону

Класифікація моделей оцінки деградації бетону

- імовірнісні (застосування ймовірнісних процедур для моделювання життєвого циклу елемента) [12] Васильєв А.І., Mejlbro-Poulsen [170];

- фізичні (застосування законів дифузії А.Фіка для опису процесів проникнення речовин в бетон на основі припущення, що структура бетону є однорідною, ізотропною і інертною.) до них відносяться моделі Collepardi [141], L.Tang [189];

- емпіричні (застосування даних натурних спостережень для побудови кривої деградації елемента) Takewaka, K. and Mastumoto, S. [188], HETEC [155];

- комбіновані (застосування ймовірнісних процедур і законів дифузії А.Фіка для опису процесів проникнення речовин в бетон) DuraCrete [147], Life-365 [164].

Для отримання результатів в першому наближенні корозійні ушкодження бетону розраховують за допомогою емпіричних залежностей. У ряді інших одним з альтернативних пропозицій згідно [94] є запис для глибини ушкодження:

$$\delta = \delta_0(1 - e^{-V_0 t}), \quad (1.13)$$

де δ_0 - емпірична характеристика граничної глибини ушкодження;

t - час впливу агресивної речовини, отриманий за допомогою гіпотези про пропорційність швидкості просування корозійних ушкоджень і дефіциту глибини нейтралізації агресивного впливу.

Деградацію бетону описують двома основними рівняннями аналітичної теорії дифузії А.Фіка. Такий підхід є загальноприйнятим, згідно досліджень, проведених DuraCrete [147], а також McGee [169], в яких дослідники демонструють широке застосування і пристосовуваність моделей до різних умов.

1.4.2 Огляд моделей насичення захисного шару хлоридами

Більшість моделей відносяться до дифузійних, що фактично означає, що автори вважають саме дифузію основним механізмом протікання фази депасивації захисного шару, існують моделі, що спираються на хімічні процеси, а деякі моделі взагалі не відображають ні хімічний ні фізичний процеси, але націлені на ілюстрацію кінцевого результату і їх можна віднести до емпіричних.

Вперше для опису проникнення хлоридів в бетон закони А.Фіка були запропоновані Collepardi [141] у 1970р. Дифузія хлоридів в бетон виражена іонним потоком J , додатного знаку, якщо дифузانت рухається в напрямку осі x , зазначимо, що при спаданні концентрації в напрямку осі x потік набуває від'ємного знаку.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1.14)$$

де J – потік, кг/м²с;

D – коефіцієнт дифузії, м²/с;

C – концентрація хлоридів, кг/м³;

x – глибина, м.

Формула 1.14 відома як перший закон дифузії А.Фіка. В ньому відсутня змінна часу, тому його використовують в розробці детерміністичних моделей. Для відображення процесу дифузії в змінних простору і часу був використаний другий закон А.Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1.15)$$

де C – концентрація хлоридів кг/м³;

t – час, с;

D – коефіцієнт дифузії, м²/с;

x - глибина, м.

L.Tang у своїй роботі [189] робить висновок про те, що застосування законів дифузії А.Фіка для опису процесів проникнення речовин в бетон можливе лише на основі припущення, що структура бетону є однорідною, ізотропною і інертною. Основна проблема з використанням другого закону А.Фіка є те, що хлорид-іони взаємодіють з бетоном і що дифузія єдина причина проникнення речовин в його структуру. Крім того, рух негативно заряджених іонів викликає рух позитивно заряджених іонів. Також відомий факт, що нітрати та хлориди рухаються з різними швидкостями, як зазначає L.Tang [189], не враховується при застосування закону А.Фіка.

В подальшому дослідники встановили, що така модель дає нереально високу швидкість деградації захисного шару, особливо у випадках, коли довгостроковий прогноз базується на даних короткотривалих експериментів, як зазначається в труді 2003 року J.Cairns та D.Law [139]. За їх підрахунками фаза накопичення завжди виходила закороткою. Вони дослідили, що причина крилася в коефіцієнті дифузії, який приймався як константа.

Закон Фіка припускає, що іони рухаються незалежно один від одного (частинки дифузанта не заряджені), і що їх взаємодія з матрицею системи дуже слабка або взагалі відсутня. Однак, іони рухаються в сильному електростатичному полі, яке утворюють всі заряджені частинки в матриці. Багато іонів дуже сильно взаємодіє з негативно зарядженими продуктами гідратації. Таким чином, процес проникнення хлорид-іонів в бетон не відповідає адекватно закону А.Фіка, особливо в щільних бетонах з низькою пористістю.

Незважаючи на це другий закон А.Фіка сьогодні все ще є основною теоретичною базою для багатьох моделей, які визначають час деградації захисного шару на основі дифузії хлоридів з поправками, компенсуючими недоліки другого закону А.Фіка.

1972 року M.Collepari [142] запропонував використати другий закон А.Фіка з наперед визначеними початковими умовами і постійним коефіцієнтом дифузії:

$$\begin{aligned}
 D &= const, \\
 C_{(x=0,t>0)} &= C_S, \text{ (Поверхнева концентрація хлоридів незмінна)} \\
 C_{(x>0,t=0)} &= 0, \text{ (Початкова концентрація хлоридів в бетоні} \\
 &\text{дорівнює нулю)} \\
 C_{(x=\infty,t>0)} &= 0. \text{ (На достатньо великій відстані від поверхні} \\
 &\text{концентрація хлоридів дорівнює нулю)}
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Так, застосувавши умови (1.16) M.Collepari отримав наступний аналітичний розв'язок другого закону А.Фіка:

$$C_{(x,t)} = C_S \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{4D_C t}} \right) \right\}, \tag{1.17}$$

де $C_{(x,t)}$ – концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у час t (у роках) на глибині x (м);

C_S – концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону;

D_C – прийнятий постійним коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні.

Змінивши початкові умови (1.16) так, щоби ураховувати початковий вміст хлоридів в бетоні (C_1) M.Colleparidi [142] запропонував уточнити вираз (1.17):

$$C_{(x,t)} = C_1 + (C_S - C_1) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sqrt{4D_C t}} \right) \right\}, \quad (1.18)$$

де $C_{(x,t)}$ – концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у час t (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;

D_C – прийнятий постійним коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні.

Звідси був отриманий вираз для оцінки часу до накопичення небезпечної концентрації хлорид-іонів на заданій глибині:

$$t = \frac{1}{D_C} \left[\frac{x}{2 \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1} \right)} \right]^2, \quad (1.19)$$

де t – 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_C – прийнятий постійним коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні;

$erfc()$ – додаткова функція помилок.

Очевидним слабким місцем в моделях, запропонованих M.Collepari, був коефіцієнт дифузії, що не залежав ані від часу, ані від стану матеріалу. Лише у 1988 К.Takewaka [188] запропонував описати коефіцієнт дифузії як функцію часу. Пізніше вчені M.Maage [166] та P.Mangat [167] у 1994 в ході лабораторних дослідів, а у 1995 P.Sandberg [182] з натурних спостережень зробили висновок, що в подвійних логарифмічних координатах зміна коефіцієнта дифузії, залежно від часу виглядає як пряма лінія, а це означало, що коефіцієнт дифузії можна описати ступеневою функцією:

$$D(t) = D_R \cdot \left(\frac{t_R}{t} \right)^\alpha, \quad (1.20)$$

де, $D(t)$ – коефіцієнт дифузії, що залежить від часу, $\text{м}^2/\text{с}$;

t_R – час, коли був виміряний коефіцієнт дифузії D_R , с ;

t – час в який потрібно отримати $D(t)$, с ;

D_R – значення коефіцієнта дифузії на момент часу t_R , $\text{м}^2/\text{с}$;

α – емпіричний параметр, отриманий за результатами досліджень.

Таким чином було вирішено задачу наближення результатів, отриманих згідно з аналітичним розв'язком другого закону А.Фіка, до реальних.

У таблиці 1.1 наведено значення параметру α для звичайного портландцементу згідно з Duracrete Project [147] в залежності від умов впливу навколишнього середовища на залізобетонний елемент. Того ж 1998 року дослідження EuroLightCon [150] опублікувало свої результати, які збігалися з результатами Duracrete Project.

Інші автори запропонували схожу, але іншу форму визначення ефективного коефіцієнта дифузії хлоридів в залежності від часу і водо-цементного співвідношення:

$$D_{cl,t} = D_{cl,t_0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m = D_{cl,y} \cdot t^{-m} = D_{cl,y} \cdot t^{-m}, \quad (1.21)$$

де $D_{cl,y}$ – коефіцієнт дифузії для випадку часу гідратації 1 рік;

$D_{cl,t}$ - коефіцієнт дифузії на час t ;

m – параметр, що залежить від водо-цементного відношення w/c .

$$m = 3 \cdot \frac{w}{c} - 0,6. \quad (1.22)$$

В цій моделі приймається для портландцементу $m = 0,2 - 0,3$ і для зольного та шлакового цементу $m = 0,6 - 0,7$.

Таблиця 1.1 – Значення параметру α згідно з Duracrete Project [147]

Стан	Нормальний розподіл		Бета ($a=0$; $b=1$)	
Занурений	0.30	0.05	24.9	58.1
Омивається хвилями	0.37	0.07	17.2	29.3
На відкритому повітрі	0.65	0.07	29.5	15.9

Коефіцієнт дифузії на 28 день гідратації, незалежно від типу цементу визначається за залежністю (стандарт ACI (American Concrete Institute):

$$D_{cl,28} = 10^{(-12,06 + 2,4 w/c)} \text{ (в м}^2\text{/сек)}. \quad (1.23)$$

В подальшому деякі дослідники помітили, що припущення щодо постійності поверхневої концентрації хлоридів в структурі бетону не є постійним. Це помітили вчені, що займалися дослідженнями залізобетонних конструкцій, побудованих у морі або на узбережжі. K.Uji [192] на основі спостережень запропонував описати зміну CS як функцію в якій час буде під квадратним коренем, і це було зручно, адже у 1986 році вчений з Оксфорду J.Crank [144] записав другий закон Фіка допускаючи таке припущення. Це рішення використали вчені R.L.Purvis [178] у 1994р та S.L.Amey [134] в 1996 р.

Однак у 1995 р R.N.Swamy [187] представив достатній об'єм досліджень, що доказували можливість використання такого припущення лише в якості часткового випадку, зробивши висновок про те, що краще зобразити зміну C_S у часі як ступеневу функцію або іншу (див рис.1.3).

Дані спостережень, наведені на рис.1.3 ілюструють зміну C_S в часі, але з досліджень K.Uji [192] та P.S.Mangat [167] стає зрозумілим, що C_S залежить ще і від типу цементу.

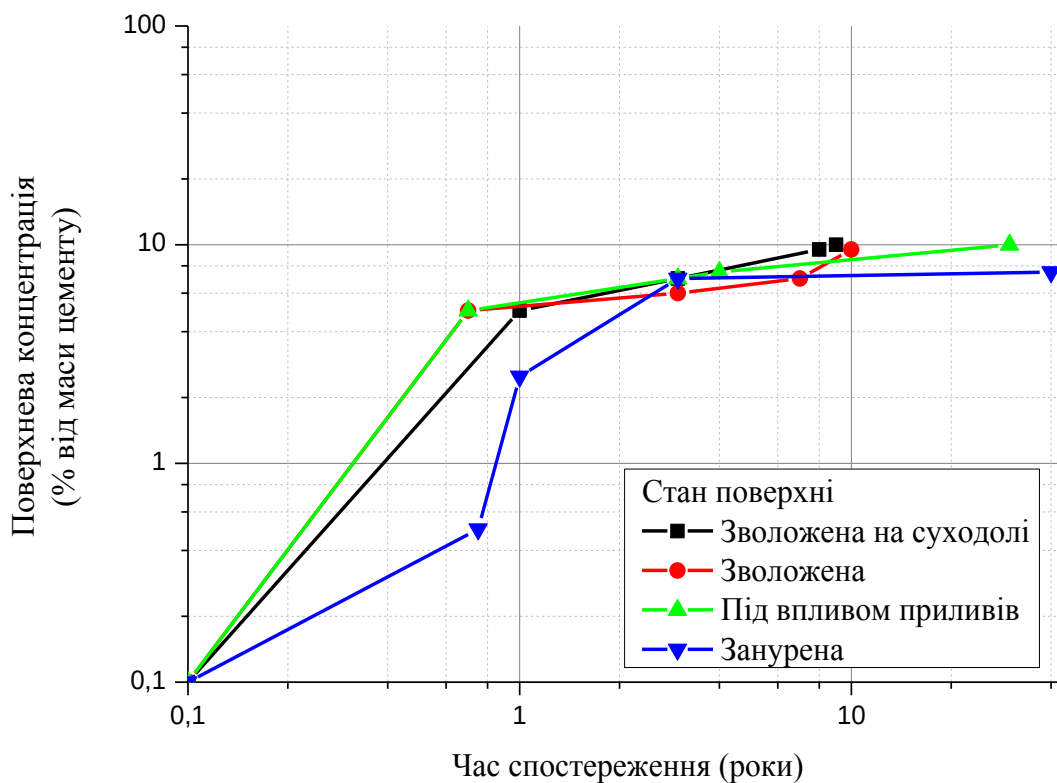


Рисунок 1.3 – Поверхнева концентрація хлоридів залежно від часу спостереження

Тому у 1996 р. L.Mejlbro [170] запропонував описувати C_{SA} поверхневу концентрації хлоридів в структурі бетону у залежності від часу і характеристик бетону так:

$$C_{SA} = C_1 + S \left[(t - t_R) D_A \cdot \left(\frac{t_R}{t} \right)^\alpha \right]^p, \quad (1.24)$$

де C_{SA} – поверхнева концентрація хлоридів в структурі бетону у час t ;

C_S – початкова поверхнева концентрація хлоридів в структурі бетону;

t_R – час, коли був виміряний коефіцієнт дифузії D_R , с;

t – час в який потрібно отримати C_S , с;

D_A – значення коефіцієнта дифузії на момент часу t_R ($D_A = D(t)$ з формули 1.12), $\text{м}^2/\text{с}$;

α – емпіричний параметр, отриманий за результатами досліджень;

p – експонентний параметр.

Ця формула в собі містить і залежність коефіцієнта дифузії від часу і цементу, і залежність поверхневої концентрації хлоридів в структурі бетону від часу, поєднуючи необхідну гнучкість, згідно досліджень R.N.Swamy [187] (рис. 1.4), з характеристиками самого бетону та дала можливість моделювання дифузії згідно другого закону Фіка на комп'ютері.

Модель Mejlbro-Poulsen, заснована на формулі:

$$C(x, t) = C_1 + (C_{SA} - C_1) \Psi_p(z), \quad (1.25)$$

де:

$$z = \frac{x}{2\sqrt{(t - t_R) D_A(t)}}, \quad (1.26)$$

та:

$$\Psi_p(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{p^{(n)} (2z)^{2n}}{(2n)!} - \frac{\Gamma(p+1)}{\Gamma(p+0.5)} \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(p-0.5)^{(n)} (2z)^{2n+1}}{(2n+1)!}, \quad (1.27)$$

де $\Gamma(y)$ – гама функція:

$$\Gamma(y) = \int_0^{+\infty} u^{y-1} \exp(-u) du. \quad (1.28)$$

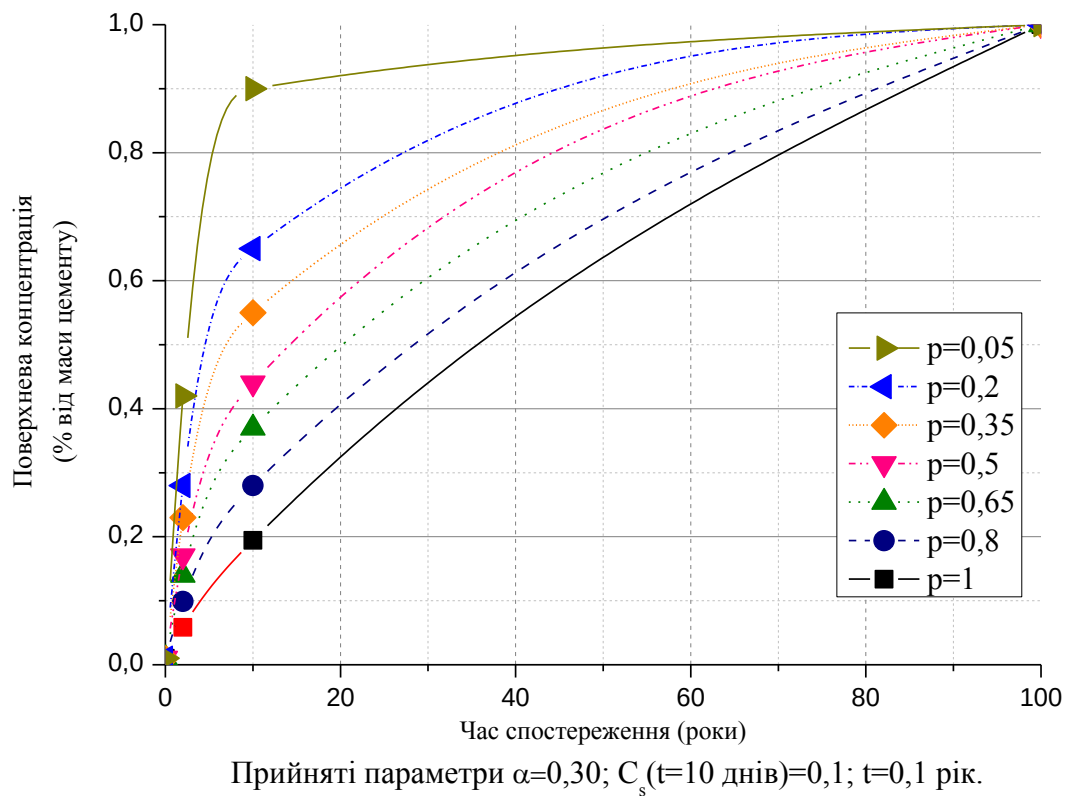


Рисунок 1.4 – Гнучкість формули (1.24 для $0 < p < 1$ та C_S зафіксованого на рівні 1.0 % від маси в'язучого, у час $t = 100$ років

В роботі Takewaka, K. and Mastumoto, S. [188] пропонується така математична модель визначення часу хлоридизації, яка залежить від водоцементного співвідношення:

$$t = \frac{129 \cdot x^{1.22}}{W_{CR} \cdot C_{CL}^{0.42}}, \quad (1.29)$$

де W_{CR} - водо цементне співвідношення;

C_{cl} - концентрація хлоридів;

x - товщина захисного шару.

В роботі [12] Васильєв А.І. пропонує іншу модель проникнення хлоридів:

$$t = \sqrt[a]{x}, \quad (1.30)$$

де a - коефіцієнт, який враховує властивості бетону.

Окрім зазначених вище існують моделі реалізовані як програмні комплекси, до них відносяться: HETEC, DuraCrete, Life-365 та DURACON.

Програмний комплекс HETES [155] заснований на принципі частих регулярних обстежень. Як результат можна отримати криву деградації, засновану на реальних даних, що дуже зручно і повністю збігається з реальним життєвим циклом елемента. Таким чином HETES є програмний комплекс, що не заснований на жодній фізичній чи хімічній теорії і не модулює перебіг деградаційного процесу, а націлений на основі добре відібраних даних сформувати криву деградації. Проблемою цього комплексу є складність отримання необхідних даних: необхідна велика кількість натурних досліджень і неможливість використання HETES для оцінки довговічності на стадії проектування.

Модель DuraCrete [147] заснована на ймовірнісній природі характеристик агресивності середовища, навантажень і характеристик перерізів. В основі її лежить емпірична модель, в якій в якості базису закладений другий закон А.Фіка.

В моделі DuraCrete постулюється що активна корозія арматури починається, коли на поверхні арматури концентрація хлоридів сягає певного критичного значення:

$$c_{CR}^d - c^d(x, t) = c_{CR}^d - c_{S,CL}^d \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x^d}{2 \sqrt{\frac{t}{R_{CL}^d(t)}}} \right) \right], \quad (1.31)$$

де c_{CR}^d – розрахункове критичне значення концентрації хлоридів;

$c_{S,CL}^d$ – розрахункове значення поверхневої концентрації хлоридів;

x^d – проектна товщина захисного шару;

R_{CL}^d – проектний опір проникненню хлоридів;

t – час.

Розрахункове критичне значення концентрації хлоридів знаходиться за наступною формулою:

$$c_{CR}^d = c_{CR}^c \frac{1}{\gamma_{CR}}, \quad (1.32)$$

де c_{CR}^c – параметричне критичне значення концентрації хлоридів;

γ_{CL} – коефіцієнт надійності критичної концентрації хлоридів.

Розрахункове значення поверхневої концентрації хлоридів визначається з цієї залежності:

$$c_{S,CR}^d = A_{S,CL}^c (w/c) \cdot \gamma_{S,CL}^c, \quad (1.33)$$

де $A_{S,CL}^c$ – параметр регресії, що враховує зв'язок між концентрацією хлоридів і В/Ц;

$\gamma_{S,CL}^c$ – коефіцієнт надійності поверхневої концентрації хлоридів.

Розрахункове значення товщини захисного шару:

$$x^d = x^c - \Delta x, \quad (1.34)$$

де x^c – параметричне значення товщини захисного шару;

Δx – відхилення товщини захисного шару.

І, нарешті, залежна від часу характеристика опірності проникненню хлоридів в бетон:

$$R_{CL}^d(t) = \frac{R_{CL,0}^c}{k_{e,cl}^c \cdot k_{c,cl}^c \cdot \left(\frac{t_R}{t}\right)^{n_{cl}} \cdot \gamma_{R,cl}}, \quad (1.35)$$

де $R_{CL,0}^c$ – опір проникненню хлоридів в бетон, визначений за результатами досліджень;

$k_{e,cl}^c$ – фактор середовища;

$k_{c,cl}^c$ – фактор витримки;

n_{cl} – фактор часу; t – час;

t_R – вік бетону на момент проведення дослідження;

$\gamma_{R,cl}$ – коефіцієнт надійності для опору проникненню хлоридів в бетон.

В моделі DuraCrete характеристики впливу середовища на перебіг дифузії хлоридів не входять в якості функцій, а беруться у вигляді емпіричних коефіцієнтів, отриманих з натури. З одного боку це простіше, а з іншого розробники моделі ставлять дуже жорсткі умови до процедури вимірювання, що

призводить до неточностей у разі відхилень, які при натурних спостереженнях неминучі.

Подібний підхід вимагає збору дуже великої кількості ретельно відібраної інформації про середовище, щодо кожного конкретного випадку, яку б можна було переробити в змінні моделі.

Програмний комплекс Life-365 [164], має в основі другий закон А.Фіка. Вплив середовища на перебіг дифузії в моделі Life-365 головним чином виражений через вплив температури на коефіцієнт дифузії, для цього використовується така залежність:

$$D(T) = D_R \cdot \exp \left[\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (1.36)$$

де: $D(T)$ – коефіцієнт дифузії в час t та за температури;

D_R – коефіцієнт дифузії на час $t_R=28$ днів та за нормальної температури $T_R=20^\circ\text{C}$;

U – енергія активації дифузії (35000 Дж/моль);

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Найбільш повною, з огляду на вплив навколишнього середовища на перебіг фази накопичення, є модель, запропонована R.M.Ferreira і реалізована в комплексі DuraCon. Основою модель має другий закон А.Фіка, але не є прямим його вирішенням. Модель дозволяє за рахунок використання ефективного коефіцієнта дифузії описати вплив часу і температури на процес дифузії. Залежність глибини хлоридизації від часу в DuraCon:

$$x_C(t) = 2 \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \left(\frac{C_{CR} - C_0}{C_S - C_0} \right) \right) \cdot \sqrt{D_0 \cdot \frac{T}{T_R} \cdot \exp \left[-\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \right] \cdot \left(\frac{t_R}{t} \right)^\alpha} \cdot t \quad (1.37)$$

де, C_{CR} – критична концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури;

C_0 – початкова концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) всередині бетону;

C_S – концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону;

D_0 – коефіцієнт дифузії, що не залежить від часу, $\text{м}^2/\text{с}$;

U – енергія активації дифузії (35000 Дж/моль);

R – універсальна газова стала;

α – емпіричний параметр, отриманий за результатами досліджень; час $t_R=28$ днів та нормальна температури $T_R=20^\circ\text{C}$;

T – абсолютна температура.

t – час накопичення концентрації хлорид-іонів (у роках) на глибині x (м);

$\text{erf}^1()$ – обернена функція помилок.

1.4.3 Карбонізація бетону

Деградація бетону з часом, перш за все, проявляється в карбонізації, що є результатом взаємодії з вуглецем оточуючого середовища. Карбонізація є одним з найважливіших процесів, які визначають довговічність залізобетонних конструкцій в повітряно-вологодому середовищі. Карбонізація викликає структурні зміни в бетоні, нейтралізацію захисного шару бетону, що призводить до інтенсифікації корозії арматури. В процесі карбонізації відбувається перетворення гідроксиду кальцію цементного каменю в карбонат кальцію. В результаті знижується лужність рідкої фази бетону. Від початкового значення $\text{pH} = 12,5 - 13,1$ лужність знижується до $\text{pH} = 8 - 9$. При цьому бетон втрачає свої пасивуючі захисні властивості арматури. Саме втрата пасивуючої плівки і є початком корозії арматури, початком другого етапу деградації залізобетону.

Вивченням особливостей карбонізації займалось вчені: Москвін В.М. [72], Алексєєв С.Н. [1], Розенталь Н.К. [99], Полак А.Ф. [86], та інші.

Час повної карбонізації захисного шару елементів мостів із ненапруженого залізобетону часто визначається залежністю в багатьох роботах подається так:

$$t = \frac{m \cdot d^2}{4D_e}, \quad (1.38)$$

де d – товщина захисного шару;

D_e – ефективний коефіцієнт дифузії;

m – коефіцієнт умов роботи, має значення $1 - 0,85$, зменшується лінійно з підвищенням температури від 20 до 40°C при відносній вологості повітря 75% .

В документі [100] час повної карбонізації захисного шару рекомендується визначати за формулою:

$$t = \frac{x^2 \cdot m_0}{2 \cdot D \cdot C}, \quad (1.39)$$

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 зовнішній поверхні бетону, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Встановивши граничну глибину карбонізації X_{carb} рівною товщині захисного шару бетону X_c і вирішивши (1.14) відносно змінної t , час карбонізації захисного шару бетону t_{carb} буде:

$$t_{carb} = \frac{aX_c^2}{2D_{CO_2}C_{CO_2}}, \quad (1.41)$$

D_{CO_2} – коефіцієнт дифузії CO_2 в бетоні, $\text{м}^2/\text{с}$;

t – час, с ;

a – кількість CO_2 , необхідна для перетворення всіх здатних карбонізуватися продуктів гідратації, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величина a визначається як [41]:

$$a = 0,75 \cdot C_{CaO} \cdot \Pi \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}}, \quad (1.40)$$

де C_{CaO} – вміст CaO в цементі по масі, %;

C – витрата цементу, кг/м³;

M_{CO_2} , M_{CaO} – молярні маси CO₂ і CaO, кг/моль, відповідно.

А в документі [173] надається інша модель карбонізації, згідно з якою час повної карбонізації на стадії експлуатації можна отримати, використавши залежність:

$$t = \sqrt[n+0.5]{\frac{x}{\left(\frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D \cdot C}{a}\right)^{0.5} \cdot t_0^n}}, \quad (1.42)$$

де x – товщина захисного шару;

k_1 – параметр середнього вмісту води в бетоні;

k_2 – параметр умов експлуатації;

k_3 – коефіцієнт водоцементного відношення;

a – граничне значення вмісту CO₂ в карбонізованому бетоні;

t_0 – час експлуатації;

n – параметр кліматичних умов експлуатації.

1.4.4 Сумісна дія хлоридизації і карбонізації

Проблемі спільної дії карбонізації і хлоридизації на залізобетонні конструкції транспортних споруд присвячено цілу низку наукових робіт [2, 20, 25, 37, 62, 72, 86, 124], в яких автори роблять висновок про те, що в випадках, коли захисний шар не перебуває під впливом карбонізації, і за нормальної вологості, а концентрація хлоридів на поверхні арматури досягне значення 0.4 % від маси цементу, то шар бетону, що захищає арматуру почне руйнуватися від впливу хлоридів, а за умови повної карбонізації захисного шару, для початку руйнування шару пасивації досить буде критичної концентрації хлоридів, рівної 0.2 % від маси цементу. Крім того, в останньому випадку арматура може кородувати з прискореним темпом через кисень, що потрапляє до арматури крізь пори бетону, не зайняті водою.

1.5 Деградація арматури залізобетонних елементів

Корозійна агресивність атмосфери характеризується кліматичними факторами (температурою і відносною вологістю) і забрудненнями у вигляді кислих газів CO_2 , SO_2 , NO , NO_2 , H_2S та інших, а також туманами, вмістом пилоподібних часток у вигляді розпилених у повітрі хімічних сполук (аерозолів). Швидкість корозії багато в чому обумовлена рівнем критичної вологості, що залежить від стану поверхні металу і концентрації забруднень. Залежність відносної швидкості корозії деяких матеріалів від виду атмосферного повітря наведена в табл. 1.2.

Морське чисте повітря (без промислових забруднень) досить агресивне до сталі через постійний вміст у ньому невеликої кількості хлоридів натрію ($\sim 100 \text{ мг/м}^3$) і підвищену вологість повітря у прибережній смузі (шириною до 1 км).

Таблиця 1.2 – Швидкість корозії вуглецевої сталі

Вид металу або сплаву	Швидкість корозії, мм/м^2 рік (залежно від виду атмосферного повітря)			
	Сільське	міське	промислових районів	морське
Вуглецева сталь	6 – 60	30 - 70	30 - 160	20 - 170

1.5.1 Моделі оцінки довговічності арматури залізобетонних елементів

Моделі корозійного зносу арматурної сталі Liddart A. [163], Нікітіна В.І.[75], Овчиннікова І.Г.[76], Расулова І.Р.[92], Цикермана Л.Я. та інш., наведені в [51] принципово досить подібні:

$$\begin{aligned}
\delta &= k[1 - \exp(\alpha t)] \\
\delta &= k \lg(\alpha + t) \\
\delta &= \frac{bt}{1 + R} \\
\frac{d\delta}{dt} &= k\delta. \\
\frac{d\delta}{dt} &= \alpha \exp(-\beta t) \\
\frac{d\delta}{dt} &= k\delta(b - \delta)
\end{aligned} \tag{1.43}$$

В (1.43) прийнято такі позначення: δ – глибина корозійного пошкодження; t – час; b, k, R, α, β – коефіцієнти, числові значення яких встановлюють дослідним шляхом.

Наведені моделі не ураховують впливу напружено-деформованого стану на швидкість протікання корозійних процесів. Але часто цей вплив є значним і його необхідно ураховувати. Деякі математичні моделі, які ураховують вплив напруженого стану на швидкість корозії наведені в [33], [39], [85].

Без втрати спільності основна частина наведених моделей може бути подана у виді:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \psi[\sigma(\delta)], \tag{1.44}$$

де v_0 – швидкість корозії при відсутності напружень,

σ – напруження,

$\psi[\sigma(\delta)]$ – деяка відома функція. Апроксимуючи цю функцію поліномом n -го ступеня за пропозицією Д. Зеленцова [39], отримаємо

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \left[1 + k_1 \sigma + k_2 \sigma^2 + k_3 \sigma^3 + \dots + k_n \sigma^n \right]. \tag{1.45}$$

Утримуючи члени, що містять σ у ступені 2 і вище, дослідники одержують різні моделі. Великий обсяг чисельних експериментів, наведених в роботах [33, 39, 51, 124], дозволяє зробити висновок про те, що квадратична апроксимація функції дає задовільні результати, як, наприклад, в роботі [124] подано такі залежності:

$$\frac{d\delta}{dt} = \nu_0[1 + k\sigma], \quad (1.46)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \nu_0[1 + k_1\sigma + k_2\sigma^2]. \quad (1.47)$$

В проєкті DuraCrete [147] для попереднього визначення глибини корозійного ураження арматури (швидкість корозії V_{cor} та період зволоження W_t визначаються згідно рекомендацій [147] у залежності від класу середовища (табл. 1.2)) залежно від строку служби прийнято підхід, де переважним фактором швидкості деградації арматурної сталі є не напруження, а зволоженість.

Зауважимо, що в моделі DuraCrete швидкість корозії приймається постійною і залежить від характеру впливу середовища тільки через період зволоження і типу реагента.

Модель DuraCrete [147] для попереднього визначення глибини корозійного ураження арматури

$$\delta(t) = \alpha_{cor} V_{cor} W_t t_{cor} = \alpha_{cor} V_{cor} W_t (t - t_1), \quad (1.48)$$

де α_{cor} – коефіцієнт, що враховує тип корозійного ушкодження, приймається рівним 1 за умов рівномірної поверхневої корозії та рівним 5 за умов локальної корозії [147];

V_{cor} – швидкість корозії сталі в нормальних умовах, мм/рік;

W_t – період зволоження, як доля днів у році, що сприяють розвитку корозії;

t_{cor} – час, що пройшов від початку корозії арматури, років;

t_1 – час початку корозії, років.

Таблиця 1.3 – Швидкість корозії V_{cor} і період зволоження W_t в залежності від класу середовища експлуатації [147]

Позначення класу середовища	Характеристика середовища	Характеристика елементів прогонової будови мостів та умов їх експлуатації (приклади)	V_{cor} , мм/рік	W_t
Корозія арматури, викликана карбонізацією				
XC3	Вологе	Елементи, прогонової будови, захищені від дощу (проміжні ребристі та плитні прогонові удови)	0,002	0,5
XC4	Періодично зволожене, сухе	Елементи, прогонової будови, що періодично контактують з водою (крайні ребристі та плитні прогонові будови, плита проїзної частини за умов порушення гідроізоляції)	0,005	0,75
Корозія арматури, викликана хлоридизацією				
XD1	Вологе	Елементи, прогонової будови, захищені від дощу (проміжні ребристі та плитні прогонові удови)	0,030	0,5
XD3	Періодично зволожене, сухе	Елементи, прогонової будови, що періодично контактують з водою (крайні ребристі та плитні прогонові будови, плита проїзної частини за умов порушення гідроізоляції)	0,030	0,75

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури з роботи [25] швидкість деградації арматури:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right), \quad (1.49)$$

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 – температура.

1.6 Висновки і формулювання цілі і задач дослідження

1.6.1 Висновки до розділу 1

1. Виконаний аналіз публікацій дає підстави стверджувати, що проблема прогнозу життєвого циклу залізобетонних елементів будівель і споруд є актуальною для всіх країн світу, вагомою для суспільства в соціально-економічному плані [126]. Велика громада науковців розвинених країн активно шукає важелі ефективного управління життєвим циклом. В останні 15 – 20 років проблема вийшла з академічних кіл і стала нагальною в системі експлуатації споруд. Так виробничники України вже в 2002 р. почали використовувати сучасний науковий інструментарій здатний прогнозувати залишковий ресурс залізобетонних елементів [14]. Подібний апарат успішно застосовується в системах інформаційних технологій з управління спорудами країн Європи, США, Японії.

Проте, слід відмітити, що всі нам відомі практичні моделі орієнтовані на оцінку і прогноз *залишкового ресурсу* елемента. Є лиш декілька публікацій в яких постановка наукової задачі оцінки довговічності виконана більш широко [3, 154, 168, 175, 181, 194]. В цьому дослідженні вперше ставиться наукова задача пошуку моделі зв'язку рівнянь граничних станів зі змінною часу експлуатації, тобто ставиться задача розробки *моделі наскрізної* протягом всього життєвого циклу, починаючи з етапу проектування. В інших термінах, ставиться задача пошуку апарата здатного прогнозувати ресурс елемента не тільки протягом експлуатації а ще і в процесі проектування.

2. Представлені в дослідженні публікації можна класифікувати відомі підходи моделювання процесів деградації залізобетонних елементів, дещо умовно, за п'ятьма групами:

- імовірнісні статистичні, феноменологічні моделі [4, 12, 53, 112, 143, 170, 176, 177, 181,], побудовані на загальних законах теорії ймовірностей і математичної статистики та досвіді експлуатації споруд;

- аналітичні стохастичні моделі [20, 61, 123, 154], побудовані на сучасних досягненнях в теорії споруд, які трактують надійність в функції часу (*time dependent reliability*);

- фізичні детерміністичні моделі [121, 144, 170], побудовані на сучасних уявленнях фізики руйнування бетону та корозії арматури;

- емпіричні, побудовані на базі досвіду експлуатації споруд [155, 188];

- комбіновані стохастичні моделі [155, 164], побудовані на засадах фізики деградації залізобетону в сполученні з ймовірнісними аспектами процесу.

Виконаний аналіз публікацій дає підставу вважати, що найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону, є фізичний підхід. Дійсно, в цьому випадку вихідними даними моделі є фізико-механічні характеристики бетону та арматури, параметри агресивності оточуючого середовища.

Цей підхід в теорії деградації залізобетонних елементів швидко розвивається, але в більшості випадків носить інтуїтивний характер. Аналіз моделей показав значну їх гнучкість і можливість використання в реальних розрахунках, проте жодна з них не дає універсальної практичної методики вирішення задачі прогнозу ресурсу залізобетонних елементів мостів як на етапі проектування, так і на стадії експлуатації.

3. Більшість досліджень з проблеми довговічності базуються на науковій ідеї прогнозуванні часу деградації захисного шару залізобетонних елементів. Науковим підґрунтям такого підходу є закони дифузії Адольфа Фіка [142, 189]. Серед моделей цього типу, включених до нашого огляду, найбільш повною є

модель, запропонована R.M.Ferreira [181], проте вона не містить складової напружено-деформованого стану елемента [133].

4. 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 Liddart A. [163], Нікітіна В.І.[75], Овчиннікова І.Г.[76], Расулова І.Р.[92], Зеленцова Д.Г. [39] у вітчизняній науці є загальноприйнятими, перевіреними і дають реалістичні результати в розрахунках.

5. Серед публікацій, включених до огляду, слід відмітити окремо ймовірнісний підхід оцінки довговічності, що базується на фундаментальних принципах статистичного аналізу (метод Монте-Карло) DuraCrete [147], Life-365 [164].

1.6.2 Формулювання задачі наукового дослідження

Центральна наукова ідея дослідження полягає в пошуку моделі життєвого циклу - аналітичної процедури, що дозволяє визначити час безпечного використання елемента (або споруди в цілому) при заданих навантаженнях в визначених умовах експлуатації. Це функція часу, якою описується процес погіршення технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента протягом строку служби елемента/споруди під дією навантажень та оточуючого середовища. Функцію, що є об'єктом наукового пошуку, тут запишемо в такій загальній формі:

$$T_l = R(t) \cdot L(p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (1.48)$$

де T_l – строк служби елемента, що прогнозується - ресурс;

$R(t)$ - індикатор моделі деградації;

$L(p_1, p_2, \dots, p_n)$ – функція якою описується граничний стан елемента;

$p_1, p_2, \dots, p_n$ $p_1, p_2, \dots, p_n$ – параметри, фізико-механічні характеристики матеріалів елемента, напружено-деформований стан, тип конструкції, характеристики оточуючого середовища, рівень експлуатаційного утримання.

В термінах наведених вище, залежність типу (1.48) відображає *інтегрально* процес деградації залізобетонного елемента в функції часу і є фундаментальною функцією моделі життєвого циклу. Функція $L(p_1, p_2, \dots, p_n)$ в нашому дослідженні приймається на основі фізичного підходу – застосуванням аналітичної теорії дифузії газів та апробованих залежностей, що описують процес корозії арматури (рис. 1.5).

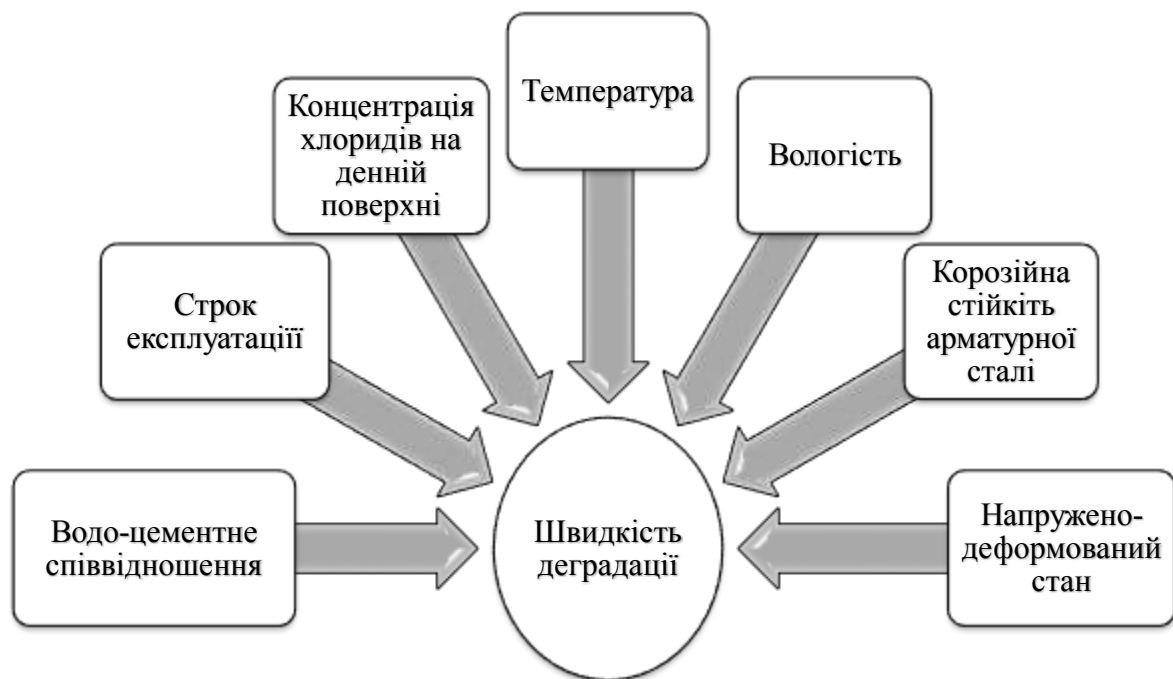


Рисунок 1.5 – Фактори, що впливають на швидкість деградації

Дослідження планується виконати протягом чотирьох років, за планом показаним на структурно-логічній схемі дослідження (рис. 1.6).

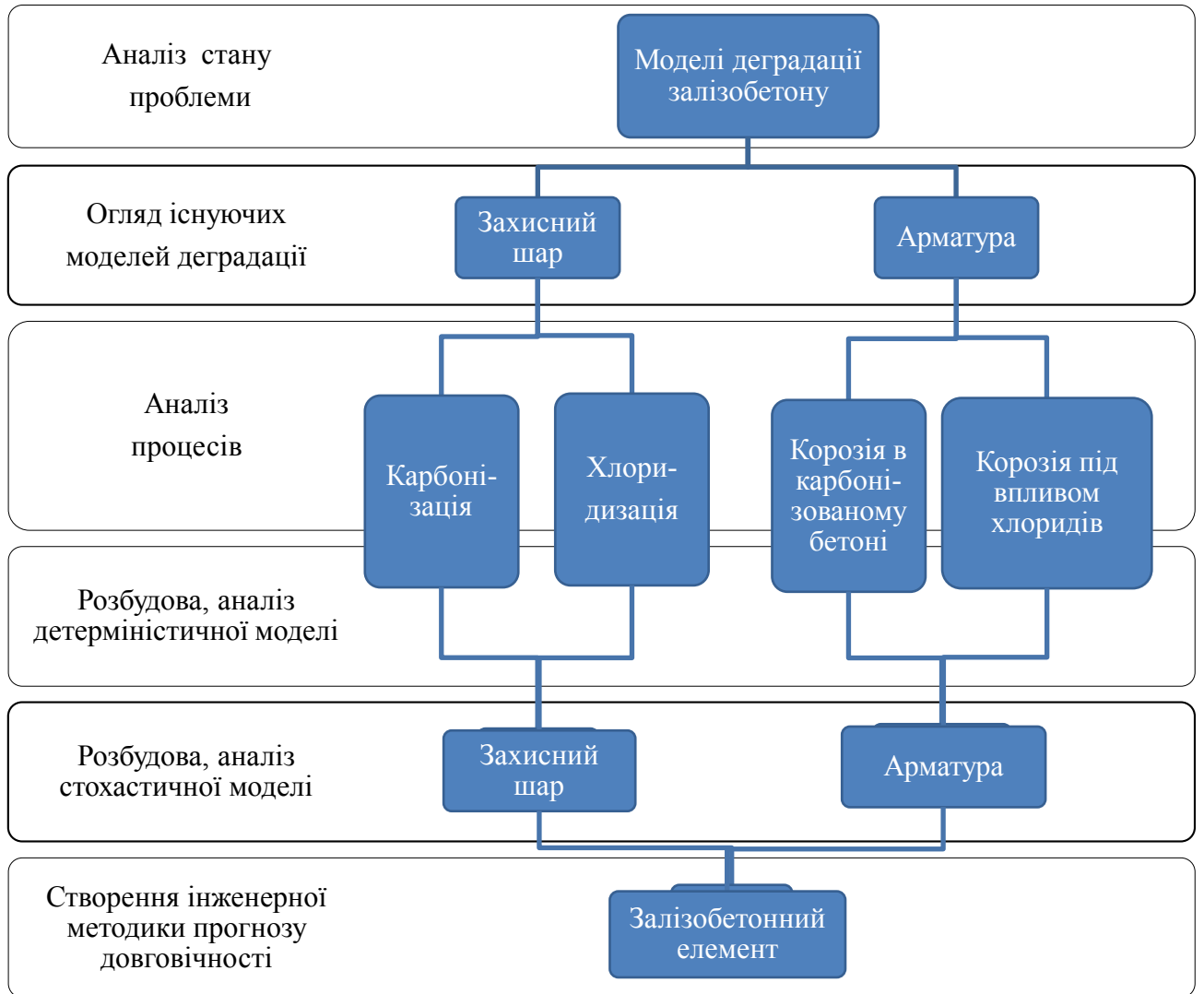


Рисунок 1.6 – Структурно-логічна схема дослідження.

РОЗДІЛ 2

ДЕТЕРМІНІСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

2.1 Детерміністична модель прогнозування довговічності захисного шару елементів мостів

2.1.1 Гіпотези

Введемо поняття «строк служби» до вичерпання ресурсу T - це функція часу, якою описується процес погіршення технічних, фізико-механічних, хімічних і естетичних характеристик елемента протягом строку служби елемента [126]. В загальному випадку така функція має вид:

$$T_{cr} = f_1(t_p, p_i, K_{RB}) + f_2(t_{cor1}, p_j, K_{RA}) + f_3(t_{cor2}, p_j, K_{RA}),$$

$$i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.1)$$

де f_1 – модель деградації захисного шару бетону елемента;

f_2 – модель деградації арматури елемента в умовах карбонізованого бетону;

f_3 – модель деградації арматури елемента в умовах хлоридної корозії;

t_p – час деградації захисного шару бетону елемента;

t_{cor} – час деградації арматури елемента; p_i – параметри, що характеризують початкові фізичні, хімічні, механічні властивості бетону та вплив оточуючого середовища;

p_j – параметри, що характеризують початкові механічні характеристики арматури, рівень напружень в арматурі та вплив оточуючого середовища;

K_{RB} – критерій досягнення критичного стану захисного шару бетону елемента;

K_{RA} – критерій досягнення граничного стану експлуатації за втратами арматури.

Гіпотеза 1: Деградація захисного шару залізобетонного елемента в функції часу приймається як фізико-хімічний процес, що описується диференційними рівняннями аналітичної теорії дифузії А.Фіка (1.14, 1.15).

Моделлю деградації бетону описується процес карбонізації та насичення хлоридами захисного шару елемента. Критерієм процесу є карбонізація та насичення хлоридами захисного шару на повну товщину. Карбонізація і насичення захисного шару хлоридами починаються одночасно одразу після розопалубки та проходять незалежно і паралельно.

Дифузія в бетон виражена іонним потоком J , додатного знаку, якщо дифузانت рухається в напрямку осі x , зазначимо, що при спаданні концентрації в напрямку осі x потік набуває від'ємного знаку.

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (1.14)$$

де J – потік, $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$;

D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

C – концентрація хлоридів, $\text{кг}/\text{м}^3$;

x – глибина, м .

Для відображення процесу дифузії в змінних простору і часу був використаний другий закон А.Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1.15)$$

де C – концентрація хлоридів $\text{кг}/\text{м}^3$;

t – час, с ;

D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

x – глибина, м .

Гіпотеза 2: Деградація арматури залізобетонного елемента в функції часу приймається як процес, що описується диференційним рівнянням (1.49) з урахуванням впливу деградації захисного шару.

Моделлю деградації арматури описується процес корозії арматури, який починається після повної карбонізації захисного шару зі швидкістю корозії v_1 в карбонізованому бетоні. В процесі насичення кількість хлоридів на поверхні робочої арматури досягає критичного рівня (повне насичення хлоридами захисного шару) і швидкість корозії прискорюється до значення $v_2 > v_1$. Критерієм процесу деградації арматури є значення надійності залізобетонного елемента за арматурою при експлуатації.

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури з роботи [25] швидкість деградації арматури:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right) \quad (1.49)$$

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 – температура.

Довговічність виразимо через надійність, як ймовірність досягнення граничного стану за час τ [171,176]. Для цього вводиться функція граничного стану, залежна від часу такого виду:

$$g(X, \tau) = R(X, \tau) - S(X, \tau), \quad (2.2)$$

де $R(x, \tau)$ – узагальнений опір елемента;

$S(x, \tau)$ – узагальнений навантажувальний ефект;

X – вектор базових змінних,

τ – змінна часу.

Зауважимо, що в загальному випадку вектор X є залежним від часу і теорія надійності має моделі в яких $R(x, \tau)$ та $S(x, \tau)$ з (2) є функціями випадкових змінних та часу. На практиці використання таких аналітичних залежностей значно ускладнює розрахунок, проте використавши апарат теорії ймовірностей

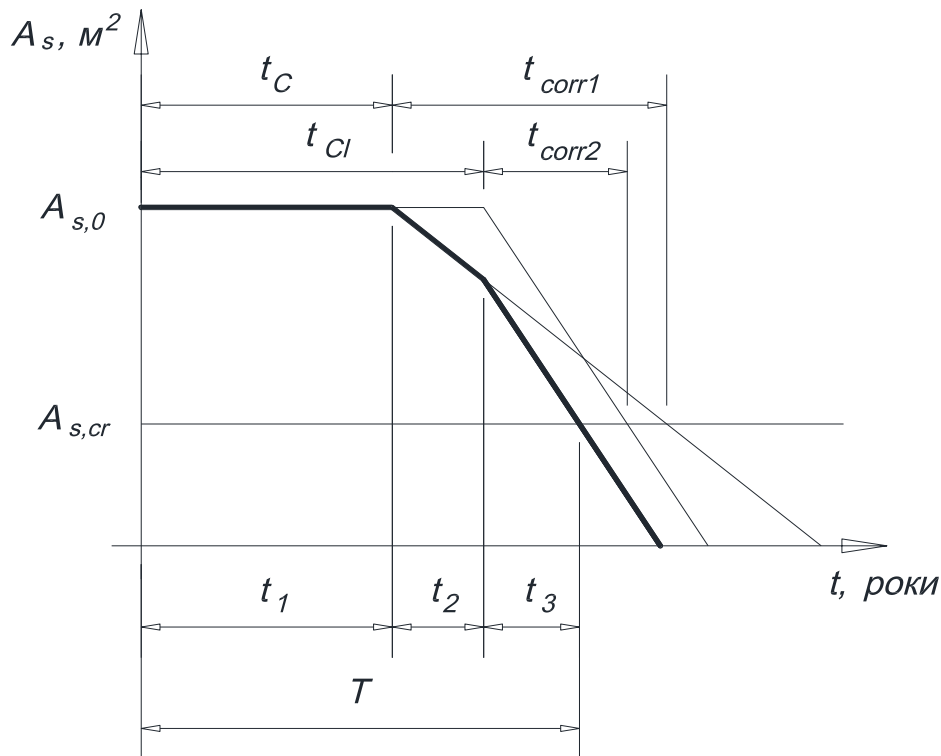
можливо отримати вектор змінних дискретних величин, тобто не самих функцій, а їх значень, які б відповідали певним умовам.

Гіпотеза 3: Процеси деградації бетону і арматури проходять послідовно, не корелюють, перехідні фази відсутні.

2.1.2 Модель

Виконаний аналіз публікацій дає підставу вважати, що найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону, є фізичний підхід. Дійсно, в цьому випадку вихідними даними моделі є фізико-механічні характеристики бетону та арматури, параметри агресивності оточуючого середовища. Поєднавши модель деградації залізобетону Tuutti [191] та Овчиннікова І.Г. [76], а також результати досліджень, розглянутих в розділі 1 модель можна представити в графічній інтерпретації, як показано на рис. 2.1.

На рис. 2.1 зображено модель сукупного впливу карбонізації і хлоридизації на ресурс робочої арматури. Постулюється, що перший період життєвого циклу t_1 являє собою процес карбонізації і проходить в період t_c , у цей самий час у захисному шарі накопичуються хлориди; арматура не кородує. Завершення першого періоду дає початок другому періоду життєвого циклу t_2 що продовжується, до накопичення критичної концентрації хлоридів на поверхні арматури, необхідної для активації хлоридної корозії арматурної сталі. Протягом цього періоду арматурна сталь кородує зі швидкістю характерною для карбонізованого бетону. Початок третього періоду життєвого циклу t_3 характеризується зміною типу корозії арматури, адже через накопичення критичної концентрації хлоридів на поверхні арматури активується процес хлоридної корозії. Закінченням періоду t_3 і життєвого циклу в цілому є момент, коли площа поперечного перерізу робочої арматури сягає граничних умов $A_{s,cr}$.



A_{s0} – проектна площа поперечного перерізу робочої арматури; $A_{s,cr}$ – 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 2.1 – Схема деградації залізобетону

Скористаємось вже відомими розв'язками, заснованими на рівняннях А.Фіка, для визначення тривалості хлоридизації t_{Cl} (модель DuraCon (1.37)) і загальноприйняту модель (1.38) для визначення часу карбонізації t_C .

Моделі (1.19) і (1.39), які в значній мірі емпіричні і не враховують сумісної дії карбонізації і хлоридизації, але за умови окремого розглядання кожного з процесів дають результати достатньої точності [127].

Вираз для отримання часу хлоридизації:

$$t_{CL} = \frac{1}{D_{CL}} \left[\frac{x}{2 \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1} \right)} \right]^2, \quad (2.3)$$

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_C – коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні;

$\operatorname{erfc}()$ – додаткова функція помилок.

Коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні [37]:

$$D_{CL} = 10^{(-12,06 + 2,4B / Ц)} \cdot \left[1 + \frac{(1 + H)^4}{(1 - H_{Cr})^4} \right]^{-1} \cdot e^{q \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K_1} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma}{f} \right) \right]^2, \quad (2.4)$$

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.

В документі [100] час повної карбонізації захисного шару рекомендується визначати за формулою:

$$t_c = \frac{x^2 \cdot m_0}{2 \cdot D_e \cdot C}, \quad (2.5)$$

де x – товщина захисного шару;

m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні;

D_e ефективний коефіцієнт дифузії (табл. 2.1 згідно СНиП 2.03.11-85 [109]);

C – концентрація діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону (від 0,02% до 0,04%).

Реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні згідно документу [37]:

$$m = 3 \cdot \omega / c - 0,6, \quad (2.6)$$

Можна приймати для портландцементу $m = 0,2 - 0,3$ і для зольного та шлакового цементу $m = 0,6 - 0,7$.

Строк служби залізобетонної конструкції при впливі хлоридвмісного агресивного середовища характеризується двома періодами. Протягом першого, інкубаційного, зберігається пасивний стан арматурної сталі. На початку першого періоду сталева арматура захищена від корозії плівкою пасивуючого шару, що складається з оксиду заліза [1, 77]. Електрохімічна пасивація сталі є наслідком лужності бетону (присутності сполук NaOH, KOH, і $\text{Ca}(\text{OH})_2$), водневий показник рН парової води якого за нормальних умов становить більше 12.5.

Протягом інкубаційного періоду поступово відбувається зміна властивостей захисного шару бетону внаслідок карбонізації і дифузії хлоридів до поверхні арматури, що характеризується поступовим зниженням лужності бетону до $\text{pH}=9$ і нижче. При місцевому або загальному руйнуванні пасиваційної плівки, що покриває поверхню арматури, починається активна корозія арматури. Це є початком другого періоду - «розвитку корозійних пошкоджень». Захисна здатність пасиваційної плівки може бути порушена, якщо на поверхні арматури

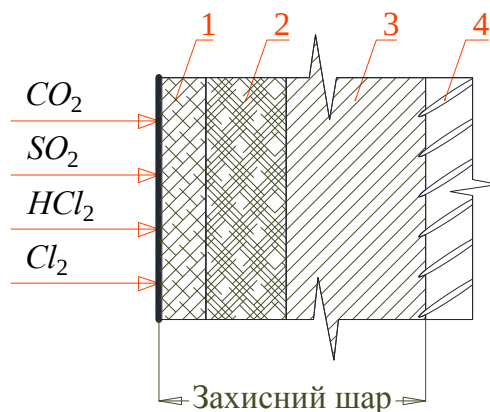
перевищена критична концентрація хлоридів . Цей параметр неоднозначний і може змінюватися від 0,2 % до 0,4 % маси цементу, так як початок процесу корозії арматури залежить від якості бетону, від вологості навколишнього середовища , а також від карбонізації бетону захисного шару та низки інших чинників [77, 154].

Таблиця 2.1 – Показники проникності бетону [109]

Марка бетону за водонепроникністю	Коефіцієнт фільтрації, см/с	Коефіцієнт дифузії для вуглекислого газу, см ² /с	Коефіцієнт дифузії для хлоридів, см ² /с	Водоцементне співвідношення В/Ц, не більше
W4	Більше $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-4}$	-	0,6
W6	Більше $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	-	0,55
W8	Більше $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$	Більше $1 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-8}$	0,45
W10 - W14	Більше $5 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$	Більше $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-8}$	0,35
W16 - W20	Менше $5 \cdot 10^{-11}$	$0,02 \cdot 10^{-4}$	Менше $5 \cdot 10^{-9}$	0,3

Згідно з дослідженнями викладеними у [77], газове середовище проникає по тріщинах, порах і нещільностях в бетон (рис 2.1), потім поглинається водою , яка присутня в капілярах , утворює розчин невисокої концентрації, агресивний по відношенню до цементному каменю. Продукти газової корозії не виносяться назовні, а залишаються на місці реакції, що може призводити до ущільнення бетону. Оцінки швидкостей корозії для газового середовища при віці бетону 50 років отримані Н.К. Розенталем (НДІЗБ Держбуду РФ): - вуглекисле середовище : 5-10 см для бетонів з високою проникністю ($W < 4$) ; 1-2 см для бетонів з $W = 4$ і вище; – сірковмісне середовище: від 0.1 см/рік до 1,0 см/рік залежно від ступеня концентрації газів; – хлоридвмісні середовища: 1-2 см за 10 років. Ці дослідження і їх результати безумовно мають велику вагу, проте розброс даних в деяких випадках в два рази (відношення максимального значення до

мінімального) вказує на те, що проблема ще остаточно не вирішена, тому керуватися цими даними можна для визначення порядку цифр.



1 – зона, насичена SO_2 , HCl_2 , Cl_2 ; 2 – карбонізований бетон, насичений CO_2 ; 3 – нормальний бетон; 4 – арматура.

Рисунок 2.2 – Схема проникнення кислих газів в бетон

Завданням цього розділу є порівняння результатів, отриманих з найбільш поширеної існуючої моделі і даних натурних спостережень.

2.1.3 Аналіз аналітичної моделі деградації захисного шару залізобетонних елементів

Насичення хлоридами. З метою оцінки впливу параметрів моделі насичення хлоридами 2.2 побудуємо графіки залежності ресурсу захисного шару в залежності від зміни кожного з них. Значення параметрів наведено в табл.2.2.

Однозначний і першочерговий вплив водоцементного співвідношення на ресурс захисного шару описаний в праці [190]. А в праці [186] Stephan аналізуючи вплив водоцементного співвідношення на довговічність залізобетону зауважив, що різні показники водоцементного співвідношення характеризуються відповідними значеннями енергії активації дифузії, що характеризується константою активації дифузії (рис 2.3).

Таблиця 2.2 – Значення параметрів моделі хлоридизації

Параметр	Діапазон значень	Значення, обране для прикладу	Номер рисунку, що відображає результат
Товщина захисного шару x , м	0,025-0,05	0,05	2.6
Концентрація хлорид-іонів на денній поверхні всередині бетону C_s , % від маси в'язучого	0,1-0,4	0,3	2.8
Початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону C_i , % від маси в'язучого	0,1-0,5	0,1	2.7
Концентрація хлорид-іонів на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури C_{CR} , % від маси в'язучого	0,2-0,5	0,4	2.9
Відносна вологість повітря H , %	70-80	81	2.10-
Критична вологість повітря H_c , %	-	75	-
Водоцементне співвідношення В/Ц	0,2-0,6	0,4	2.3
Константа активації дифузії (рис 2.2) q	3800-7500	6000	-
Нормальна температура K_0 , К	-	274	-
Температура повітря в районі будівництва K , К	280-298	284,7	2.4
Коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні A	0,0496(розтяг) -0,0236 (стиск)	0,0496	-
Напруження в бетоні σ , МПа	0,6-1,5	1,3	2.5
Граничний опір бетону розтягу f , МПа	-	2,1	-

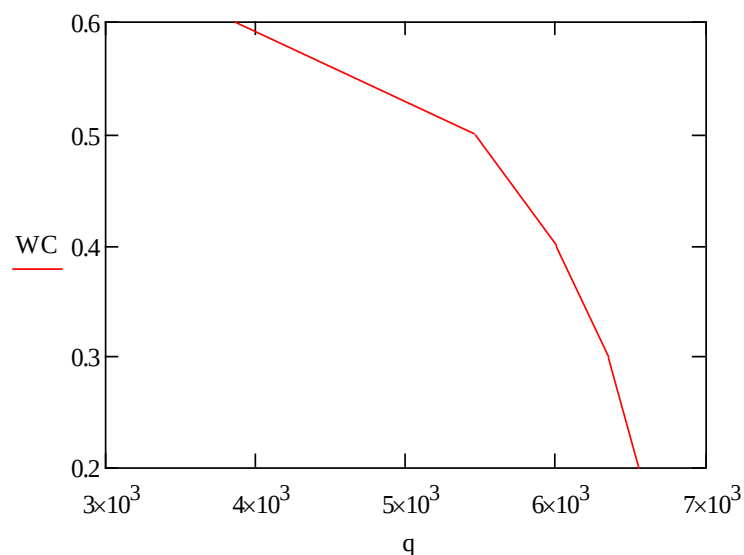


Рисунок 2.3 – Залежність константи активації дифузії і В/Ц

Можна зробити висновок, аналізуючи вплив водоцементного співвідношення на значення енергії активації дифузії (рис. 2.3), про те що ця залежність не лінійна. За умов зміни В/Ц в діапазоні 0,2-0,6 значення константи активації дифузії змінюється в межах від 6500 до 3800 відповідно, що складає різницю в 42%.

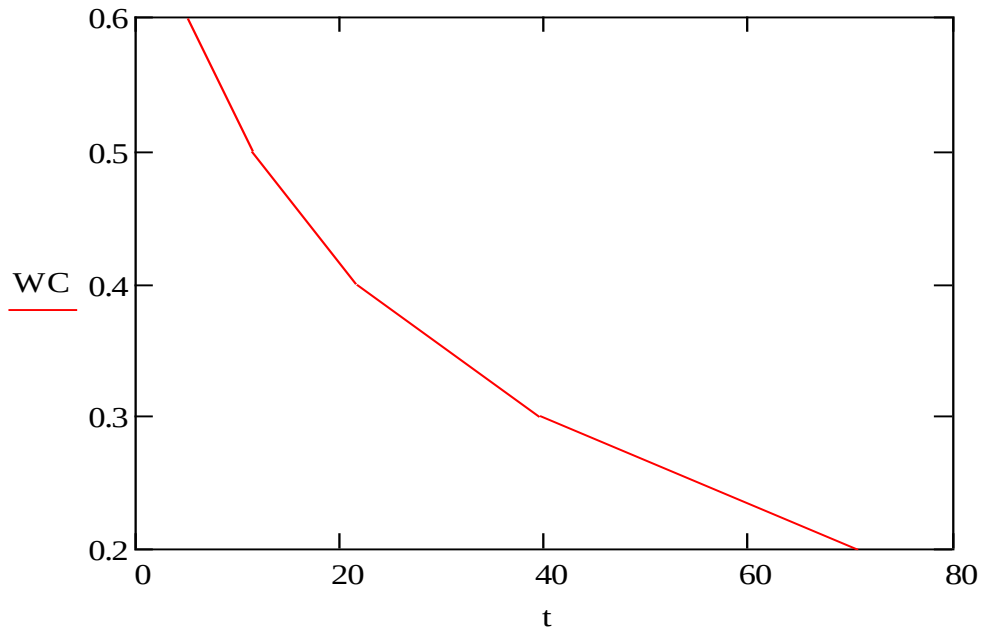


Рисунок 2.4 – Залежність ресурсу захисного шару і В/Ц

Рис. 2.4 ілюструє нелінійність залежності довговічності бетону і водоцементного співвідношення. Відзначимо значний спад ресурсу у проміжку від 0,6 до 0,4 В/Ц. За умов зміни В/Ц в діапазоні 0,2-0,6 значення ресурсу змінюється в межах від 70 до 8 років відповідно, що складає різницю в 88,5%.

Підставивши середню температуру повітря у діапазоні 280-298 К в модель, побудуємо графік залежності ресурсу захисного шару від середньої температури повітря району будівництва (рис. 2.5).

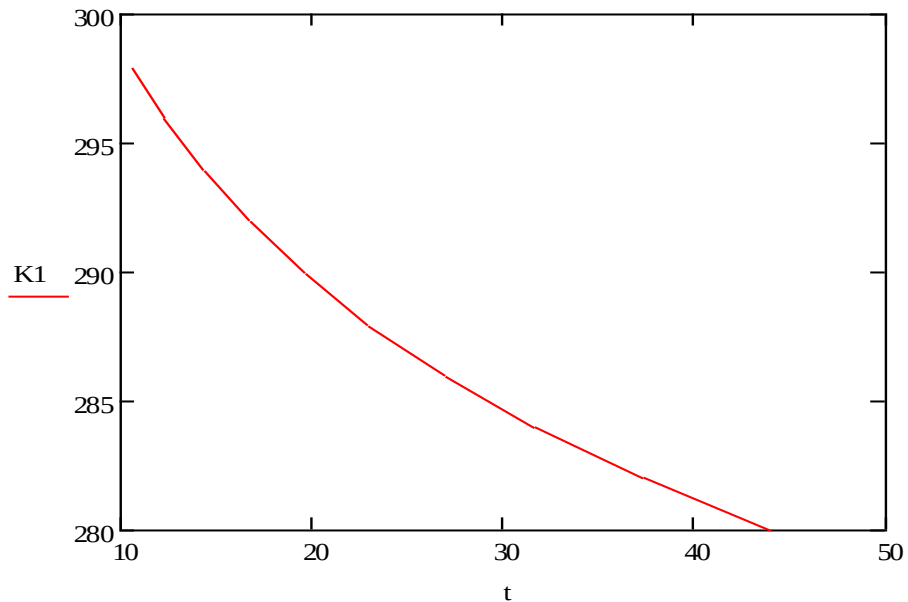


Рисунок 2.5 – Залежність ресурсу захисного шару від середньої температури повітря району будівництва

Очевидно, в діапазоні зазначених у таб.2.2 температур навколишнього середовища, що в Україні вкладається у рамки всіх кліматичних зон. Крива залежності ресурсу захисного шару від середньої температури повітря району будівництва наближена до прямої лінії (рис.2.5) та у діапазоні 280-296K ресурс спадає з 11 до 44 років відповідно, різниця складає 75%.

Ресурс залежить від напружень в бетоні. Графік залежності ресурсу захисного шару від напружень в бетоні для каркасно армованого залізобетону наведено на рис.2.6. Відзначимо лінійну залежність ресурсу захисного шару від напружень в бетоні рис.2.6, при чому в діапазоні σ/f від 0,3 до 0,7 ресурс змінюється обернено пропорційно для каркасно армованого залізобетону та різниця складає 5%. Для попередньо напруженого залізобетону отримаємо зворотній результат (рис.2.7). Так в діапазоні σ/f від 0,1 до 0,7 ресурс змінюється прямо пропорційно для каркасно армованого залізобетону та різниця складає ті ж 5%.

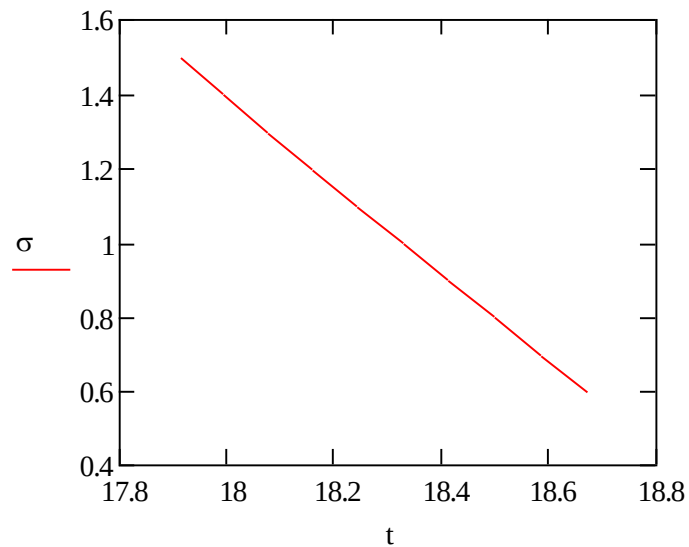


Рисунок 2.6 – Залежність ресурсу захисного шару від напружень в бетоні для каркасно армованого залізобетону

Графік залежності ресурсу захисного шару від напружень в бетоні для попередньо напруженого залізобетону наведено на рис.2.7:

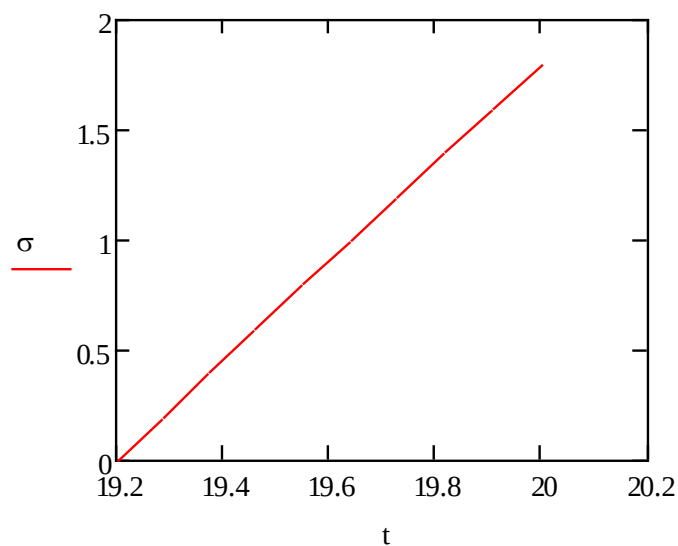


Рисунок 2.7 – Залежність ресурсу захисного шару від напружень в бетоні для попередньо напруженого залізобетону

Одним з найвагоміших факторів, що впливають на довговічність захисного шару вважається саме товщина захисного шару. Графік залежність ресурсу захисного шару від товщини захисного шару наведено на рис 2.8.

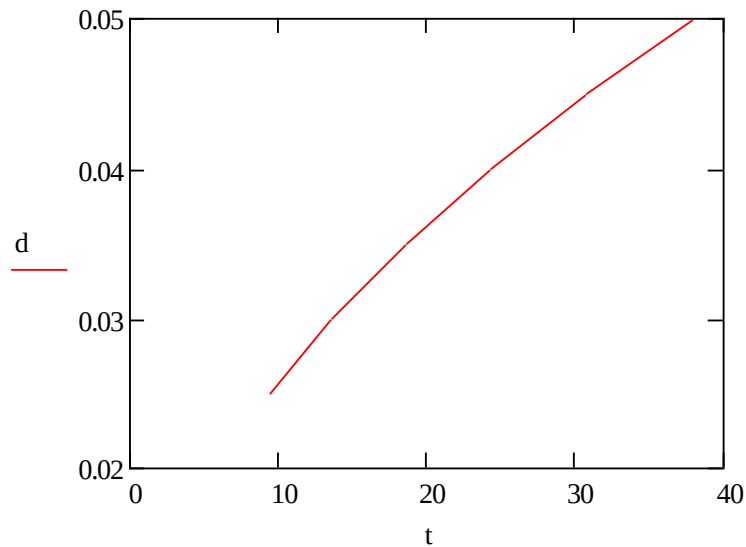


Рисунок 2.8 – Залежність ресурсу захисного шару від товщини захисного шару

Аналізуючи результати обчислень з рис.2.8 можна зробити висновок про майже лінійну залежність ресурсу захисного шару від товщини захисного шару, так у межах товщини захисного шару 0,025-0,05м ресурс змінюється від 10 до 40 років.

Ресурс захисного шару прямо залежить від концентрації хлоридів на денній поверхні. Графік залежності наведено на рис.2.9:

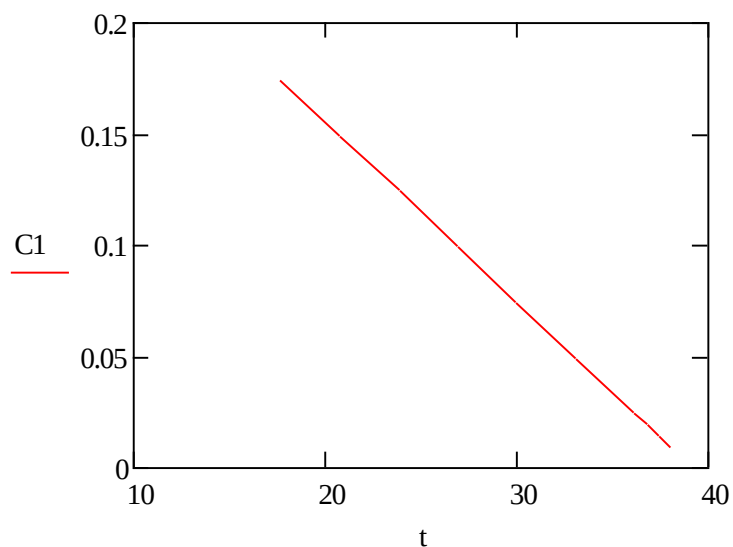


Рисунок 2.9 – Залежність ресурсу захисного шару від концентрації хлоридів на денній поверхні

З рис.2.9 видно, що при зростанні концентрації хлоридів на денній поверхні з 0,01% до 0,17% від маси в'язучого ресурс падає з 38 до 17 років.

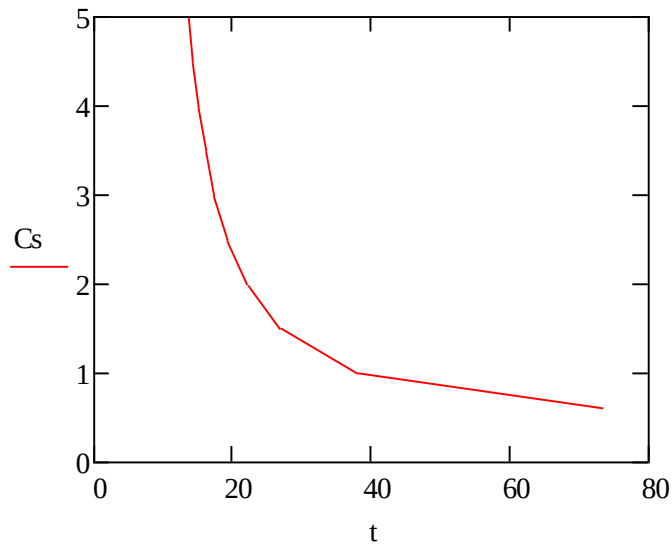


Рисунок 2.10 – Залежність ресурсу захисного шару від концентрації хлоридів на поверхні арматури на етапі будівництва

Результати обчислення залежності ресурсу захисного шару від концентрації хлоридів на поверхні арматури на етапі будівництва показали (рис 2.10) нелінійну параболічну залежність. З рис.2.10 видно що у концентрації хлоридів на поверхні арматури на етапі будівництва 1-5% від маси в'язучого ресурс змінюється від 75 до 15 років, а на ділянках концентрації більше 4,5% та менше 1% графік наближається до асимптот.

Результати обчислення залежності ресурсу захисного шару від критичної концентрації на поверхні арматури на етапі будівництва показали (рис 2.11) лінійну залежність.

З рис.2.11 просліджується лінійна залежність ресурсу захисного шару від критичної концентрації на поверхні арматури, яка викликає корозію арматури. Зазначимо, що в діапазоні критичної концентрації на поверхні арматури від 0,1% до 0,3% ресурс захисного шару змінюється від 8 до 36 років.

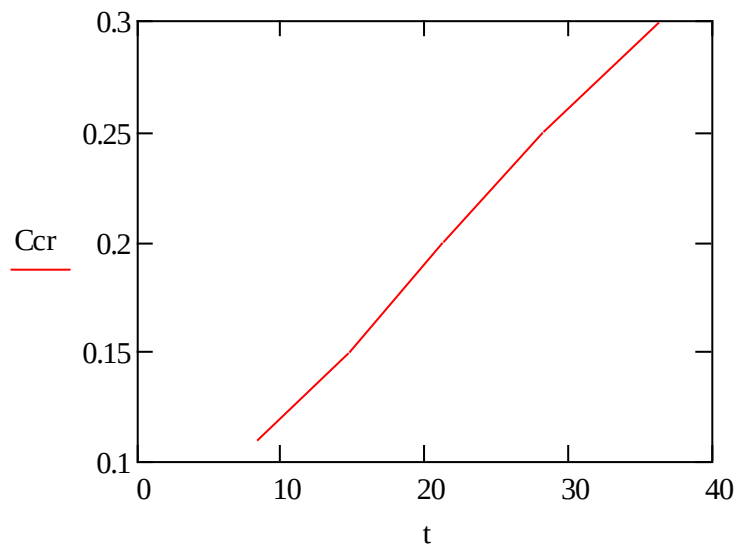


Рисунок 2.11 – Залежність ресурсу захисного шару від критичної концентрації на поверхні арматури, яка викликає корозію арматури

Графік залежності ресурсу захисного шару від відносної вологості повітря показано на рис 2.12:

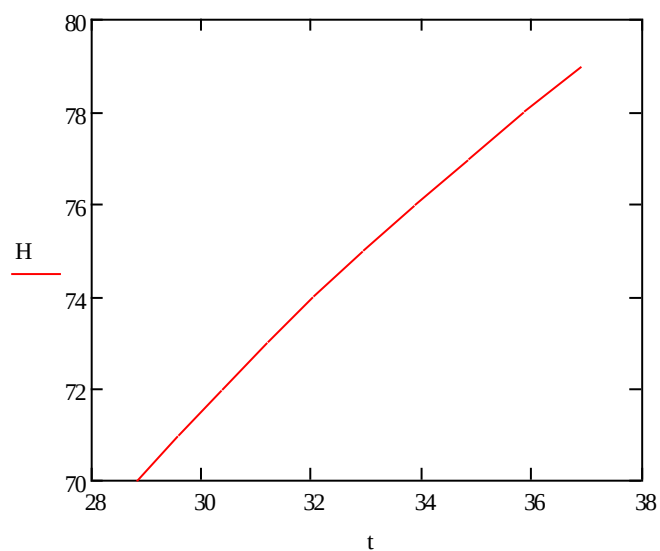


Рисунок 2.12 – Залежність ресурсу захисного шару від відносної вологості повітря

З даних, зображених на рис.2.12 видно, що крива залежності ресурсу захисного шару від відносної вологості повітря, наближена до прямої. В діапазоні відносної вологості від 70% до 80% ресурс захисного шару змінюється від 29 до 37 років.

Карбонізація. З метою оцінки впливу параметрів моделі карбонізації 2.4 побудуємо графіки залежності ресурсу захисного шару в залежності від зміни кожного з них. Значення параметрів наведено в табл.2.3

Таблиця 2.3 – Значення параметрів моделі карбонізації

Параметр	Діапазон значень	Значення, обране для прикладу	Номер рисунку, що відображає результат
Товщина захисного шару x , м	0,025-0,050	0,050	2.13
m_0 - реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні	0,35-0,70	0,53	2.14
D_e ефективний коефіцієнт дифузії (таб.2.1 згідно СНиП 2.03.11-85 [109]) $\times 10^{-4} \text{см}^2/\text{с}$	0,02-2,00	1,00	2.15
C – концентрація діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону (від 0,01% до 0,04%)	0,01-0,04	0,02	2.16

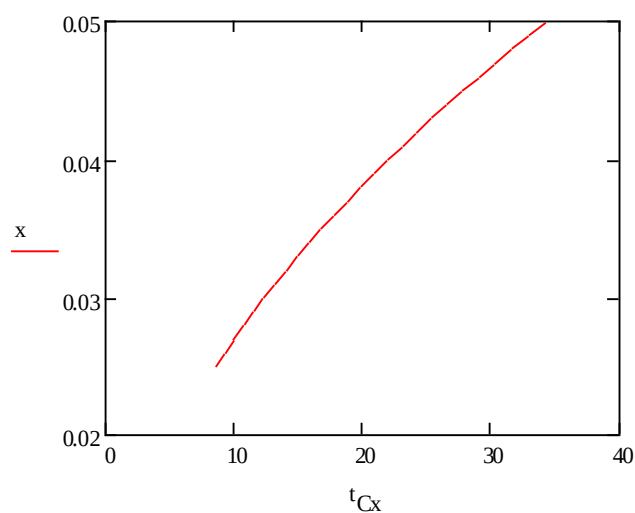


Рисунок 2.13 – Залежність ресурсу захисного шару від товщини захисного шару

Результати обчислень, наведені на рис. 2.13 демонструє, що типовій товщини захисного шару у 3см згідно моделі відповідає ресурс у 11 р, тоді як для товщини захисного шару у 5 см прогнозується ресурс у 35 років.

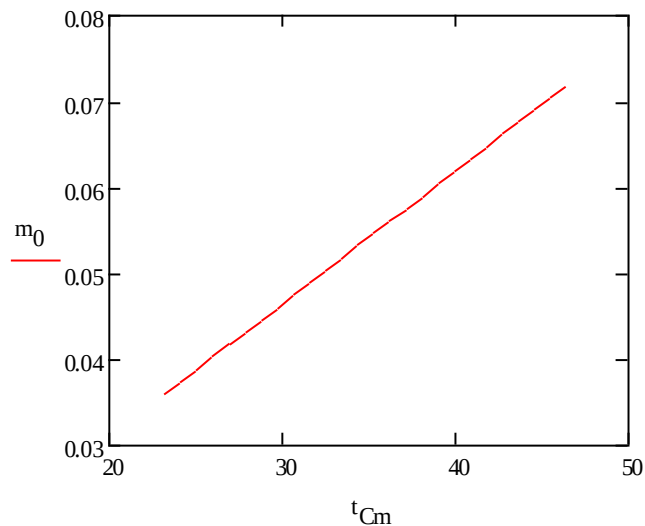


Рисунок 2.14 – Залежність ресурсу захисного шару від реакційної здатності бетону

Відзначимо лінійне збільшення прогнозованого ресурсу захисного шару від 22 до 47 років рис.2.14 за умов збільшення коефіцієнта реакційної здатності бетону від 0,35 до 0,7.

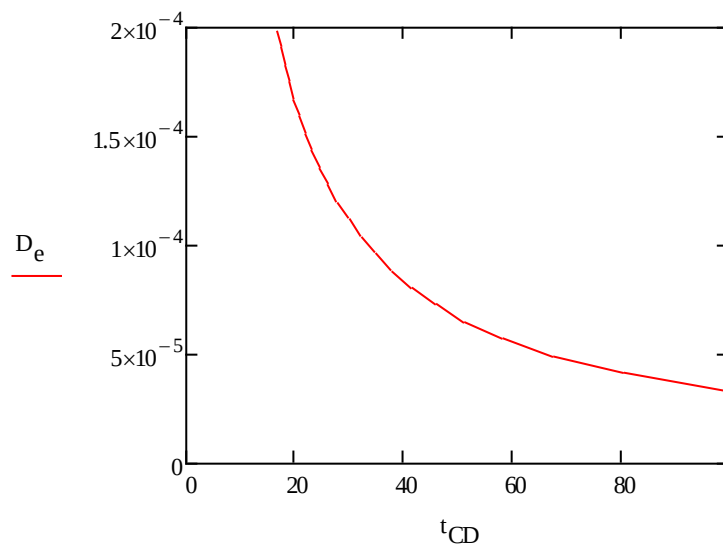


Рисунок 2.15 – Залежність ресурсу захисного шару від коефіцієнту дифузії

Крива, зображена на рис. 2.15 демонструє, що для бетону з В/Ц, що дорівнює 0,5 та відповідає класу водонепроникності W-7 ресурс захисного шару складає 25 років.

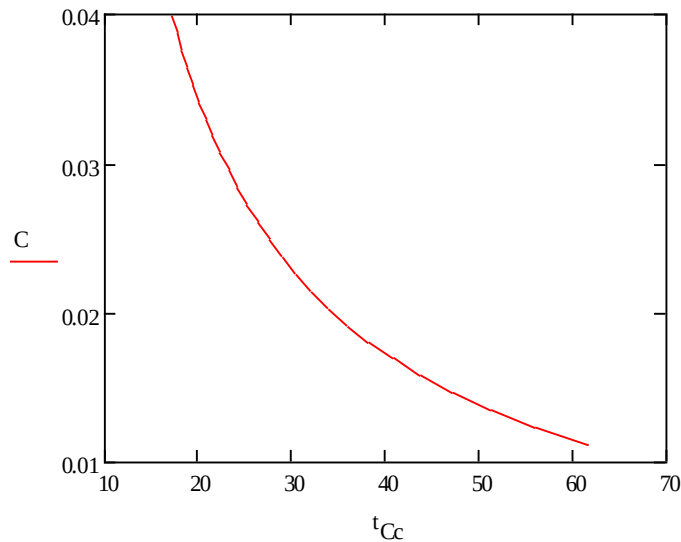


Рисунок 2.16 – Залежність ресурсу захисного шару від концентрації діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону

Відзначимо значний приріст ресурсу захисного при зменшенні концентрації діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону нижче 0,02%.

2.1.4 Перевірка адекватності аналітичної моделі деградації захисного шару залізобетонних елементів

В штаті Канзас США діапазон нормальної витрати солі від 28 до 85 кг/км на смугу руху. Згідно статистики Департаменту транспорту Канзаса (KDOT) District 1, яка охоплює 17 округів в північно-східному Канзасі використання кам'яної солі становить 85 кг/смуга руху·км. Крім того, KDOT застосовує сіль в сумішах для попередньої обробки проти ожеледиці, що складається на 23% з NaCl.

За умов середньодобової температури повітря від -9 до 0 ° C. Сіль в сумішах для попередньої обробки застосовується у кількості від 94 до 118 л/смугу руху·км. Загальна осьова довжина доріг, оброблених в районі 1 є 2889 км , а загальна довжина всіх смуг руху є 7313 км, дані наведено в таблиці 2.4. При середній ширині смуги 3,7 м , середня витрата солі для нанесення протягом семирічного періоду була 1.24 кг/м². Це значення нижче того, що використовується для мостових покриттів.

Таблиця 2.4 – Обсяги використання кам'яної солі для обробки доріг в штаті Канзас, США

Рік	Кількість кам'яної солі	
	кг·1000	кг/м ²
1998	34,443	1.29
1999	30,956	1.16
2000	28,519	1.07
2001	43,906	1.65
2002	29,544	1.10
2003	23,903	0.89
2004	39,639	1.48
Середнє	32,987	1.24

Згідно статистики Департаменту транспорту Канзаса рис. 2.17-20 ілюструють дослідження ділянок залізобетонних елементів мостів без тріщин на вміст хлоридів (на глибинах 25,4; 50,2; 63,5; 76,2 мм відповідно) в залежності від складу бетону і віку конструкції.

З метою перевірки адекватності аналітичної моделі деградації захисного шару залізобетонних елементів на графіки, побудовані за результатами натурних спостережень, виконаних групою. Авторів Will D.Lindquist, David Darwin, JoAnn Browning, Gerald G.Miller [193], нанесено криві, побудовані за результатами обчислень прогнозу ресурсу відповідно до прийнятої моделі. Основні змінні моделі 2.2 прийнято такими: C_s – концентрація хлорид-іонів на денній поверхні всередині бетону 13 кг/м³; C_1 – початкова концентрація хлорид-іонів 0,1 кг/м³; В/Ц – водо-цементне співвідношення 0,4; H – вологість повітря для штату Канзас 54,4%; H_c – критична вологість повітря (75%); q – константа активації дифузії 6300; K_0 – нормальна температура 281,4 К; K – середньорічна температура 293,1 К; A – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні +0,0496; σ – напруження в бетоні 1,5 МПа; f – граничний опір бетону 2,1 МПа.

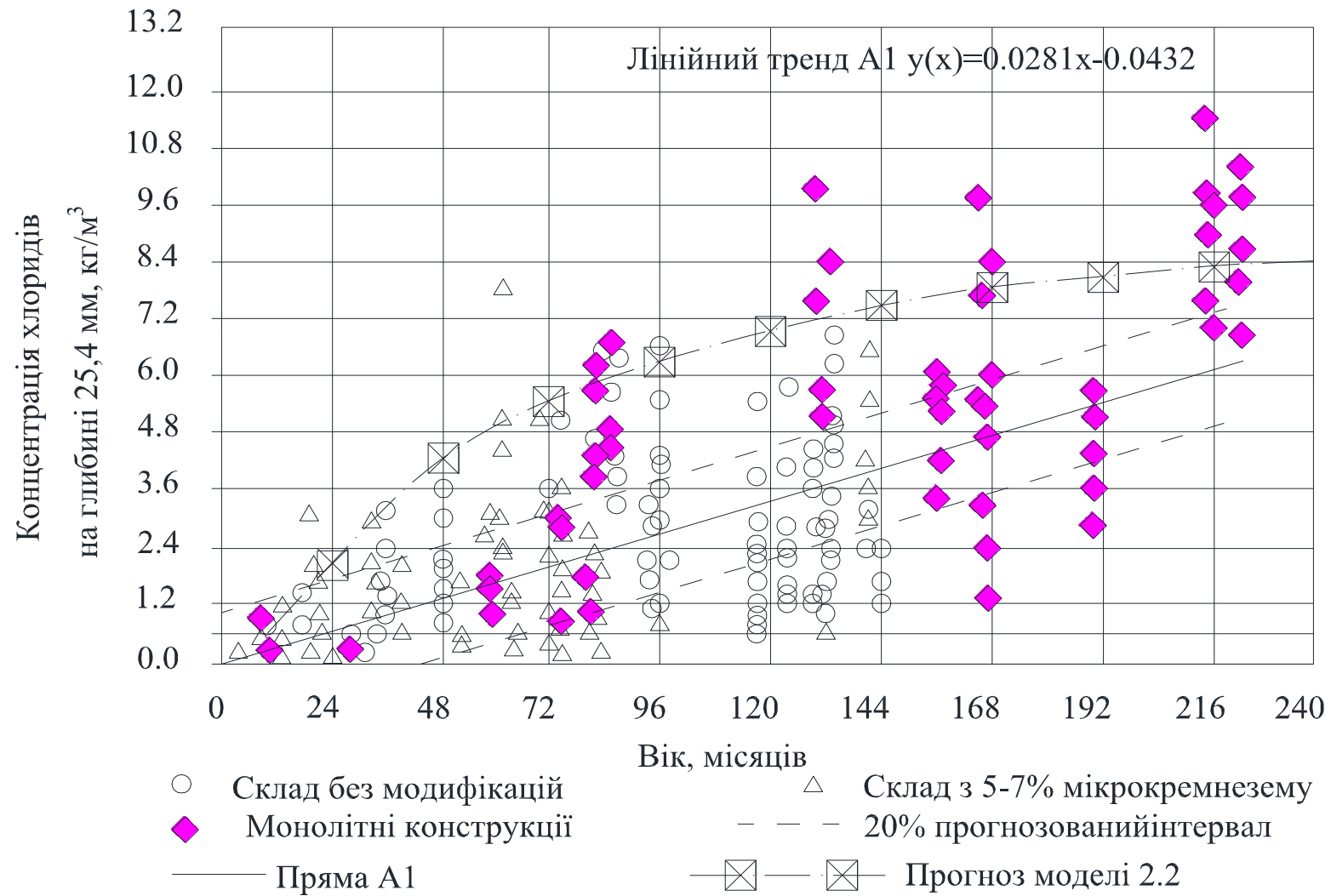


Рисунок 2.17 – Вміст хлоридів на глибині 25,4 мм в залежності від складу бетону і віку конструкції в ділянках без тріщин

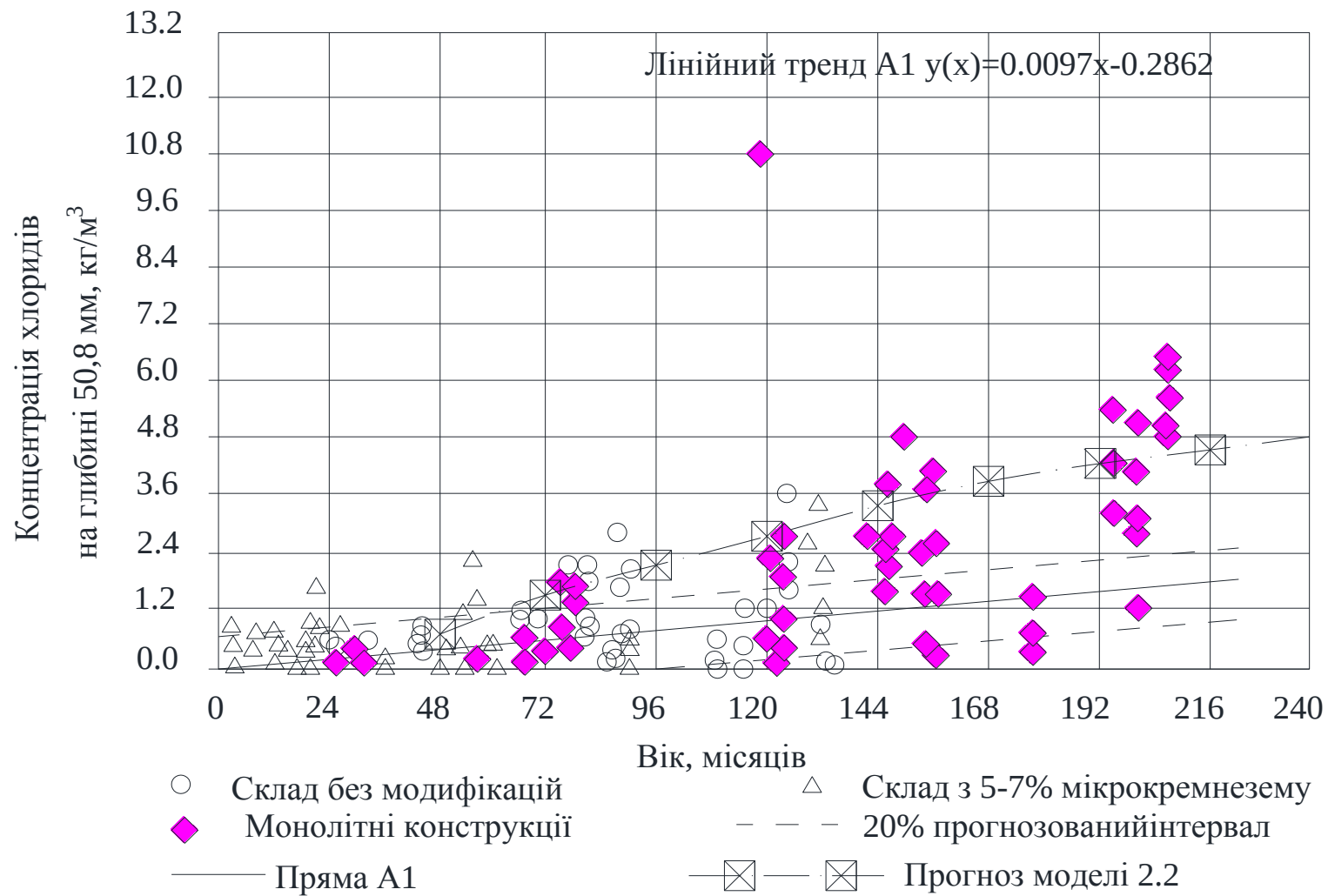


Рисунок 2.18 – Вміст хлоридів на глибині 50,8 мм в залежності від складу бетону і віку конструкції в ділянках без тріщин

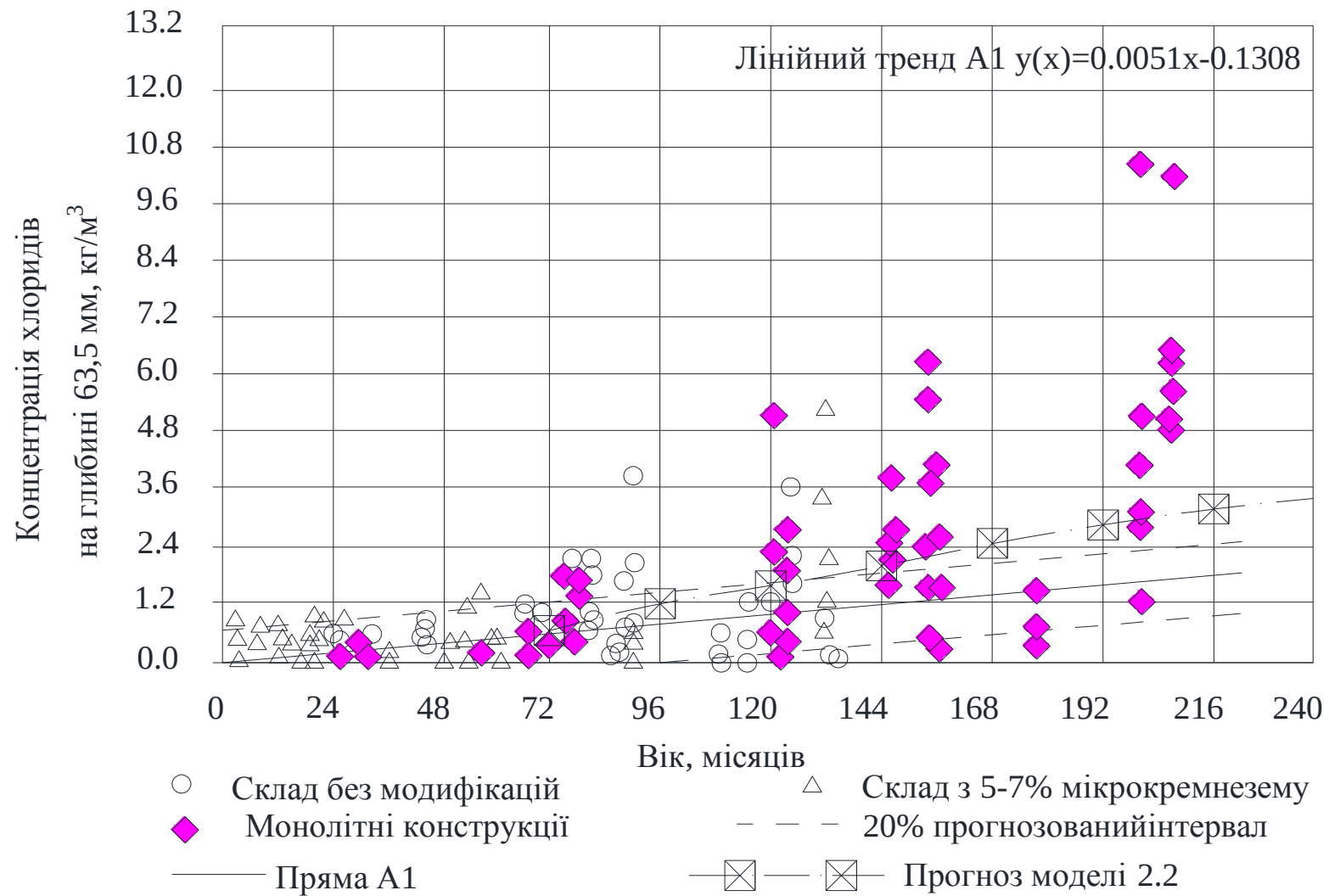


Рисунок 2.19 – Вміст хлоридів на глибині 63,5 мм в залежності від складу бетону і віку конструкції в ділянках без тріщин

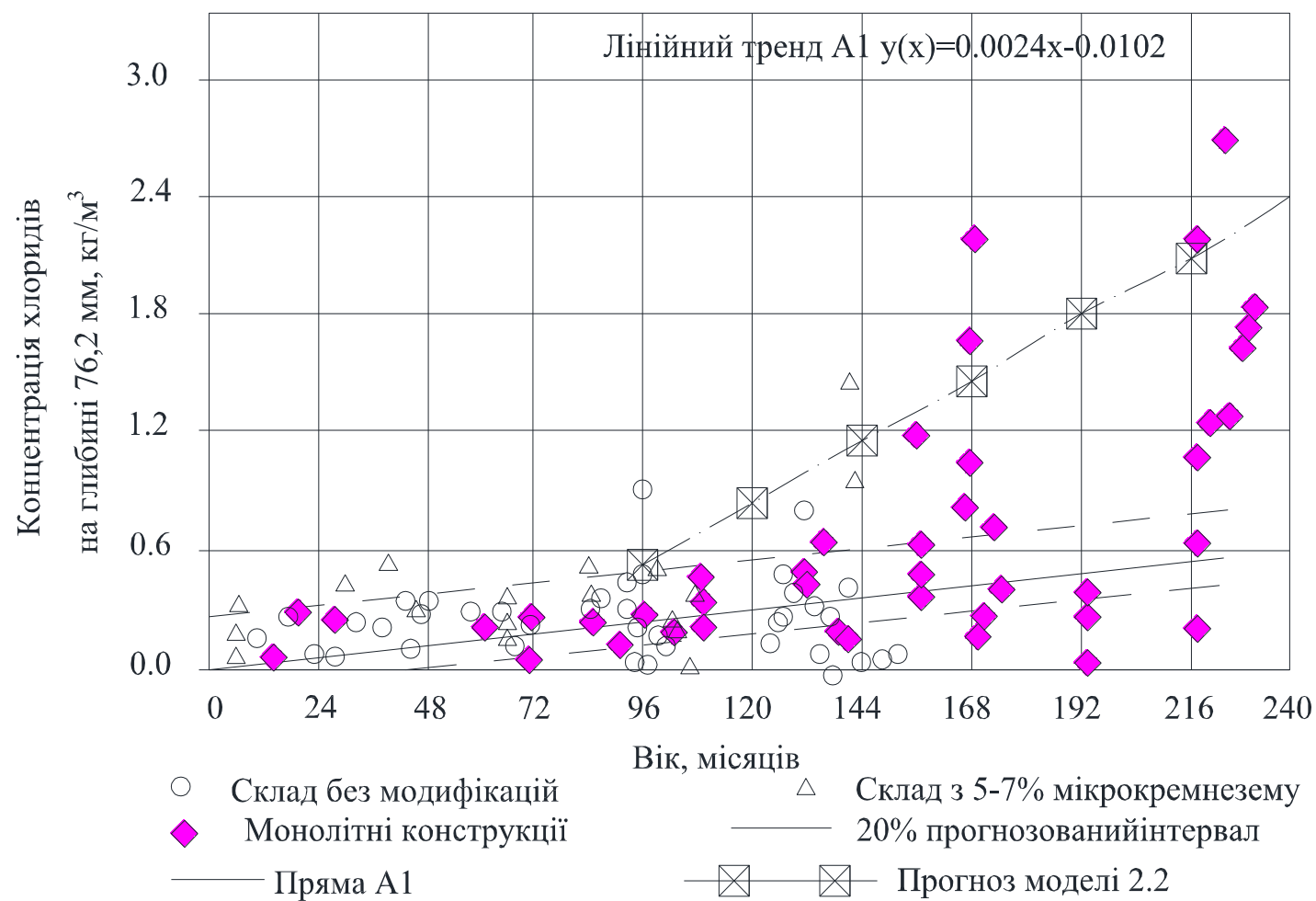


Рисунок 2.20 – Вміст хлоридів на глибині 76,2 мм в залежності від складу бетону і віку конструкції в ділянках без тріщин

Результати обчислень при співставленні результатів показали адекватність моделі. Відповідно до рис.2.17 результати прогнозу моделі 2.2 окреслюють верхню межу, утворюючи певний запас, неспівставний з лінійним трендом, нанесеним дослідниками. Проте після 10 років крива прогнозу відповідно до моделі 2.2 поступово наближається до прямої А1 так, що для 20-ти річної відмітки результати співставні.

Результати обчислень, зображені на рис.2.18 демонструють більше наближення прогнозу ресурсу моделі 2.2 для товщини захисного шару у 50,6 мм ніж для товщини 25,4 мм на відтинку 5-15 років, проте починаючи з відмітки 15 років тренд А1 та прогноз моделі 2.2 розходяться.

Вміст хлоридів на глибині 63,5 мм в ділянках без тріщин, зображений на рис. 2.19 та крива прогнозу, побудована відповідно до моделі 2.2, дуже близькі, звідки можна зробити висновок про те, що для даних умов модель дає найбільш реалістичний результат.

За умов прогнозування ресурсу на глибині 76,2 мм результати прогнозу, отримані відповідно до моделі 2.2 розходяться з даними натурних спостережень, та судячи з характеру кривої не наблизяться (рис. 2.20), що дає можливість зробити висновок про те, що для даних умов моделі 2.2 дає нереалістичний результат.

В роботі [65] було проаналізовано результати польових і лабораторних досліджень 71 залізобетонного моста у віці від 2 до 70 років (рис. 2.15). Мости розташовані в різних кліматичних зонах Росії. Залежно від кліматичних умов всі конструкції були поділені на групи по СНиП 23-01-99 «Будівельна кліматологія» [110].

Аналіз експериментальних даних показав, що повна карбонізація захисного шару бетону ($\text{pH} < 9.0$) має місце у 26.5 % обстежених мостів. Прийнята критична концентрація хлоридів, рівна 0.4 % від маси цементу у бетоні, досягнута у 32% обстежених мостів.

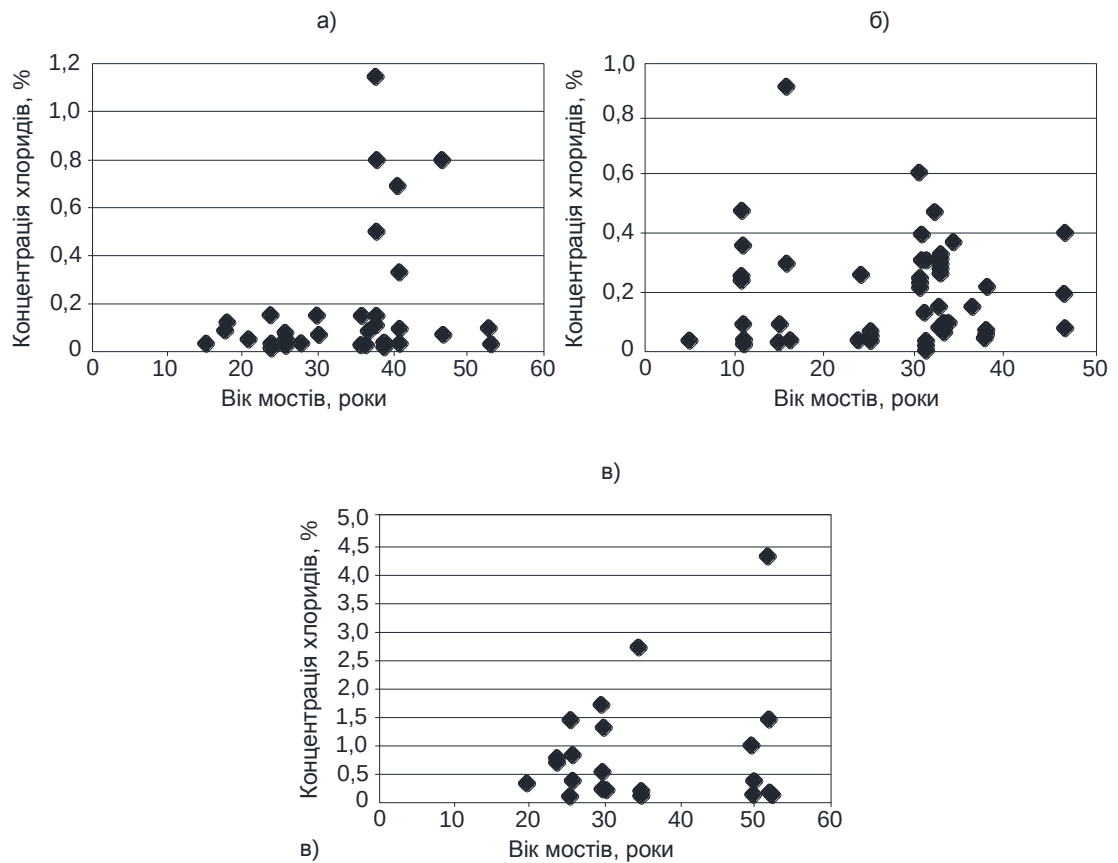


Рисунок 2.21 – Вміст хлоридів на поверхні арматури (глибина 20-30мм) залізобетонних елементів мостів в залежності від віку та кліматичного району (згідно з [110]): а) район ІВ; б) район ІІВ; в) район ІІІВ

Концентрація хлоридів 0.2% та повна карбонізація захисного шару спостерігається у 19% обстежених мостів. Всього ж мостів з концентрацією хлоридів більше 0.2% - 49%. За умови повної карбонізації бетону захисного шару у таких мостів різко зростає ризик корозії арматури.

Цікавими є результати обстеження несних залізобетонних конструкцій міського автодорожнього шляхопроводу в м. Саранську (інститут "Проектмостореконструкция", м.Саратов), який експлуатувався 36 років в умовах дії солей-антиобморожувачів, були виміряні наступні параметри: фактична товщина захисного шару, глибина карбонізації бетону (способом хімічної індикації), вміст хлоридів поблизу поверхні арматури, міцність бетону (неруйнівним методом).

Розташування ділянок відбору зразків: для балок прольотних будов - поблизу деформаційних швів (1,5 - 2 м від краю), для стійок опор - на висоті 1.5 м від рівня землі.

Дані по вимірюванню міцності свідчать про збільшення розбросу міцності при експлуатації конструкції в умовах дії агресивних середовищ. Непостійним є не лише середнє значення міцності для балок і для опор, але і коефіцієнти варіації міцності бетону: для балок він склав від 0.034 до 0.119, а для опор від 0.078 до 0.179. При менших середніх значеннях і великих коефіцієнтах варіації клас бетону знижується, оскільки визначається з урахуванням значення міцності при 95% забезпеченості.

Вимір товщини захисного шару, глибини карбонізації, і кількості хлоридів поблизу арматури також свідчить про нерівномірність їх розподілу як для балок, так і для опор. Це збільшує ризик раннього початку корозії арматури унаслідок карбонізації і проникнення хлоридів.

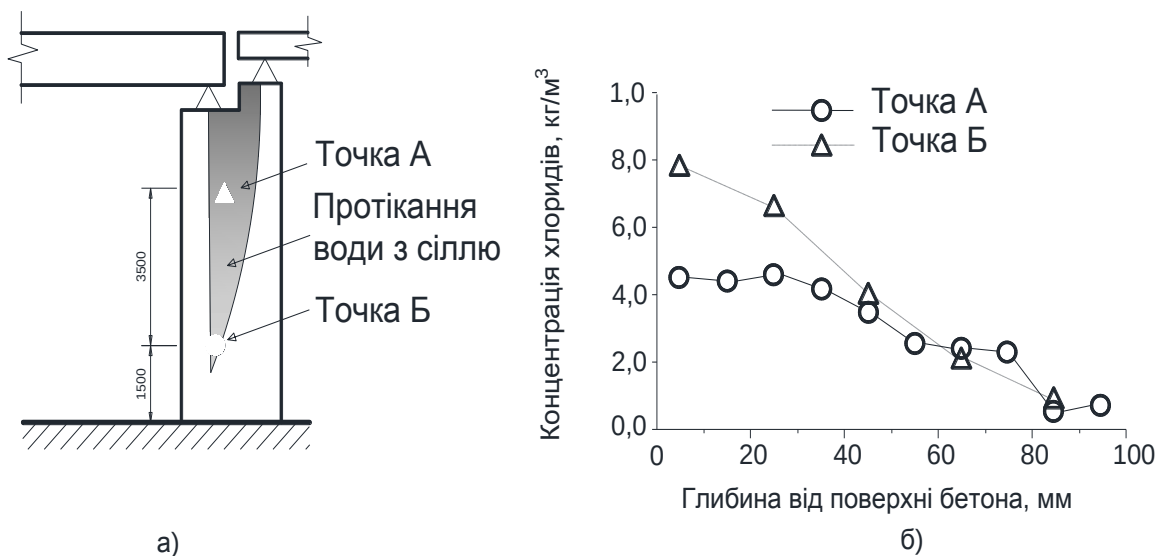


Рисунок 2.22 – Вплив хлоридвмісного антиобморожувача на опору мосту: а – опора мосту; б – профілі вмісту хлоридів у точках А і Б

В залежності від умов контакту залізобетонного елемента з агресивним середовищем в різних його точках може бути виявлено різний вміст хлоридів у бетоні і різний характер профілю проникнення хлоридів в бетон. За даними наведеними в роботі [157] на рис. 2.16 представлені профілі концентрації хлоридів, побудовані для точок А і В, розташованих на опорі шляхопроводу, що

експлуатується при впливі солей - антиобморожувачів. Крізь пошкоджений деформаційний шов сіль разом з водою протікає на опору.

Більш висока температура навколишнього середовища, збільшує швидкість проникнення хлоридів в бетон. Це підтверджується експериментальними даними, представленими в роботі [185], де досліджені залізобетонні палі, які протягом 75 років експлуатувалися в умовах впливу морської води (концентрація іонів хлору $17,9 \text{ кг/м}^3$) при середньорічних температурах 12°C і 21°C (рис.2.22). Залізобетонні палі мали квадратний поперечний переріз, розміром $356 \times 356 \text{ мм}$ і водо-цементне відношення, рівне 0,4.

У статті [138] представлені результати дослідження розподілу хлоридів по глибині залізобетонної плити проїзної частини автодорожнього моста, внаслідок впливу солей-антиобморожувачів. Залізобетонна плита моста експлуатувалася при середньорічній температурі 10°C . Поверхнева концентрація хлоридів склала $14,8 \text{ кг/м}^3$. На рис. 2.23 наведені профілі вмісту хлоридів в бетоні плити.

У роботі [101] наводяться експериментальні дані просування фронту критичної концентрації хлоридів при якій починається корозія арматури(верхня частина) і руйнування бетону (нижня частина) від часу в залізобетонні конструкції промислових будівель зі збірного і монолітного залізобетону. Хлоридвмісне середовище класифікувалось як сильно агресивне згідно СНиП 2.03.11-85. Результати дослідження вказують на те що різниця в ресурсі незначна.

На рис. 2.24, за даними [101] наведена залежність коефіцієнта дифузії від водоцементного відношення і температури.

Крім водоцементного співвідношення якість бетону залежить від застосовуваних добавок. Найбільш істотно прониканню хлоридів в бетон перешкоджає додавання золи-виносу, так як застосування цієї добавки викликає зміни в будові пор . Вплив цієї добавки на коефіцієнт дифузії досліджувався в роботах [156], [190] . На рис. 2.25 представлені залежності коефіцієнта дифузії

від кількості доданої золи-виносу для різних водо-цементних співвідношень за даними [156] і [190] , відповідно.

Протягом часу коефіцієнт дифузії зменшується через зменшення в розмірах або перекриття пор. Експериментальні дані, що обґрунтовують цю залежність були отримані при дослідженні бетонів протягом 8 років в умовах морського клімату в Шотландії. В роботі [153] представлена залежність коефіцієнта дифузії від часу витримки зразків для бетону на портландцементі, з водоцементним співвідношенням від 0,4 до 0,6 (рис. 2.26) . Наведені дані показують , що спочатку невеликий розкид значень коефіцієнтів дифузії з $V/C=0.6-0.4$ збільшується з плином часу , внаслідок фізико -хімічних процесів, що протікають в бетоні при прониканні хлоридів.

Автором роботи [87] було досліджено зміну міцнісних показників бетону в умовах впливу рідких хлоридвмісних середовищ. Для витримки в 1 % розчині соляної кислоти $PPH = 0.56$ і концентрацією іонів хлору 10.09 г/л було прийнято 3 види зразків: армовані бетонні зразки (6x12x100 см) , бетонні куби (5x5x5 см), і призми (10x10x40 см). У віці 28 діб характеристики бетону склали: 40.2 МПа - Кубікова міцність , 33.4 МПа – призмova міцність 35500 МПа - початковий модуль пружності .

За умовами впливу агресивного середовища зразки були розділені на 4 групи: зберігання зразків у нормальних термовологісних умовах; вплив 1 % розчину соляної кислоти тільки на стиснуту частину перерізу; вплив 1 % розчину соляної кислоти з боку стислій і розтягнутої зон перетину; всебічний вплив 1 % розчину соляної кислоти. Для ізоляції від впливу агресивного середовища відповідні грані оброблялися лаком ХП- 743 . Зразки зберігалися в ємностях з агресивним розчином при повному зануренні , концентрація розчину соляної кислоти контролювалася і підтримувалася незмінною. Випробування зразків проводилися у віці 28 діб, потім після 180, 360, 540 і 720 діб зберігання в 1% розчині соляної кислоти. Залізобетонні елементи випробовувалися на відцентровий стиск і вигин (чотирьохточковий) На рис. 2.28 показані результати випробувань зразків бетону на стиск.

Випробування бетонних кубів і призм показали, що при тривалому впливі рідких хлоридвмісних середовищ відбувається зміна властивостей бетону. На рис. 2.28 штриховими лініями нанесені тренди кордонів розкиду відносної міцності зразків, що свідчить про випадкові властивості міцності бетону як у вихідному стані, так і в насиченому хлоридвмісному.

Як показали проведені дослідження, по мірі насичення матеріалу хлоридами (1 % розчин HCl) відбувалося зниження модуля пружності бетону, проте автором роботи [89] був зроблений також висновок про незначний вплив агресивних розчинів на деформації бетону, відповідні максимальним напруженням.

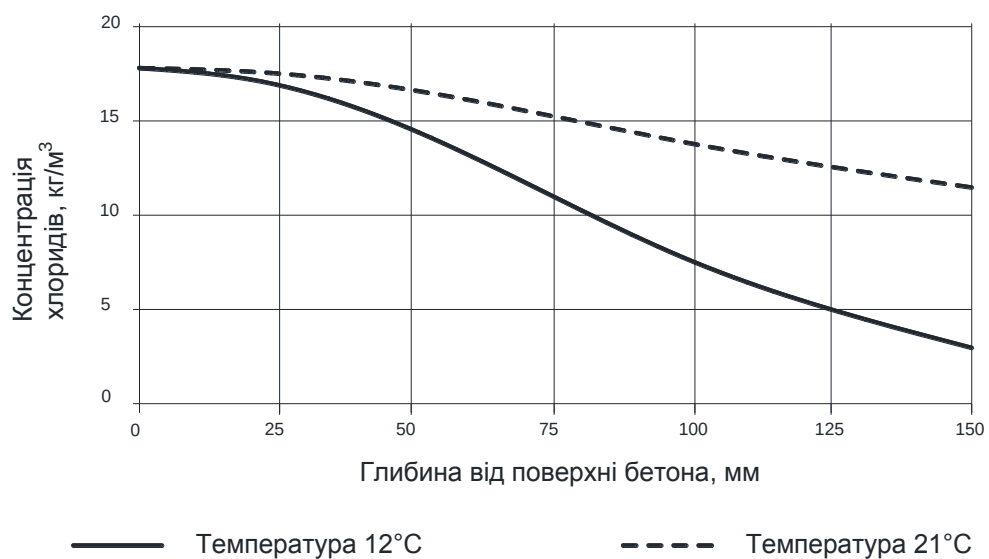


Рисунок 2.23 – Розподіл хлоридів в перерізі палі

В роботі [92] наводяться результати експериментального дослідження дії змінного насичення в розчині кухонної солі (NaCl). В результаті експериментів з'ясувалося, що багаторазове насичення в розчинах NaCl і висушування зразків призводить до більш інтенсивного їх руйнування, ніж в аналогічному випадку у воді. Після 100 циклів поперемінного зволоження і висушування міцність зразків майже не змінилася, однак зниження міцності цементного каменю після 400 циклів зволоження і висушування в розчині NaCl досягло 30 %. Результати цього експериментального дослідження, наведено у роботах [87] і [41].

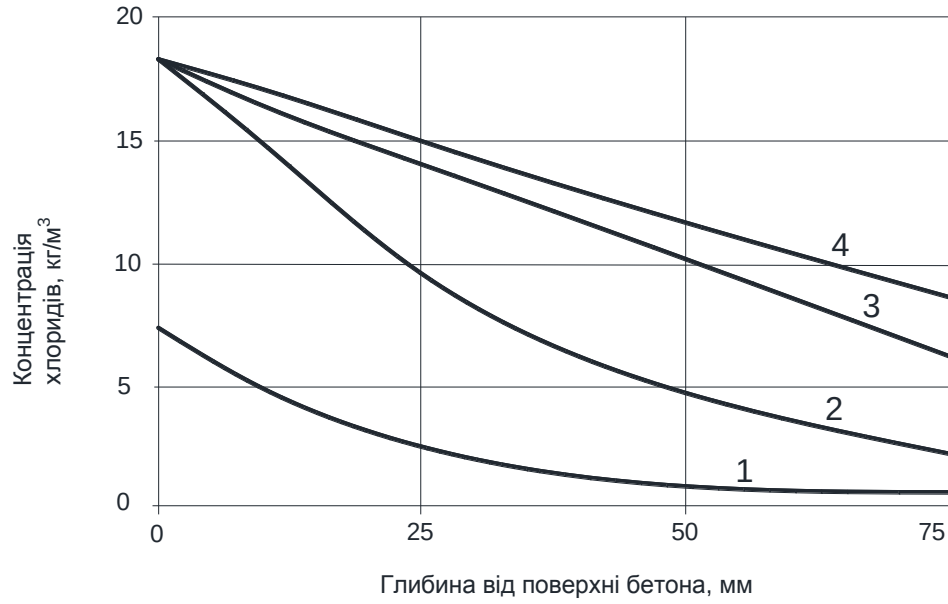


Рисунок 2.24 – Розподіл хлоридів залізобетонній плиті проїзної частини після: 1 – 10 років експлуатації; 2 – 25 років експлуатації; 3 – 50 років експлуатації; 4 – 75 років експлуатації

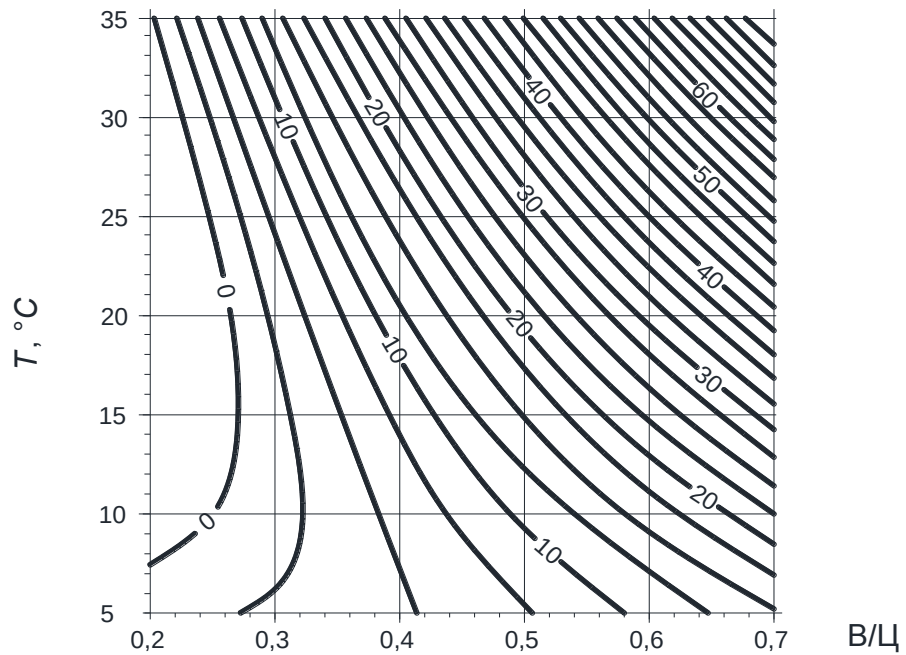


Рисунок 2.25 – Коефіцієнт дифузії хлоридів ($D \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$) в залежності від водоцементного співвідношення і температури

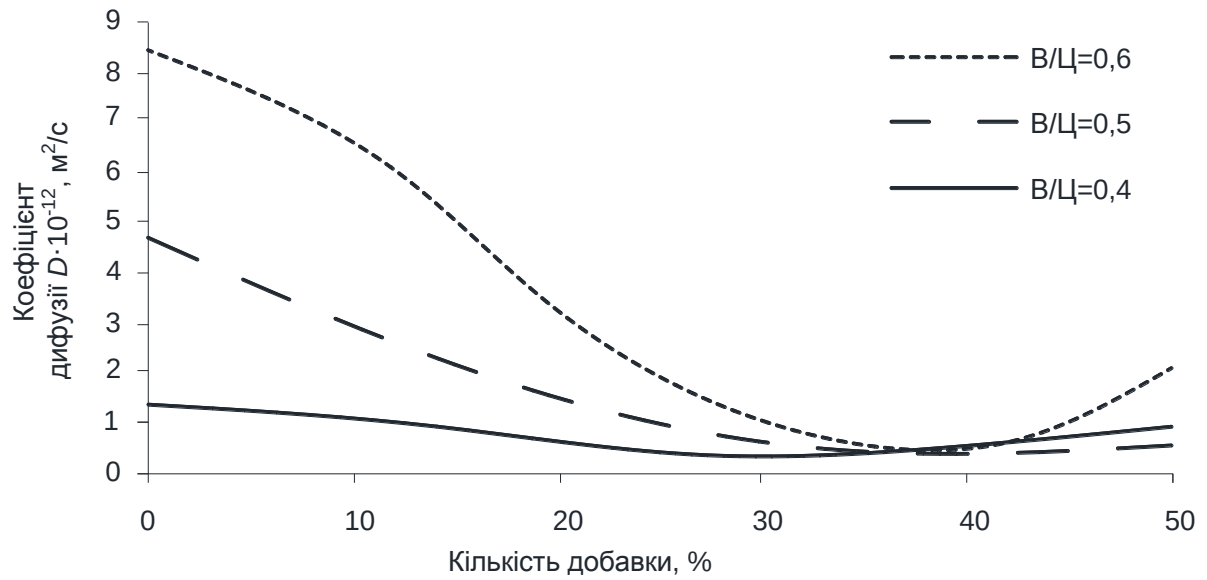


Рисунок 2.26 – Коефіцієнт дифузії хлоридів ($D \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) в залежності від кількості доданої золи-виносу

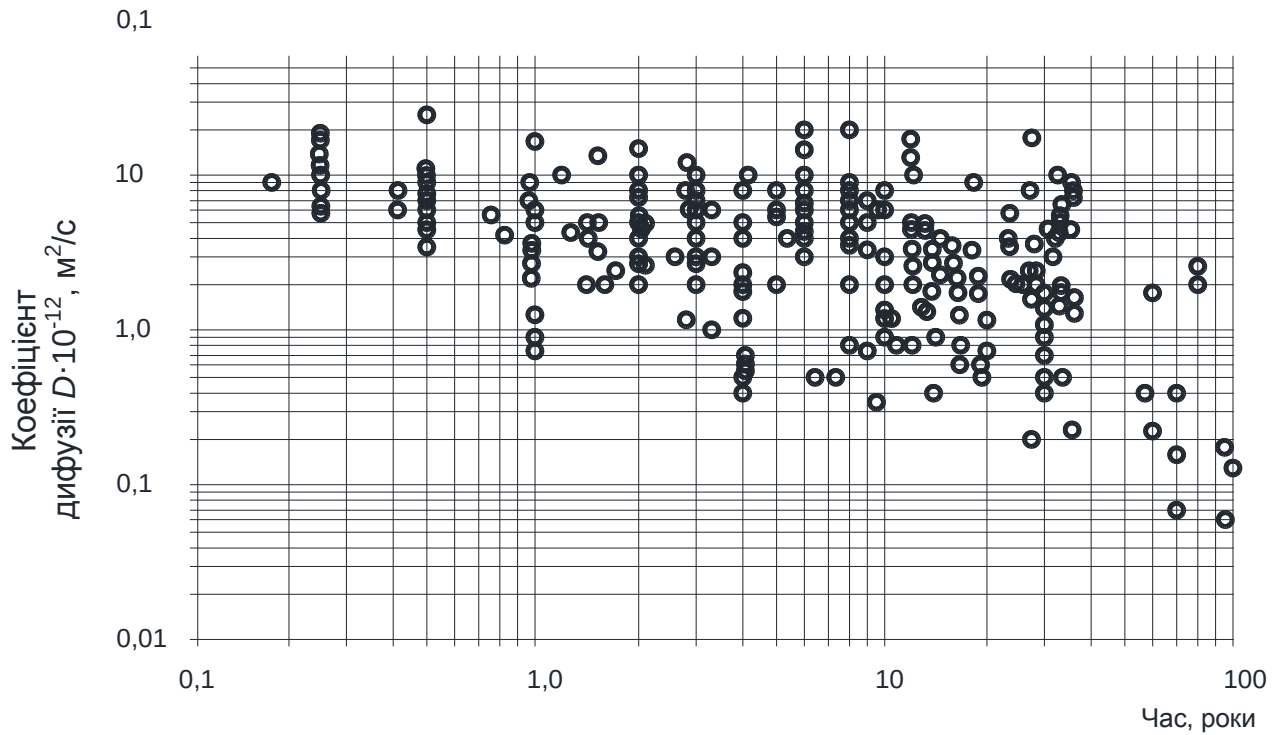


Рисунок 2.27 – Коефіцієнт дифузії хлоридів ($D \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) в залежності від часу для B/C від 0,4 до 0,6

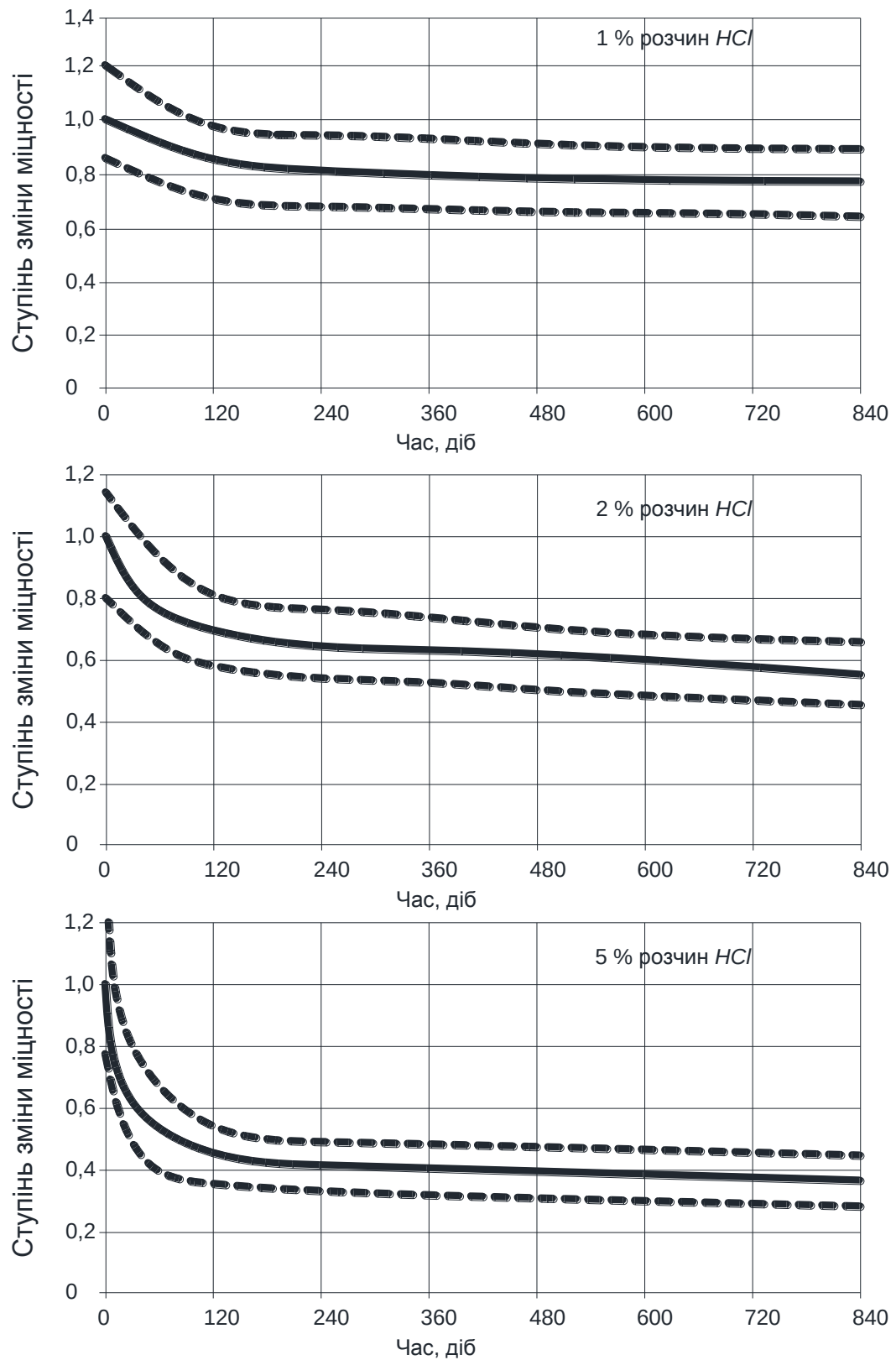


Рисунок 2.28 – Залежність міцності бетону від часу та концентрації розчину соляної кислоти

2.2 Детерміністична модель прогнозування довговічності арматури згинаних залізобетонних елементів мостів

У роботі [72] зазначається, що пориста структура бетону може поглинути деяку кількість продуктів корозії, але подальше утворення продуктів корозії, утворюватиме тиск на бетон, навколишній армуючий елемент.

Арматурна сталь у бетоні захищена природним чином завдяки пасивному шару окису заліза, який утворюється на поверхні сталі при контакті з водою, киснем і лужними продуктами гідратації цементу. Основним лужним продуктом є $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що складає до 20% продуктів гідратації цементу, завдяки чому рівень pH утримується на рівні близько 13. Цей захист може зруйнуватися при прояві двох основних факторів: процесу карбонізації або впливу хлоридів. Корозія виявляється тим швидше, чим нижче рівень pH або чим більше концентрація іонів Cl^- .

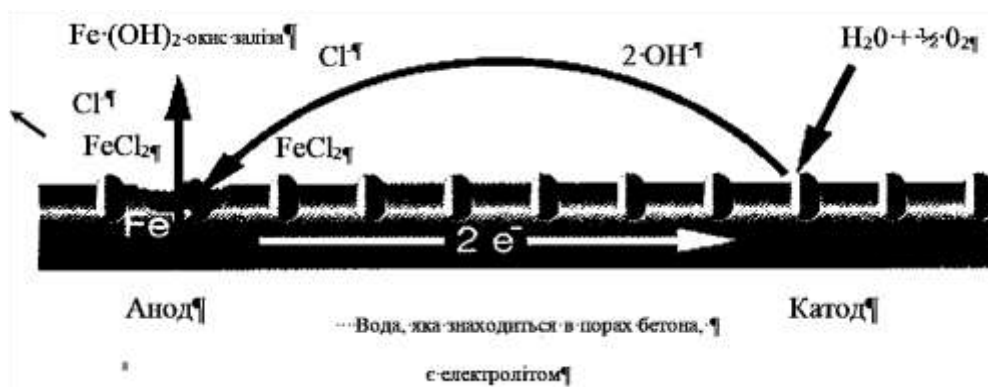


Рисунок 2.29 – Механізм корозії арматури в бетоні, насиченому хлоридами

На відміну від загальноприйнятого уявлення про те що захисний шар можна просто замінити у разі вичерпання його ресурсу невірне. В роботі [1, 77] показано, що при різниці показників $pH \geq 1$ процеси корозії арматури відбувається дуже інтенсивно. Таким чином, ремонт зруйнованої зони бетону з оголеною арматурою без прийняття спеціальних заходів з вирівнювання показників pH або інших заходів для захисту арматури від корозії може бути шкідливим для конструкції і знизити її довговічність.

2.2.1 Математична модель деградації арматури

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури з роботи [25] швидкість деградації арматури:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} = v_0 \exp \left(\frac{V\sigma}{R \cdot T} \right), \quad (2.7)$$

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 – температура.

Запишемо 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:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n}. \quad (2.8)$$

Запишемо рівняння рівноваги нормального перерізу, що відповідає ΔM_n з (2.7) як функцію, що залежить від часу і з неї отримаємо вираз для площі поперечного перерізу арматури:

$$\Delta M_n = R_{sn} \cdot \Delta A_{s,corr}(\beta) \cdot \left(h_{01} - \frac{R_{sn} \cdot \Delta A_{s,corr}(\beta)}{2R_{bn} \cdot b} \right), \text{mod } i \quad (2.9)$$

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

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 від часу:

$$A_{s,corr}(t_{corr}) = \pi \cdot n_1 \cdot \left(d \cdot v_{corr} \cdot t_{corr} - v_{corr}^2 \cdot t_{corr}^2 \right), \quad (2.10)$$

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 (2.9) та (2.10) можливо аналітично отримати t_{corr} , що відповідає ΔM_n :

$$t_{corr} = \frac{d}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot d^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right)} \right). \quad (2.11)$$

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури з роботи [25]:

$$v = \frac{\partial \delta}{\partial t} = v_0 \exp \left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T} \right), \quad (1.49)$$

де δ – глибина корозійного ушкодження арматури (м);

v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень (мкм/рік, згідно з RILEM [179] в умовах хлорид насиченого середовища 98 мкм/рік.);

V – мольний об'єм кородуючого металу (м³/моль);

σ – напруження в арматурі (МПа);

R – універсальна газова стала 8,314472 Дж/(моль·К);

T – температура (К).

2.2.2 Перевірка адекватності моделі деградації арматури

Відповідно до результатів досліджень, описаних в роботі [64] побудовано графіки рис.2.30

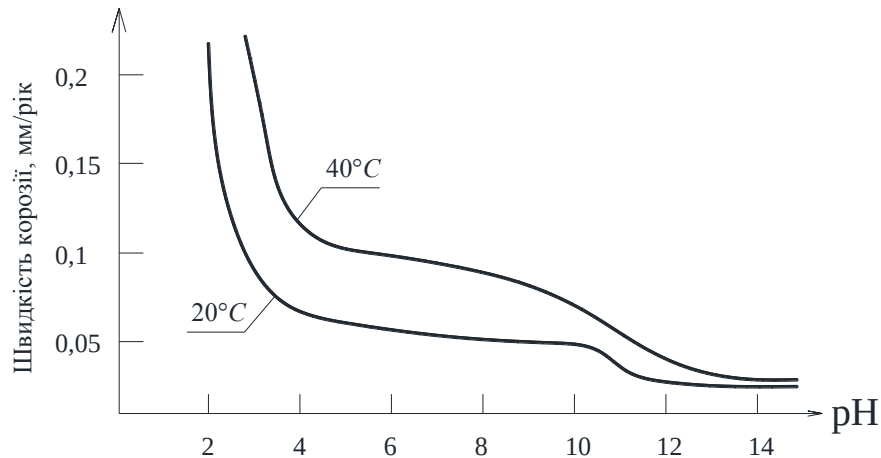


Рисунок 2.31 – Швидкість корозії арматури в залежності від pH середовища за температури середовища 20°C та 40°C відповідно

2.3 Висновки до розділу 2

1. Результати обчислень при співставленні результатів показали адекватність моделі. Відповідно до результатів прогнозу моделі 2.2 для товщини захисного шару 25,3мм окреслюють верхню межу, утворюючи певний запас, неспівставний з результатом досліджень в роботі Will D.Lindquist, David Darwin, JoAnn Browning, Gerald G.Miller [193] в період життєвого циклу до 10 років. Після 10 років результати прогнозу відповідно до моделі 2.2 поступово наближаються до результатів натурних спостережень, так що для 20-ти річної відмітки результати співставні.

2. Результати обчислень для товщини захисного шару у 50,6мм демонструють більше наближення прогнозу ресурсу моделі 2.2 ніж для товщини 25,4 мм на відтинку 5-15 років, проте починаючи з відмітки 15 років результати

прогнозу відповідно до моделі 2.2 поступово розходяться з результатами натурних спостережень.

3. Вміст хлоридів на глибині 63,5 мм в ділянках без тріщин відповідно до моделі 2.2, дуже близький до даних спостережень, звідки можна зробити висновок про те, що для таких умов модель дає найбільш реалістичний результат.

4. За умов прогнозування ресурсу на глибині 76,2 мм результати прогнозу, отримані відповідно до моделі 2.2 розходяться з даними натурних спостережень, та судячи з характеру кривої не наближаться, що дає можливість зробити висновок про те, що модель 2.2 адекватно працює в межах товщини захисного шару від 20мм до 70мм.

5. Аналіз даних показав, що повна карбонізація захисного шару бетону ($pH < 9.0$) має місце у 26.5% обстежених мостів роботи [65], де було проаналізовано результати польових і лабораторних досліджень 71 залізобетонного моста у віці від 2 до 70 років. Прийнята критична концентрація хлоридів, рівна 0.4% від маси цементу у бетоні, досягнута у 32% обстежених мостів.

6. Необхідно відзначити, що за певних співвідношень критичної та поверхневої концентрацій хлоридів модель не працює через специфіку функції помилок, яка може бути використана у вузькому діапазоні значень аргумента.

7. Концентрація хлоридів 0.2% та повна карбонізація захисного шару спостерігається у 19% мостів, описаних в роботі [65]. Всього ж мостів з концентрацією хлоридів більше 0.2% – 49%. За умови повної карбонізації бетону захисного шару у таких мостів різко зростає ризик корозії арматури.

8. Аналіз достовірності моделі деградації арматури показав адекватність отриманих даних з результатами лабораторних і натурних спостережень, описаних в роботах [1, 25, 72, 77]

РОЗДІЛ 3

СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗАХИСНОГО ШАРУ ЗГИНАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ НА МОЛЕКУЛЯРНОМУ РІВНІ

3.1 Теоретична база моделі

3.1.1 Мета

Детерміністична модель, представлена в розділі 2 побудована на фізичному підході, демонструє суттєві відхилення за певних умов від тренду експериментальних даних, тому беручі до уваги досвід моделей, що базуються на фундаментальних принципах статистичного аналізу (метод Монте-Карло) DuraCrete [147], Life-365 [164], була сформована мета цього розділу: розробка моделі оцінки довговічності захисного шару залізобетонного елемента шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) з урахуванням сукупного впливу ймовірнісного характеру стану оточуючого середовища [127, 129, 130].

3.1.2 Гіпотези

Постулюється, що час втрати пасивуючих властивостей захисного шару є початком тріщиноутворення в бетоні, початком періоду активної корозії арматури, що в сумі складають строк служби елемента.

Процес деградації захисного шару в дослідженні описується процедурою визначення концентрації іонів проникаючої речовини до рівня поверхні арматури. В залежності від типу в'язучого і типу сталі робочої арматури критичною концентрацією хлоридів на поверхні арматури з [142] варіюється в межах від 0,06 до 0,2 відсотка від маси в'язучого. В той же час в роботі [188] це значення фіксується на рівні 0,2 відсотка від маси в'язучого в усіх випадках.

Поверхнева концентрація іонів Cl^- змінюється у межах 0,4–1,2 відсотка від маси в'язучого і залежить від багатьох умов. На практиці її встановлюють за даними натурних спостережень.

Чинні норми [30] регламентують мінімальну товщину захисного шару, проте не дають ні яких важелів управління товщиною захисного шару. В цій роботі поставлена задача управління часом деградації захисного шару в залежності від зовнішніх факторів.

Запропонована в роботі ймовірнісна модель деградації дає оцінку концентрації іонів на заданій глибині залізобетонного елемента за протягом заданого часу.

Для відображення процесу дифузії в змінних простору і часу був використаний другий закон А.Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (1.15)$$

де C – концентрація хлоридів kg/m^3 ;

t – час, с;

D – коефіцієнт дифузії, m^2/s ;

x – глибина, м.

3.1.3 Загальний опис моделі

Модель базується на законах дифузії іонів всередині бетону за рахунок різниці концентраційних потенціалів за відсутності хімічних реакцій і протитоку в залежності від строку експлуатації, температури і вологості.

Оскільки на процес дифузії впливає одразу декілька умов, таких як: вологість, температура, поверхнева концентрація, час експлуатації, то швидкість дифузії постійно змінюється. Цей факт дуже ускладнює аналітичні розрахунки і робить їх занадто складними. До того ж, сам процес дифузії в бетон сьогодні ще є недостатньо вивчений. Тому для моделювання прийнятий статистичний метод Монте-Карло [6].

Суть розв'язку рішення фізичних задач за методом Монте-Карло полягає в тім, що фізичному явищу зіставляється імовірнісний процес, який імітує його перебіг. Значення фізичних величин знаходять усередненням по множині реалізацій процесу, що моделюється.

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

$$p_{x \geq h} = \frac{N_{x \geq h}}{N}, \quad (3.1)$$

де $p_{x \geq h}$ – частка іонів Cl^- , що продифундували на глибину $\geq h$;

$N_{x \geq h}$ – кількість іонів, що пройшли на задану глибину h ;

N – загальна кількість іонів (кількість випробувань).

Для визначення концентрації іонів Cl^- на глибині h після N випробувань скористаємось залежністю:

$$C_h = C_0 \cdot p_{x \geq h}, \quad (3.2)$$

де C_h – концентрації іонів Cl^- на глибині h ;

C_0 – поверхнева концентрація іонів Cl^- .

3.1.4 Прогноз часу карбонізації.

Розв'язок диференційного рівняння (1.15) при допущенні, що концентрація вуглецю лінійно змінюється по товщині захисного шару бетону та градієнт концентрації є постійним, дає зв'язок часу з глибиною карбонізації бетону:

$$d_c = \left(\frac{2DCt}{m_0} \right)^{0.5}, \quad (3.3)$$

де d_c – глибина карбонізації в напрямку координати x , нормальної до поверхні бетону;

m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні.

3.1.5 Прогноз часу хлоридизації.

Рівняння (1.15) при граничних і початкових умовах $C(x,t) = C_S$ для $x = 0$, $t > 0$ і $C(x,t) = C_I$ для $x > 0$, $t = 0$ та постійному коефіцієнт дифузії хлоридів в бетоні має розв'язок:

$$C = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (3.4)$$

де $\operatorname{erf}()$ – функція помилок;

C_I – початковий вміст хлоридів в бетон, кг/см³;

C_S – концентрація хлоридів на поверхні захисного шару бетону, кг/см³

Розв'язок (3.4) встановлює зв'язок глибини проникнення хлоридів з часом:

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_I}{C_S - C_I} \right) \right)} \right]^2 \quad (3.5)$$

де $\operatorname{erfc}()$ – додаткова функція помилок.

Значна кількість дослідників вважає, що врахування граничних та початкових умов $x = 0$, $t > 0$ і $C(x,t) = C_I$ в розв'язку рівняння (3.5) є зайвим в силу малості C_I порівняно з концентрацією хлоридів на поверхні захисного шару бетону C_S . В цьому випадку розв'язок рівняння (3.5) має дещо простішу форму:

$$C = C_S \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right]. \quad (3.6)$$

3.2 Теоретичний базис розв'язку дифузійної задачі методом Монте-Карло

Метод Монте-Карло - спосіб вирішення різних задач із використанням процедур випадкового розіграшу тих або інших величин. Чисельні методи Монте-Карло – чисельні методи вирішення математичних задач за допомогою моделювання випадкових величин і статистичної оцінки їхніх характеристик".

Візьмемо коло, розіб'ємо його на 100 секторів так, що, скажемо, 0 - північ, 25 - схід, 50 - південь і т.п. У центрі кола помістимо вісь із насадженої на неї стрілкою. Це - «рулетка». Обертаємо стрілку й дивимося, на якому секторі вона зупинилася. Якщо вона зупинилася на 25, то йдемо на схід. Беремо креслення й відзначаємо на ньому крапку 1, знову штовхаємо стрілку, ставимо крапку 2 (у цьому випадку відстань між крапками завжди однакові) і т.п., поки не пройдемо весь шлях. На практиці рулеткою ніхто не користується - для цього є таблиця випадкових чисел.

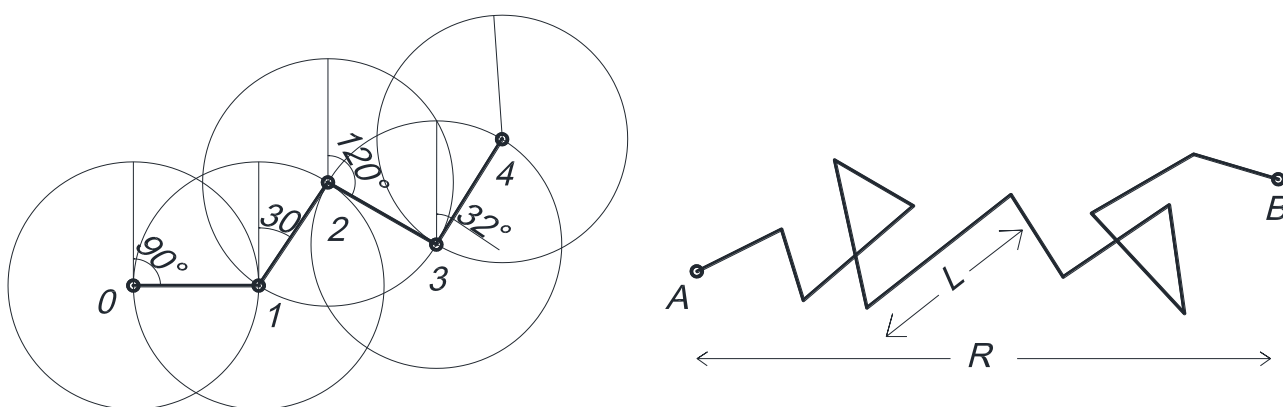


Рисунок 3.1 – Моделювання руху окремої молекули методом Монте-Карло

Моделювання дифузії на молекулярному рівні методом Монте-Карло. Молекула або атому у довільному середовищі внаслідок теплового руху переміщається по механізму випадкових блукань. Для опису такого процесу використовуються імовірнісні 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. 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 змішань по трьох просторових координатах.

$$\langle R^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle + \langle z^2 \rangle. \quad (3.7)$$

Аналітично можна показати, що якщо векторна відстань від початку через N кроків, то середній квадрат відстані від початку пропорційний числу кроків N тобто:

$$\langle R_N^2 \rangle = NL^2, \quad (3.8)$$

де L - довжина кожного кроку.

Оскільки число кроків пропорційно часу, то

$$\langle R^2 \rangle = \alpha t; \langle R \rangle = L\sqrt{N}. \quad (3.9)$$

Тобто середній квадрат відстані пропорційний часу. Зсув частки в наперед заданому напрямку, або точніше середній квадрат зсуву $\langle x^2 \rangle$ визначається рівнянням Ейнштейна:

$$\langle x^2 \rangle = 2kTBt / N_0. \quad (3.10)$$

Рухливість B характеризує як властивості частки, що зміщується, так і властивості середовища. Природно, що як середовище можуть розглядатися газ, рідина, тверде тіло, плазма. Зокрема для класичного випадку руху кулястої частки радіуса r рухливість обчислюється по рівнянню Стокса:

$$B = \frac{1}{6\pi\eta r}, \quad (3.11)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя рідини;

r – радіус частки (крапельки), що беруть участь у броунівським русі;

k – постійна Больцмана;

N_0 - число Авогадро;

T – температура.

Беручу до уваги, що:

$$\langle R^2 \rangle = 6kTBt, \quad (3.121)$$

вираз для отримання коефіцієнта дифузії можна записати як:

$$D = \frac{kTB}{N_0} = \frac{kT}{6\pi\eta r N_0} \quad (3.13)$$

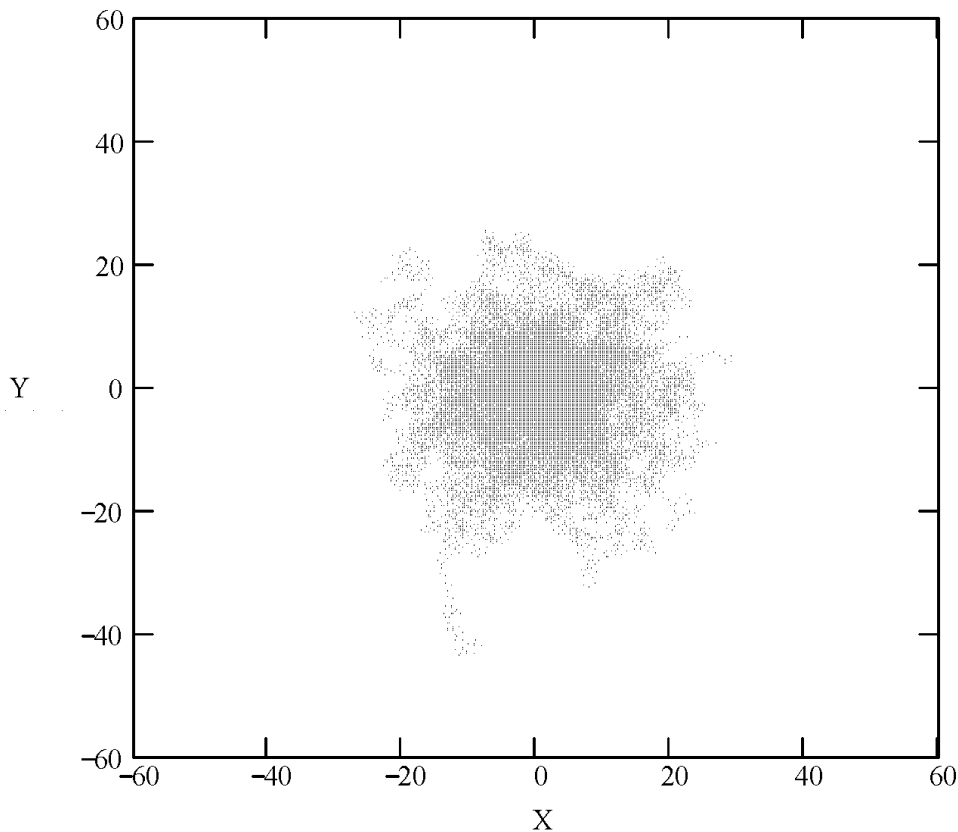


Рисунок 3.2 – Моделювання дифузії окремої молекули методом Монте-Карло

У практиці оцінки порядку величин часто зустрічається вираз:

$$\langle x^2 \rangle = 2DT \quad (3.14)$$

3.2.1 Алгоритм моделі карбонізації

Карбонізація бетону проходить за рахунок проникнення карбону у захисний шар залізобетону із атмосфери. В залежності від багатьох умов, таких як вологість, середня температура, насиченість карбоном довкілля та ін. швидкість карбонізації змінюється. Цей факт дуже ускладнює аналітичні розрахунки і робить їх практично неможливими. Теж саме стосується і хлоридизації. Проникнення карбонатів і хлоридів в бетон не дуже то і вивчений

процес, ускладнений практично неможливістю аналітичного розв'язання диференціальних рівнянь законів Фіка. Тому для вирішення задачі був запропонований метод алгоритм проникнення часток за рахунок броунівського руху за методом Монте-Карло.

Рівняння дифузії для невзаємодіючих часток (D не залежить від n) записується в такий спосіб:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \Delta n, \quad (3.15)$$

де n – концентрація часток;

D – коефіцієнт дифузії.

Для часток, що вийшли з однієї точки $n(x=0, t=0) = \delta(0)$, його розв'язок має вигляд:

$$n(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi \cdot D \cdot t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4D \cdot t}}. \quad (3.16)$$

Середній квадрат зсуву часток при цьому пропорційний часу (формула Ейнштейна):

$$x^2 = 2D \cdot t. \quad (3.17)$$

Звідки:

$$t = \frac{\langle x^2 \rangle}{2D}. \quad (3.18)$$

Оскільки зсуви в протилежні сторони рівно імовірні, то середнє значення зсуву для нескінченного числа часток за один крок $\langle \Delta x \rangle = 0$. Спостережуване

середнє" зсуву частки $\langle \Delta x \rangle_N = \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{j=0}^{N-1} (Rw_0)_j \right] = 0,709762$ буде прагнути до

нуля при збільшенні числа часток. Після кожного кроку частки будуть "розповзатися" від осі y . Позначимо $x(k)$ координату деякої частки через k кроків. Тоді:

$$x(k+1) = x(k) + \Delta x. \quad (3.19)$$

Усереднивши цю рівність (знову по множині часток), одержуємо:

$$\langle x(k+1) \rangle = \langle x(k) \rangle. \quad (3.20)$$

Тобто середнє значення $\langle x(k) \rangle$ не змінюється від кроку до кроку.

Сам алгоритм складається з наступних кроків

А. Обирається ділянка зразка, його геометричні параметри, фізико – механічні властивості

Б. Задається концентрація карбону на виході в зразок і на вході

В. Робиться розіграш проходження кожною часткою шляху до моменту отримання шуканої концентрації на виході

Г. Підраховується кількість циклів розіграшів

Д. Обчислюється дійсний час проходження одного циклу в секундах

Є. Обчислюється загальний час перебігу експерименту

$$t = \frac{\langle d^2 \rangle}{4D} \Rightarrow T = n \cdot t. \quad (3.21)$$

На рис. 3.3 показано графічне зображення алгоритму.

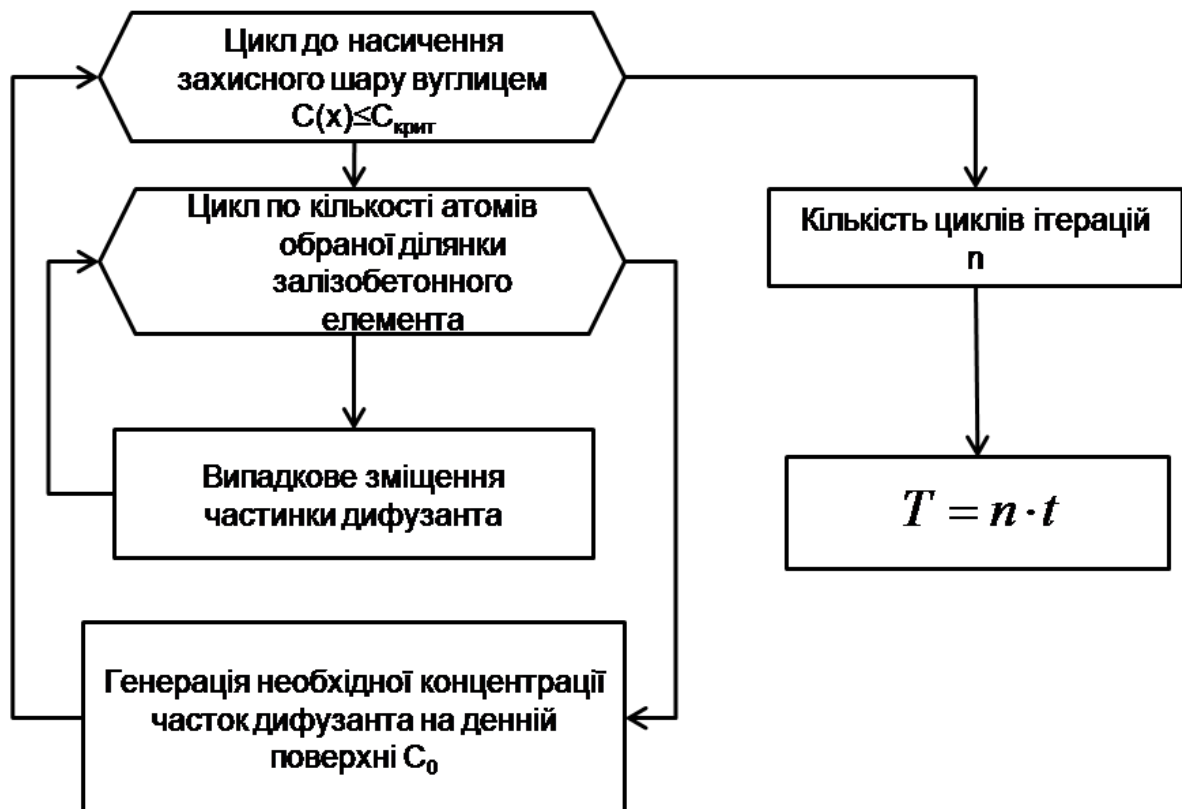


Рисунок 3.3 – Логічна схема моделі карбонізації

Алгоритм було реалізовано в програмних комплексах VisualBasic та MathCAD. На рис. 3.5 зображено алгоритм карбонізації в термінах MathCAD. Слід зауважити, що на відміну від VisualBasic генератор випадкових чисел в MathCAD псевдовипадковий, тому було зроблено перевірку, шляхом використання альтернативних генераторів (наприклад генератор VisualBasic, який замість генерації числа генерує псевдовипадкову адресу в ОЗУ, звідки зчитується число не пов'язане жодним чином з самим програмним засобом), чи істотно вплине цей факт на результат. Виявляється, що в нашому випадку розбіжність результатів не перевищила 0,5%.

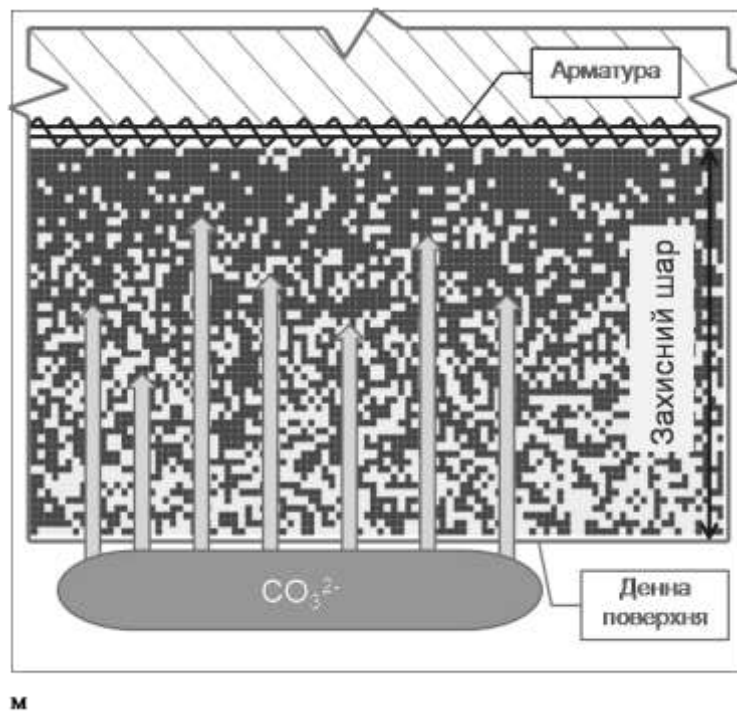


Рисунок 3.4 – Схема проникнення Карбону в захисний шар залізобетонного елемента

На Рис.3.4 світлі квадратики – частки карбону, темним позначено цементний камінь. Як зазначено вище процес карбонізації небезпечний тим, що утворює наскрізний ефект і захисний шар втрачає свої пасивуючі властивості.

```

ProgSkachkiSuporom :=
M ← 0
i ← 0
j ← 0
for i ∈ 0..(x-1)
  for j ∈ 0..(N2-1)
    Mi,j ← 0
Cx ← 0
step ← 0
while Cx < C2
  for j ∈ 0..N2-1
    for i ∈ 0..x-2
      if Mi+1,j = 1
        if Mi,j = 0
          move ← Round(rnd(1), 1)
          if move = 1
            Mi,j ← 1
            Mi+1,j ← 0
          Cx ←  $\frac{\sum_{j=0}^{N^2-1} M_{0,j}}{N^2}$ 
        step ← step + 1
      for j ∈ 0..(N2-1)
        Mx-1,j ← 0
      Natom ← 0
      C ← 0
      while C < C1
        mesto ← Round(rnd(N2-1), 1)
        if Mx-1,mesto = 0
          atom ← Round(rnd(1), 1)
          Mx-1,mesto ← 0 if atom = 0
          if atom = 1
            Mx-1,mesto ← 1
            Natom ← Natom + 1
          C ←  $\frac{\text{Natom}}{N^2}$ 
    ( M
      step
      Cx
      C )

```

Рисунок 3.5 – Моделювання дифузії окремої молекули методом Монте-Карло в термінах MathCAD

3.2.2 Алгоритм моделі хлоридизації

Для визначення глибини проникнення частки дифузанта (іона Cl^-) для кожного випробування використовується формула Ейнштейна [6]:

$$x_{Cl} = \sqrt{\frac{2kTB\tau}{N_0}}, \quad (3.22)$$

де x_{Cl} – глибина проникнення дифузанта;

k – стала Больцмана (1,3806488 Дж/К);

T – температура (К);

τ – строк служби елемента (с);

B – рухливість рідини (1/Дж·с);

N_0 – число Авогадро ($6,02214078(18) \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Рухливість характеризується як самим дифузантом, так і середовищем, де відбувається процес дифузії. В нашому випадку для визначення рухливості застосовується рівняння Стокса:

$$B = \frac{1}{6\pi\eta r}, \quad (3.23)$$

де η – в'язкість рідини (Па/с);

r – іонний радіус (для іонів $Cl^- = 181 \cdot 10^{-12}$ м).

В'язкість рідини залежить від температури і визначається з:

$$D_{ef} = \frac{kTB}{N_0} = \frac{kT}{6\pi\eta r N_0}, \quad (3.24)$$

звідки

$$\eta = \frac{kT}{6\pi D_{ef} r N_0}, \quad (3.25)$$

де D_{ef} – ефективний коефіцієнт дифузії (м²/с), визначається згідно [94]:

$$D_{ef} = K_{ef} D_0, \quad (3.26)$$

де K_{ef} – коефіцієнт ефективності, що враховує вплив часу і вологості;

D_0 – початковий коефіцієнт дифузії [100]:

$$D_0 = 10^{(-12,06+2,4B/C)} M^2 / c, \quad (3.27)$$

де В/Ц – водо-цементне співвідношення.

$$K_{ef} = \tau^{-m} \left[1 + \frac{(1-W)^4}{(1-W_c)^4} \right]^{-1}, \quad (3.28)$$

де m – фактор впливу часу;

W – вологість повітря (%);

W_c – критична вологість повітря (75%).

Випадкові змінні температура T та вологість повітря оточуючого середовища W , розігруються для кожного випробування за обраним тут нормальним законом розподілу.

Алгоритм складається, подібно до алгоритму карбонізації, з наступних кроків. На рис. 3.6 показано графічне зображення алгоритму, а на рис 3.7-3.8 його реалізація в термінах MathCAD.

А. Обирається ділянка зразка, його геометричні параметри, фізико – механічні властивості

Б. Задається концентрація карбону на виході в зразок і на вході

В. Робиться розіграш проходження кожною часткою шляху до моменту отримання шуканої концентрації на виході

Г. Підраховується кількість циклів розіграшів

Д. Обчислюється дійсний час проходження одного циклу в секундах

Є. Обчислюється загальний час перебігу експерименту

3.3 Перевірка адекватності моделі

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 5мм, через значне навантаження на процесор. Що дало

підставу вважати, що подібний підхід може бути ефективним для так званої мембранної корозії.



Рисунок 3.6 – Логічна схема моделі хлоридизації

```

ProgSkachki :=
  NatomX ← 0
  Cx ← 0
  mesto ← 0
  atom ← 0
  step ← 0
  while Cx < C2
    mesto ← Round (rnd (Nmest - 1), 1)
    if M1P1mesto,0,P1mesto,1 > 0
      atom ← Round (rnd (1), 1)
      if atom = 1
        M1Pmesto,0,Pmesto,1 ← M1Pmesto,0,Pmesto,1 + 1
        NatomX ← NatomX + 1 if M1Pmesto,0,Pmesto,1 = x
      step ← step + 1
    Cx ←  $\frac{\text{NatomX}}{\text{Nmest}}$ 
  (
    M1
    P1
    Cx
    mesto
    atom
    NatomX
    step
  )
  
```

Рисунок 3.7 – Алгоритм хлоридизації в термінах MathCAD

Схему хлоридизації показано на рис 3.7.

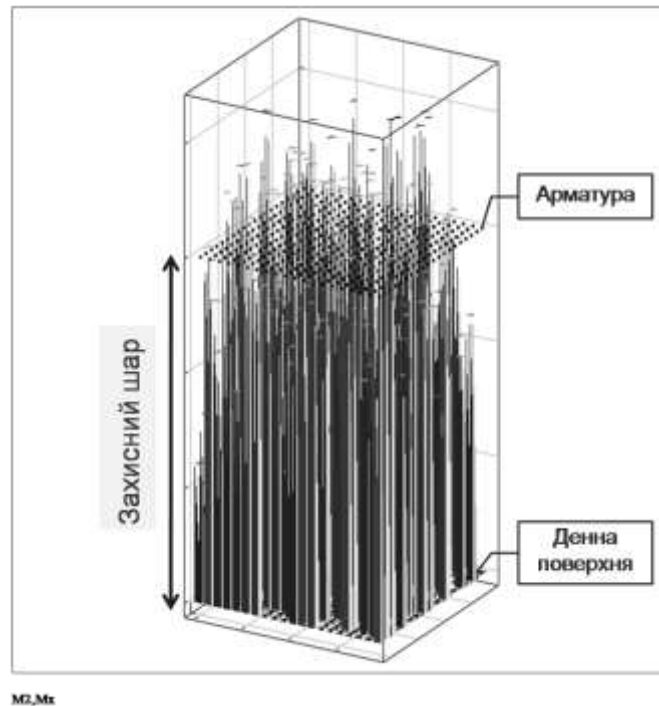


Рисунок 3.8 – Схема хлоридизації

Рівняння, яке дозволяє встановити приблизний час t , необхідний для проникнення агресивних речовин до поверхні металу [6]:

$$t = \frac{x^2}{4 \cdot D} \cdot \quad (3.29)$$

З виразу (3.29) витікає, що довговічність конструкції визначається товщиною захисного шару x і ефективним коефіцієнтом дифузії D агресивних компонентів в шарі.

Інша залежність приводиться в роботі [100]:

$$t = \frac{x^2 m_0}{2DC} \cdot \quad (3.30)$$

де m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні.

В документі [173] надається Інша форма представлення властивостей бетону в моделі карбонізації:

$$t = \sqrt[n+0.5]{\frac{x}{\left(\frac{2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot D \cdot C}{a}\right)^{0.5} \cdot t_0^n}} \cdot \quad (3.31)$$

де x – товщина захисного шару;

k_1 – параметр середнього вмісту вологи в бетоні;

k_2 – параметр умов експлуатації;

k_3 – коефіцієнт водо цементного відношення;

a – граничне значення вмісту CO_2 в карбонізованому бетоні;

t_0 – час експлуатації;

n – параметр кліматичних умов експлуатації.

Аналітичний розв’язок рівняння (1.15) встановлює зв'язок глибини проникнення хлоридів з часом [142]:

$$t = \frac{1}{D} \left[\frac{x}{\left(2 \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C - C_I}{C_S - C_I} \right) \right)} \right]^2, \quad (3.32)$$

де $\operatorname{erfc}()$ – додаткова функція помилок.

В роботі [189] пропонується така математична модель проникнення хлоридів, яка залежить від водо цементного співвідношення:

$$t = \frac{129 \cdot (x)^{1.22}}{W_{CR} \cdot (C_{cl})^{0.42}}, \quad (3.33)$$

де, W_{CR} – водо цементне співвідношення;

C_{cl} – концентрація хлоридів;

x – товщина захисного шару.

В роботі [12] Васильєв А.І. пропонує іншу модель проникнення:

$$t = \sqrt[a]{x}, \quad (3.34)$$

де a – коефіцієнт, який враховує властивості бетону.

В таблиці 1 представлені результати обчислень часу деградації захисного шару залізобетонного елемента. Для прикладу взято захисний шар товщиною 3мм, з коефіцієнтом дифузії для визначення часу карбонізації $D_c = 0,9 \cdot 10^{-5}$ мм²/рік, концентрацією вуглекислого газу на поверхні $C_c = 0,03\%$. Для визначення часу насичення захисного шару хлоридами коефіцієнт дифузії $D_{cl} = 5 \cdot 10^{-12}$ мм²/рік, поверхнева концентрація хлоридів $C_{cl} = 0,15\%$.

Таблиця 3.1 – Результати обчислень часу деградації захисного шару залізобетонного елемента

Модель визначення глибини проникнення дифузанта згідно формули №:	Час, Т, деградації захисного шару, років
(3.29)	2,5
(3.30)	2,3
(3.31)	3,1
Запропонована модель карбонізації	3,0
(3.32)	2,7
(3.33)	3,8
(3.34)	2,0
Запропонована модель насичення хлоридами	4,1

3.4 Висновки до розділу 3

1. Запропоновані в цьому розділі моделі та алгоритми оцінки довговічності захисного шару залізобетонних елементів за методом Монте-Карло є найбільш фізично обґрунтованими, розв'язком високої точності диференціальних рівнянь класичної теорії дифузії та моделювання процесів деградації захисного шару залізобетонних елементів.

2. Реалізація моделей наведених в цьому розділі потребують значних затрат комп'ютерного часу на обчислення, що займає десятки годин. Ці обставини не дозволяють запропоновані моделі застосовувати в інженерних розрахунках. В той же час моделі можуть бути дієвим науковим інструментом.

3. Вищевикладене було спонукальним мотивом до розробки моделей, оснований на статистичного моделюванні просування фронту та рівнянь рівноваги, що є предметом дослідження в наступному розділі.

4. Виконане тестування алгоритму прогнозу довговічності захисного шару залізобетонних елементів за методом Монте-Карло доводить його адекватність.

РОЗДІЛ 4

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗГИНАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

4.1 Теоретична база моделі

4.1.1 Мета

Виконаний аналіз публікацій дає підставу вважати, що найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону, є фізичний підхід. Дійсно, в цьому випадку вихідними даними моделі є фізико-механічні характеристики бетону та арматури, параметри агресивності оточуючого середовища [133].

Цей підхід в теорії деградації залізобетонних елементів швидко розвивається, але в більшості випадків носить інтуїтивний характер. Аналіз детерміністичної моделі прогнозування довговічності захисного шару елементів мостів, наведений в розділі 2, заснованої на найбільш прогресивних, прийнятих сучасними дослідниками підходах, показав значну гнучкість і можливість використання в реальних розрахунках, проте не дає універсальної практичної методики вирішення задачі в усьому спектрі параметрів, але для прогнозу ресурсу залізобетонних елементів мостів як на етапі проектування, так і на стадії експлуатації в першому наближенні дає прийнятний результат.

Сформульована детерміністична модель, представлена в розділі 2 побудована на фізичному підході, де науковим підґрунтям моделі деградації захисного шару є закони дифузії Адольфа Фіка [142,189], містить в собі також модель деградації арматури. Сьогодні для цього є солідний науковий базис. Процес деградації арматурної сталі достатньо вивчений. Моделі корозійного зносу сталі Liddart A. [163], Нікітіна В.І.[75], Овчинникова І.Г.[76], Расулова І.Р.[92], Зеленцова Д.Г. [39] у вітчизняній науці є загальноприйнятими, перевіреними і дають реалістичні результати в розрахунках.

Детерміністична модель, представлена в розділі 2 побудована на фізичному підході, демонструє суттєві відхилення за певних умов від тренду експериментальних даних, тому беручі до уваги досвід моделей, що базуються на фундаментальних принципах статистичного аналізу (метод Монте-Карло) DuraCrete [147], Life-365 [164], 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 була сформована мета цього розділу: розробка моделі 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.

4.1.2 Модель прогнозування

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:

$$p_{x \geq h} = \frac{N_{x \geq h}}{N}, \quad (4.1)$$

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).

Вираз для отримання часу хлоридизації для кожного розіграшу:

$$t_{Cl,i} = \frac{1}{D_{CL,i}} \left[\frac{x_i}{2 \cdot \operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{C_{CR,i} - C_1}{C_{S,i} - C_1} \right)} \right]^2, \quad (4.2)$$

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_C – коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні;

$erfc()$ – додаткова функція помилок.

Коефіцієнт дифузії хлорид-іонів в бетоні [37]:

$$D_{CL,i} = 10^{(-12,06 + 2,4B/C)} \cdot \left[1 + \frac{(1 + H_i)^4}{(1 - H_{Cr})^4} \right]^{-1} \cdot e^{q_i \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K_{1,i}} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma_i}{f} \right) \right]^2, \quad (4.3)$$

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.

Вираз для визначення глибини деградації бетону при кожному розіграші:

$$x_{CL,i} = 2 \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR} - C_0}{C_S - C_0} \right) \sqrt{D_0 K_{\text{еф}} t}, \quad (4.4)$$

В документі [100] час повної карбонізації захисного шару рекомендується визначати за формулою:

$$t_{C,i} = \frac{x_i^2 \cdot m_{0,i}}{2 \cdot D_{e,i} \cdot C_i}, \quad (4.5)$$

де x – товщина захисного шару;

m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні;

D_e ефективний коефіцієнт дифузії (таб.2.1 згідно СНиП 2.03.11-85 [109]);

C – концентрація діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону (від 0,02% до 0,04%).

Вираз для визначення глибини деградації бетону при кожному розіграші:

$$x_{C,i} = \sqrt{2 \frac{t_{C,i} \cdot D_{e,i} \cdot C_i}{m_{0,i}}}. \quad (4.6)$$

Глибина корозії арматури за обраний проміжок:

$$\delta_i = v_0 \exp\left(\frac{V\sigma}{RT}\right) \Delta\tau, \quad (4.7)$$

Таким чином, провівши певну кількість розіграшів, отримаємо значення функції граничного стану за кожний проміжок часу:

$$g_i = R(x_i, \delta_i, \Delta\tau) - S_i, \quad (4.8)$$

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:

$$T = \sum \Delta\tau_{g>0}. \quad (4.9)$$

4.2 Параметрична база моделі

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.

Постулюється, що випадкові величини визначаються розіграшем на початку кожної ітерації, тоді як стохастичні процеси – змінними, залежними від часу (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Розподіл факторів на випадкові величини та стохастичні процеси

4.3 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, К; W_c – водоцементне співвідношення; σ – напруження в бетоні на рівні арматури, МПа; R_{btser} – тимчасовий опір бетону розтягу, МПа; A_c – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні (-0,0236 при стисканні, +0,0496 при розтязі); 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; $\Delta h_{\text{ряд}}$ – відстань між рядами армування, м; V_{corC} – швидкість корозії в карбонізованому бетоні, мм/рік; V_{corCL} – швидкість корозії в бетоні, насиченому хлоридами, мм/рік; M_{Pn} – характеристичний згинальний момент від тандему АК; M_{vn} – характеристичний згинальний момент від смугового навантаження АК; M_{Hn} – характеристичний згинальний момент від натовпу на тротуарах; M_{Hn} – 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).

1. 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.

2. Визначення зміщення фронту карбонізації $X_{C,i}$ та хлоридизації $X_{Cl,i}$

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

4. 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 1-3 повторюються, поки $M_{ui} \geq M_i$. Записується кількість кроків i – кількість місяців до вичерпання ресурсу.

Кроки 1-4 повторюються N_{cicle} разів. Будуються гістограми результатів.

4.4 Аналіз моделі

Для аналізу моделі обрано декілька типів залізобетонних елементів прогонових будов автодорожніх мостів різних періодів виробництва, як попередньо напружених так і армованих каркасною арматурою.

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. 4.2.

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В40. Робоча арматура балок – попередньо напружена з дроту діаметром 5 мм зі сталі класу В-ІІ. 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-ІІІ 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.

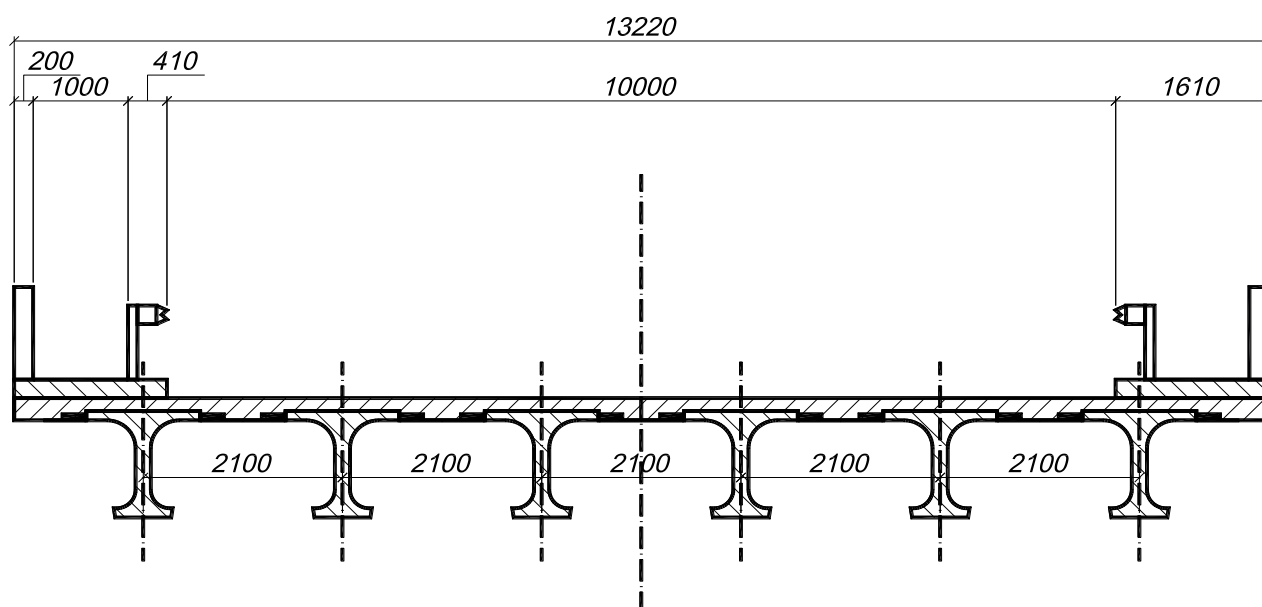


Рисунок 4.2 – Поперечний переріз мосту

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

Прогноз довговічності головної балки. (приклад 1)

Робоча арматура являє собою 11 арматурних пучків загальною площею $51,81 \text{ см}^2$ та розміщуємо їх в поперечному перерізі балки (площа одного пучка $24 \cdot 5 \cdot f = 4,71 \text{ см}^2$). Відстань від низу балки до центру ваги розтягнутої арматури (рис 4.3).

Інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження від натовпу на 1 м^2 тротуару $p_T = 1,96 \text{ кПа}$; навантаження АК від автотранспортних засобів на кожному смугу навантаження приймається у вигляді рівномірно розподіленого з інтенсивністю: $v = 0,98 \cdot K \text{ кН/м}$ та тандему з навантаженням на вісь $P = 9,81 \cdot K \text{ кН}$, де $K = 15$ – клас навантаження.

Одиночне навантаження НК являє собою чотиривісний екіпаж. Прийнято навантаження НК-100 з навантаженням на вісь $P_{HK} = 245 \text{ кН}$.

Таблиця 4.1 – Характеристичні дані

Вид зусилля	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), $\text{кН}\cdot\text{м}$	1426	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), $\text{кН}\cdot\text{м}$	581	0,170
Навантаження від тандему, $\text{кН}\cdot\text{м}$	978	0,170
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК, $\text{кН}\cdot\text{м}$	529	0,240
Рівномірно-розповсюджене навантаження від натовпу, $\text{кН}\cdot\text{м}$	76	0,140
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	20	0,111
Пружно-пластичний момент опору W , м^3	0,159	0,023
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,0%	0,200
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,6%	0,200
Кількість випробувань N	10000	-

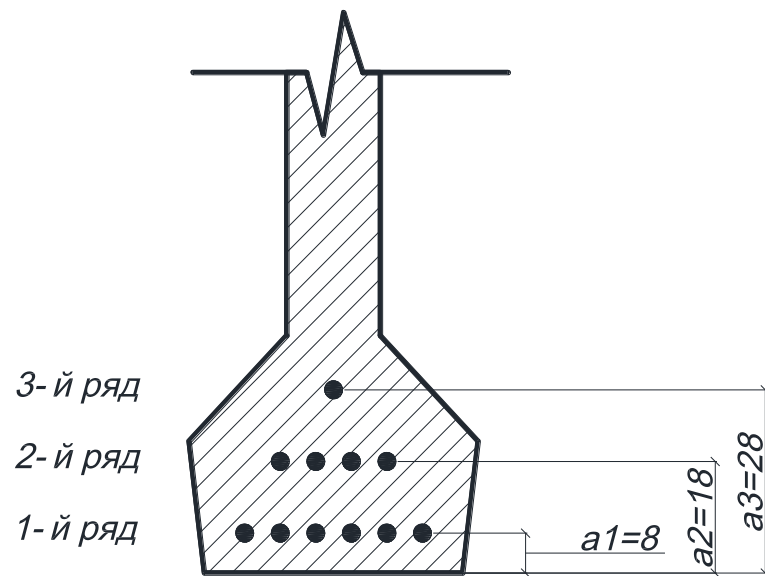


Рисунок 4.3 – Розташування арматури

Результати обчислень наведені на рис. 4.4-4.6 За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.4, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=46,025$ років, $\sigma=3,1$).

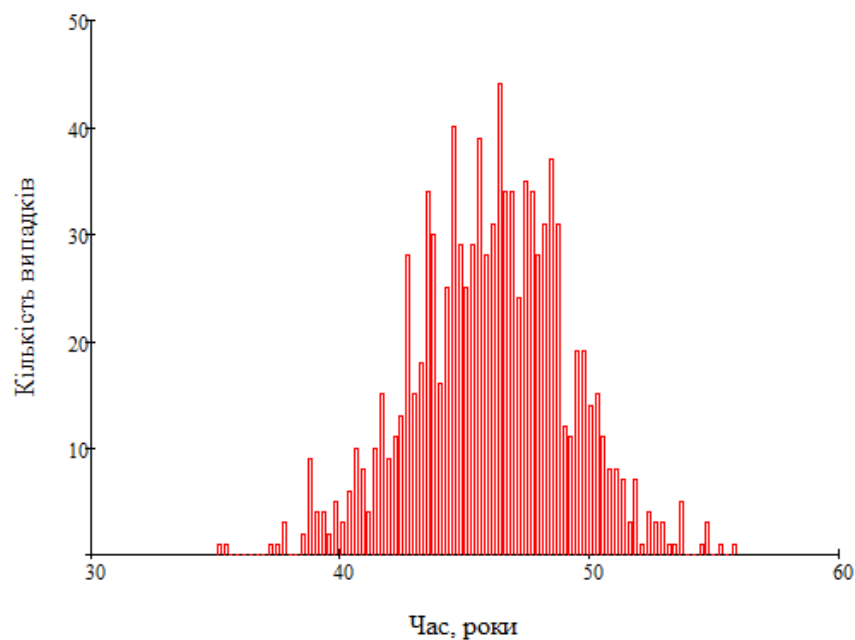


Рисунок 4.4 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.5 ($\mu=16,29$ років, $\sigma=2,6$). Модель передбачає оцінку ресурсу не тільки карбонізації захисного шару як такого, але усього бетону, що контактує з арматурою. Таким чином прогнозується що карбонізація проходить від зовнішньої поверхні елемента вглиб перерізу, поступово активуючи корозійні процеси в арматурі, розташованій на різній відстані від денної поверхні.

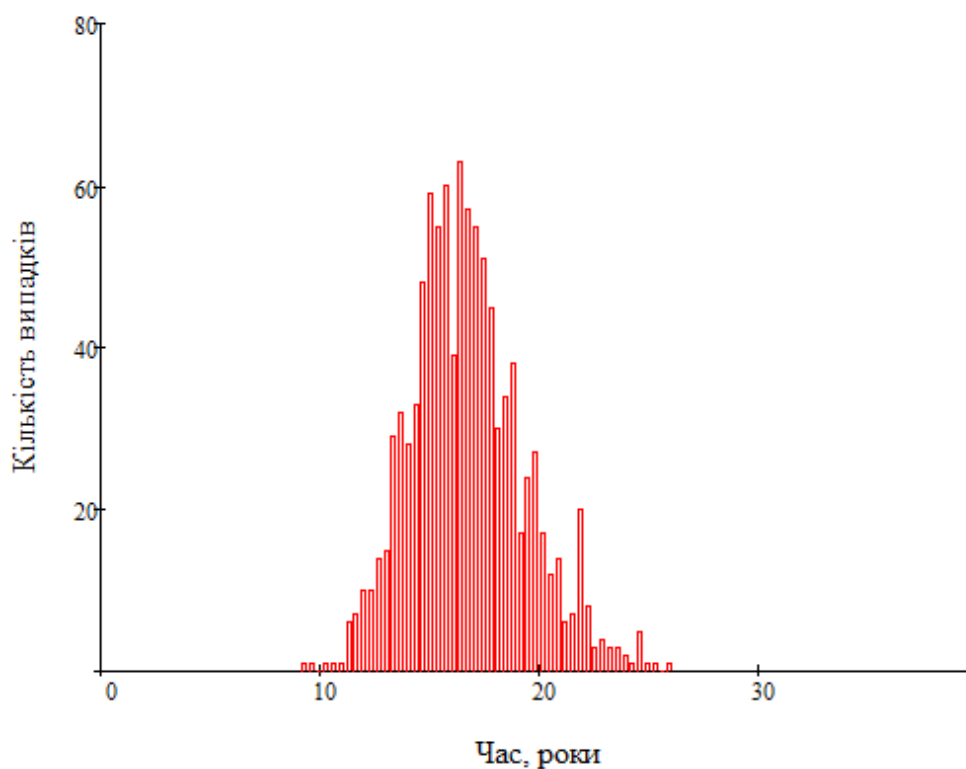


Рисунок 4.5 – Прогноз карбонізації захисного шару на поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.6, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=68,8$ років, $\sigma=2,6$).

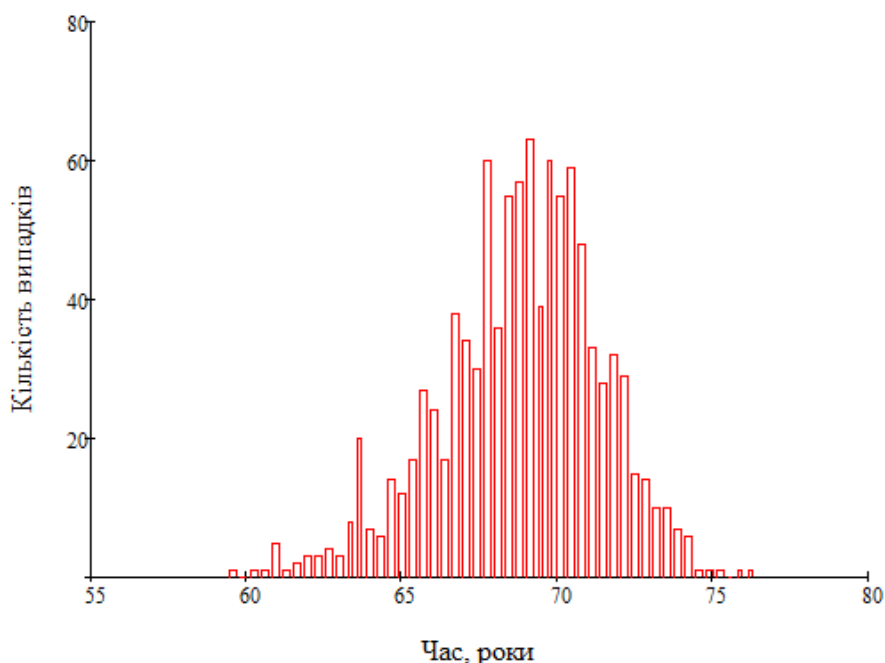


Рисунок 4.6 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Необхідно зауважити, що достатня висока швидкість деградації арматури викликана малим діаметром дротів, що в свою чергу збільшує площу поверхні металу з бетоном насиченим хлоридами.

Щоби перевірити, як впливає кількість випробувань на результат, кількість випробувань змінювалась, результати наведені в табл. 4.2:

Таблиця 4.2 – Вплив кількості випробувань на результат.

	Кількість випробувань, N				
	1000	5000	10000	20000	50000
μ_T , років	57,8	75,3	68,8	67,6	69,1
σ_T	2,3	3,4	2,6	2,5	2,7

Оскільки, як видно з табл. 4.2 починаючи з $N=10000$ результати обчислення коливаються дуже незначним чином, можливо припустити, що оптимальна кількість випробувань становить 10000.

Одним з важливіших чинників, що впливають на швидкість деградації захисного шару є водо-цементне співвідношення, в роботі взято В/Ц в межах від 0,25 до 0,5.

Дані наведені на табл 4.3 наочно демонструє на скільки серйозним є вплив В/Ц на довговічність залізобетону, так при зміні В/Ц з 0,25 до 0,35 довговічність падає на 13 років.

Таблиця 4.3 –Вплив В/Ц на довговічність елемента

В/Ц	μ_T , років	σ_T	Різниця, %
0,25	56,317	1,661	11,8
0,3	49,689	1,615	
0,35	43,975	1,53	10,8
0,4	39,186	1,438	
0,45	35,057	1,351	9,95
0,5	31,568	1,329	

Для дослідження впливу кліматичних умов порівнювалися результати, отримані для умов Києва з умовами Чернігова, Сімферополя, Луганська та Львова. Дані кліматичних умов взяті з [36]. Основними показниками кліматичних умов в моделі обрана середньомісячна температура повітря і відносна вологість повітря.

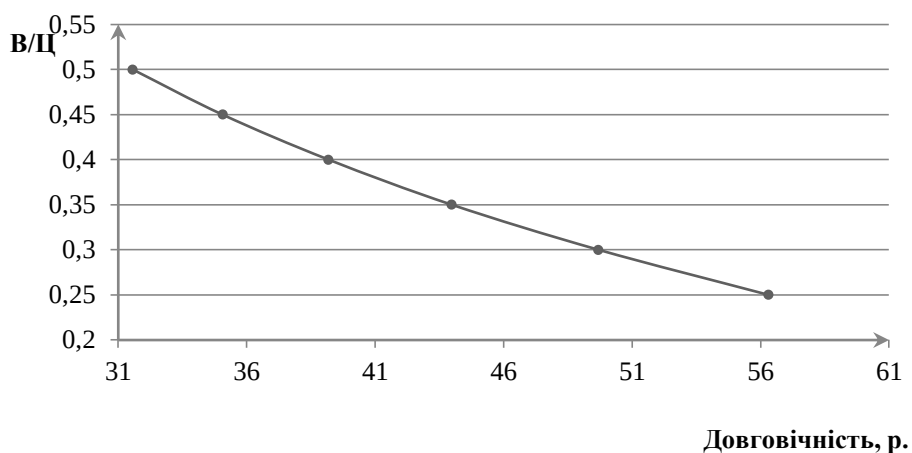


Рисунок 4.7 – Графік залежності В/Ц і довговічності

Як показує розрахунок, в залежності від регіону розташування мосту (табл. 4.4) довговічність може коливатись в межах приблизно 20%, що є істотно, якщо мати на увазі можливі передчасні затрати на ремонт. Така різниця, наприклад між умовами Чернігова і Луганська в довговічності зумовлена достатньо невеликою але вагомою різницею в показниках вологості і температури (рис. 4.8).

Таблиця 4.4 – Вплив кліматичних умов на довговічність елемента

Місто	μ_T , років	σ_T	Різниця, %
Київ	48,799	1,539	
Чернігів	45,822	1,528	-6,1
Сімферополь	49,484	1,522	+1,4
Луганськ	56,598	1,639	+16,0
Львів	44,277	1,475	-9,3

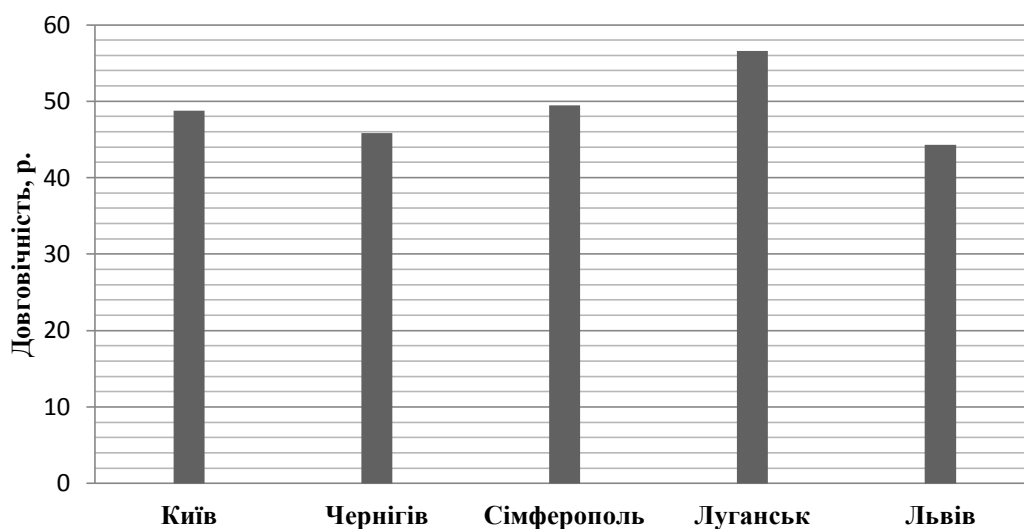


Рисунок 4.8 – Залежність кліматичних умов і довговічності

Так середня річна відносна вологість повітря в Луганську 71%, а в Чернігові 79% відповідно. В свою чергу процес проникнення хлоридів в бетон прямо залежить від кількості води в порах цементного каменю. Підвищена вологість і зумовлює таку різницю в довговічності.

Наступним кроком було визначення реакції моделі на зміну навантаження на елемент (головну балку моста). Для цього навантаження змінювалось в межах 5%, 2,5%, 1,25% (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Вплив інтенсивності навантаження на довговічність елемента

Зміна навантаження, %	μ_t , років
-5	50,435
-2,5	49,985
-1,25	49,893
0	48,799
+1,25	48,544
+2,5	48,44
+5	48,141

Цікавою виявилася нелінійна залежність зміни інтенсивності навантаження і довговічності, наприклад при зменшенні навантаження на 1,25% очікується подовження строку служби на 2,24%, тоді як при збільшенні навантаження на такий самі відсоток отримано лише 0,5% зменшення строку служби (рис. 4.9).

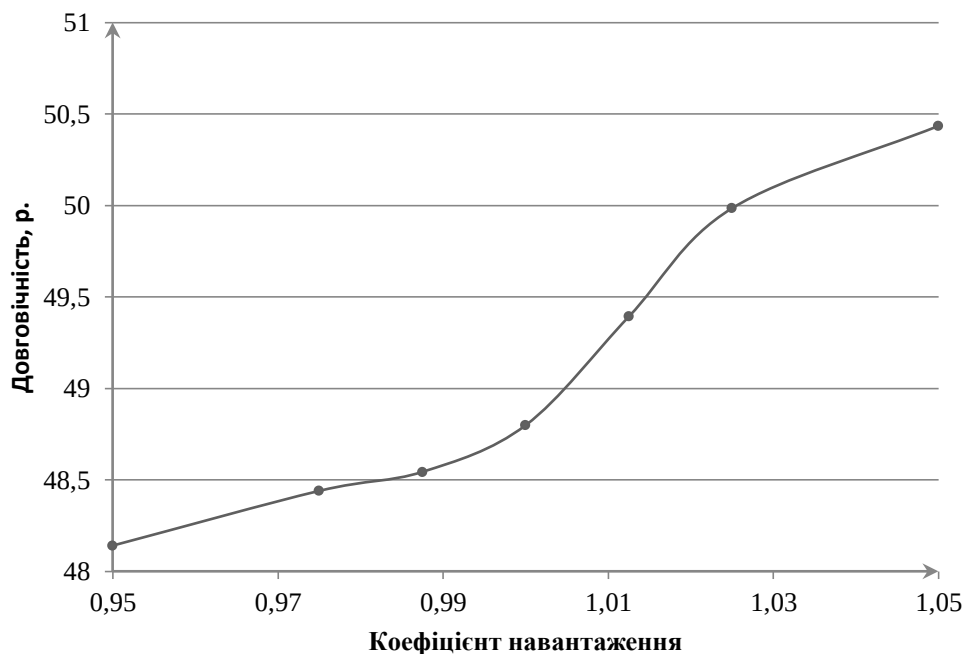


Рисунок 4.9 – Графік залежності коефіцієнта навантаження і довговічності

Прогноз довговічності плити проїзної частини. Переріз в середині прольоту плити. (приклад 1.2)

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

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.6:

Таблиця 4.6 – Характеристичні дані

Вид зусилля	Значення	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	3	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	1,16	0,17
Навантаження від танделу, кН·м	23,96	0,17
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК, кН·м	3,09	0,24
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	29	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	390	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.10, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=17,7$ років, $\sigma=1,8$).

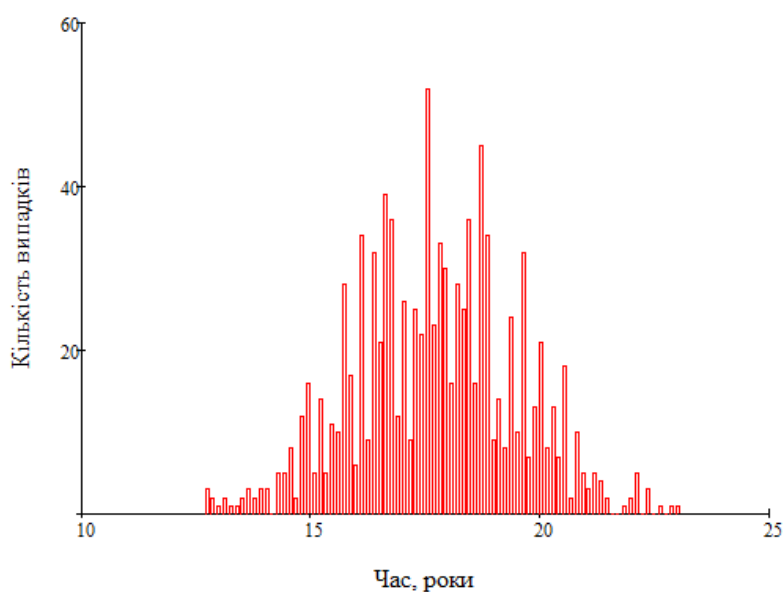


Рисунок 4.10 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.11 ($\mu=8,7$ років, $\sigma=1,0$).

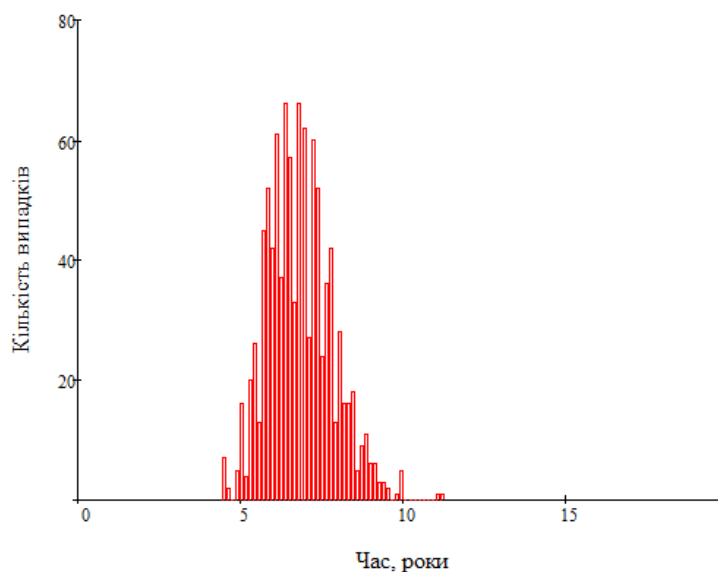


Рисунок 4.11 – Прогноз карбонізації захисного шару на поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис.4.12, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=18,5$ років, $\sigma=1,0$).

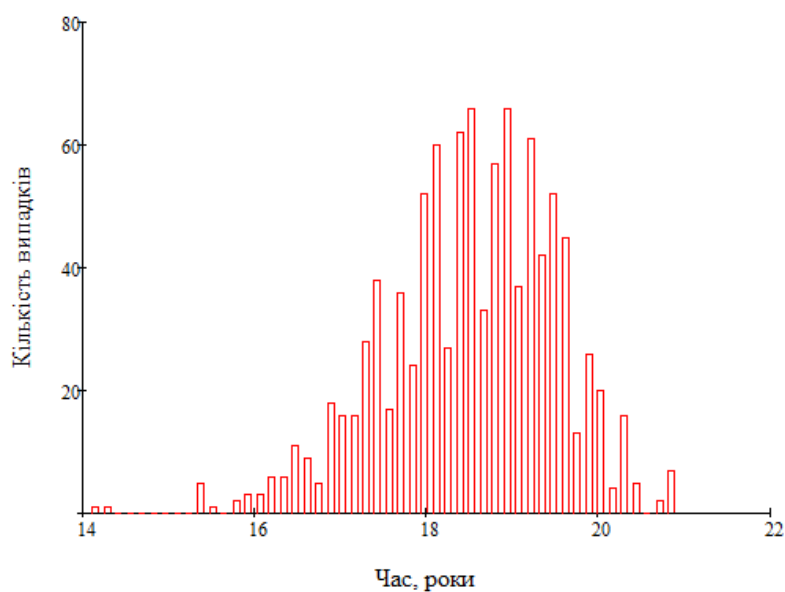


Рисунок 4.12 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 12 м (приклад 2.1):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 4 пучка 24d5 мм зі сталі класу В-II. Висота балки 0,93 м, довжина 12 м. Схему армування показано на рис. 4.13:

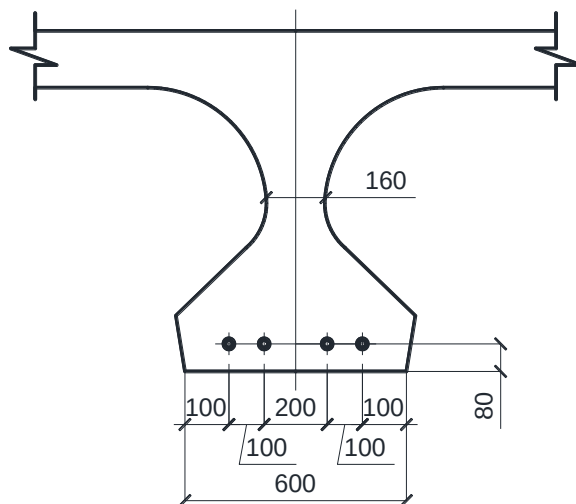


Рисунок 4.13 – Схема армування 3.503.1-81 12 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.7:

Таблиця 4.7 – Характеристичні дані

	Значення	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	276,7	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	127,9	0,17
Навантаження від НК, кН·м	671,2	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1335	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2

Кількість випробувань N	10000	-
---------------------------	-------	---

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.14, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=46,2$ років, $\sigma=3,2$).

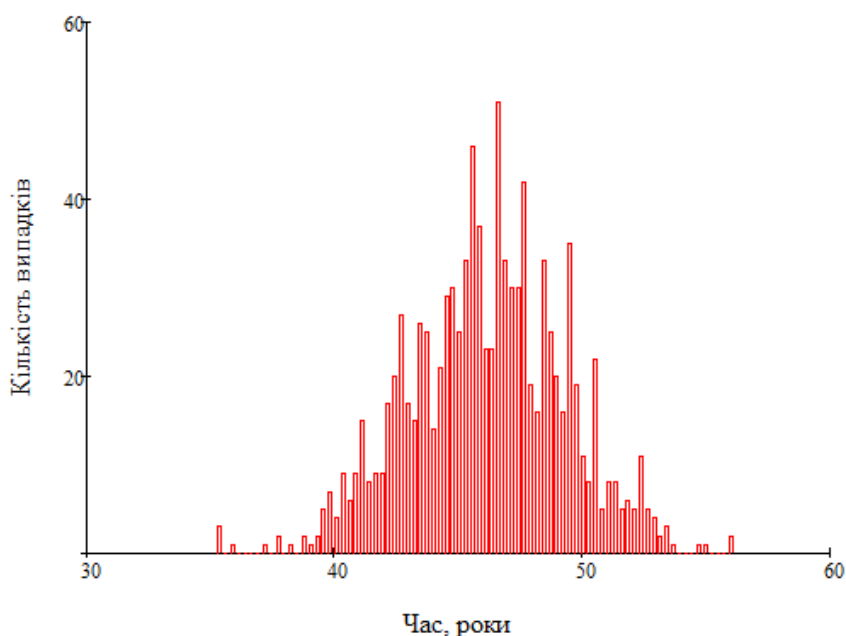


Рисунок 4.14 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.15 ($\mu=16,3$ років, $\sigma=2,6$).

Гістограма, зображена на рис. 4.16, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=37,5$ років, $\sigma=2,6$).

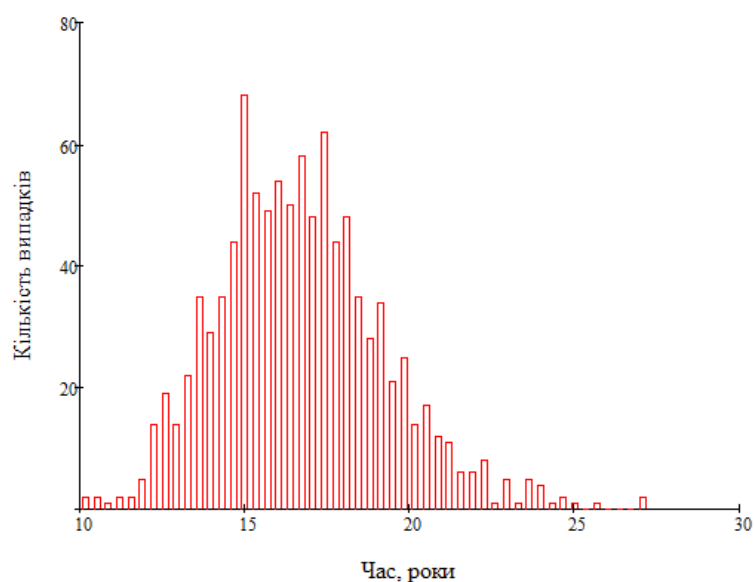


Рисунок 4.15 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

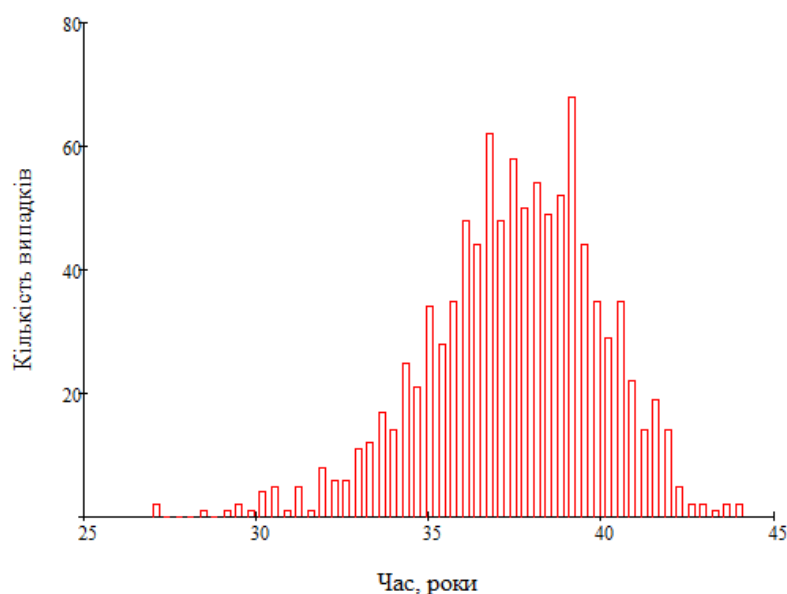


Рисунок 4.16 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 12 м (приклад 2.2):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 14 канатів К7. Висота балки 0,93 м, довжина 12 м. Схему армування показано на рис. 4.17:

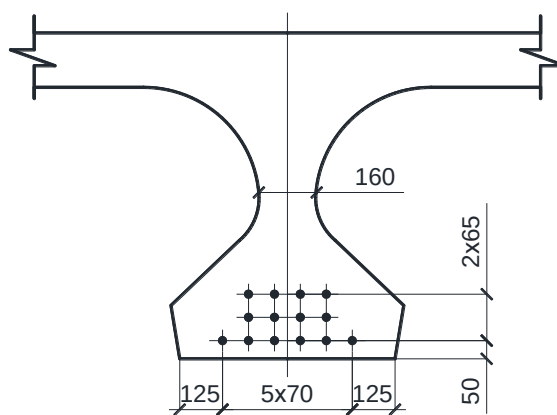


Рисунок 4.17 – Схема армування 3.503.1-81 12 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.8:

Таблиця 4.8 –Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	276,7	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	127,9	0,17
Навантаження від НК, кН·м	671,2	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1395	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис.4.18, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=26,92$ років, $\sigma=2,3$).

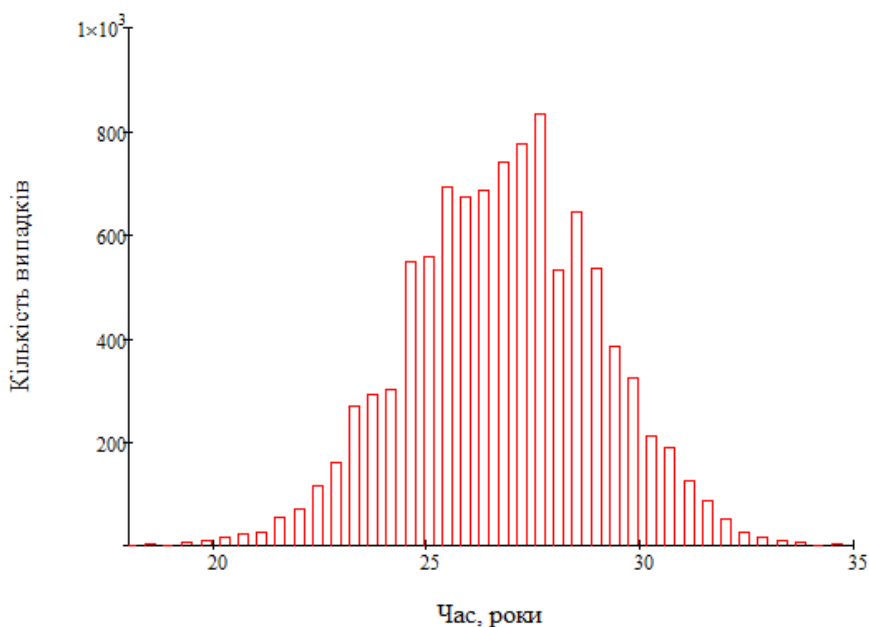


Рисунок 4.18 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.19 ($\mu=9,9$ років, $\sigma=1,5$).

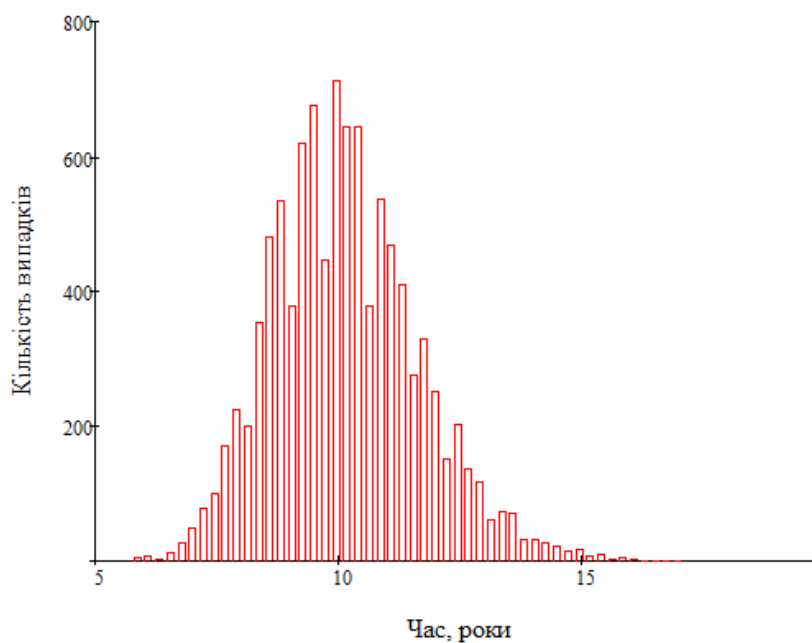


Рисунок 4.19 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.20, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=70,0$ років, $\sigma=1,5$).

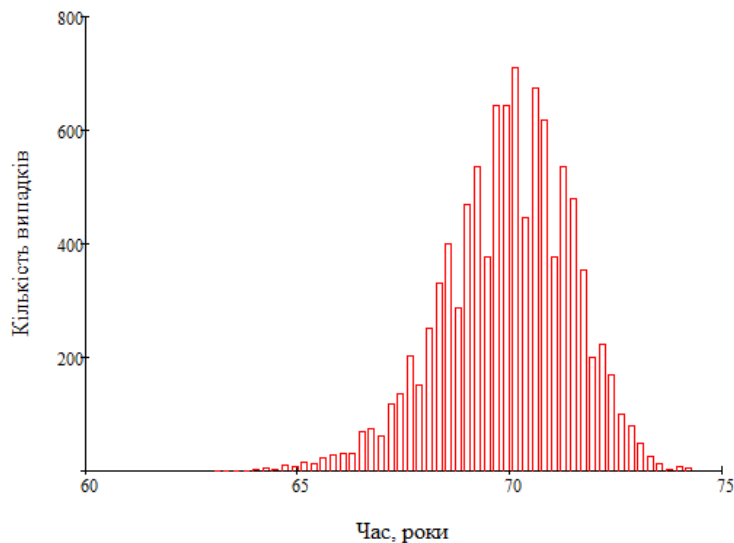


Рисунок 4.20. – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 15 м (приклад 3.1):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 6 пучків 24d5 мм зі сталі класу В-II. Висота балки 0,93 м, довжина 15 м. Схему армування показано на рис. 4.21:

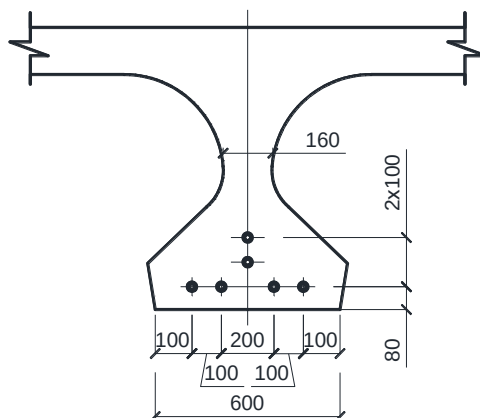


Рисунок 4.21 – Схема армування 3.503.1-81 15 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.9

Таблиця 4.9 – Характеристичні дані

	Значення	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	440,4	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	207,1	0,17
Навантаження від НК, кН·м	783,5	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1395	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.22, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=46,0$ років, $\sigma=3,1$).

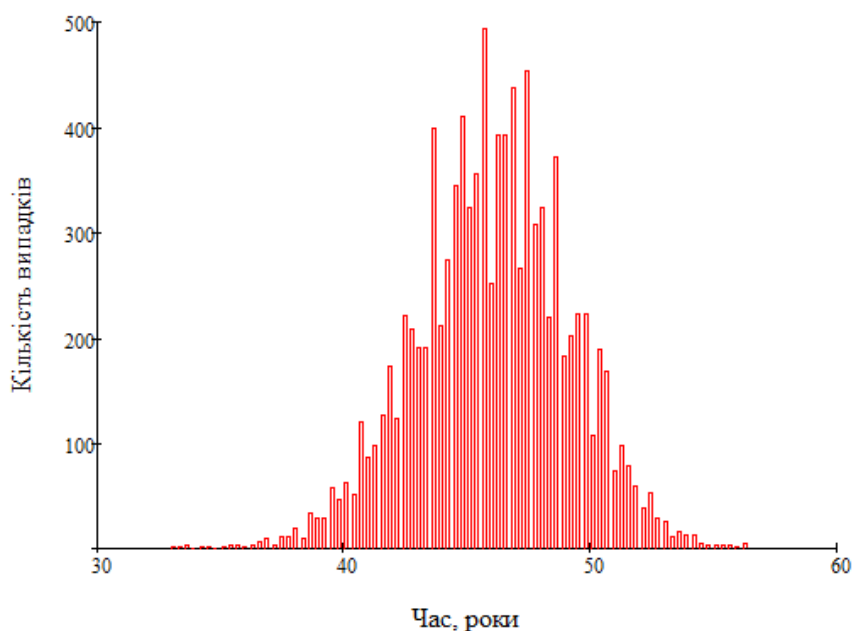


Рисунок 4.22 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.23 ($\mu=16,3$ років, $\sigma=2,5$).

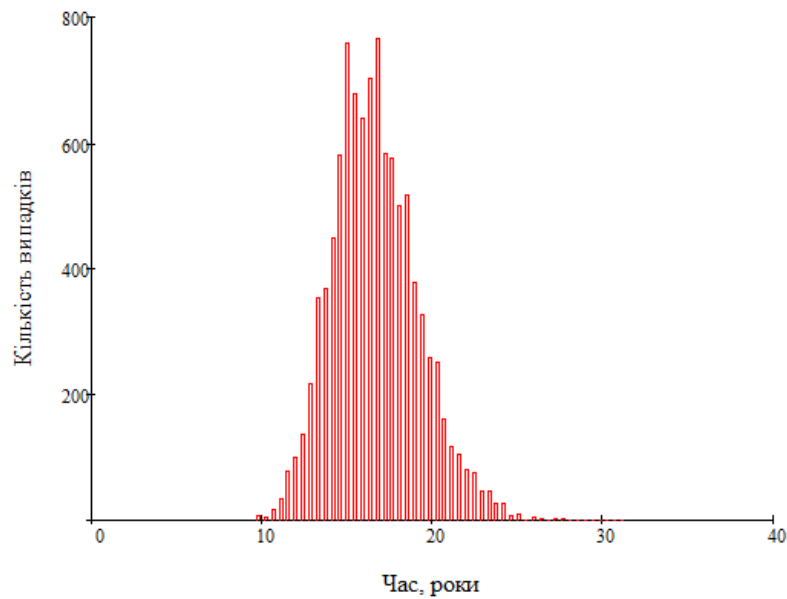


Рисунок 4.23 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.24, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=46,5$ років, $\sigma=2,5$).

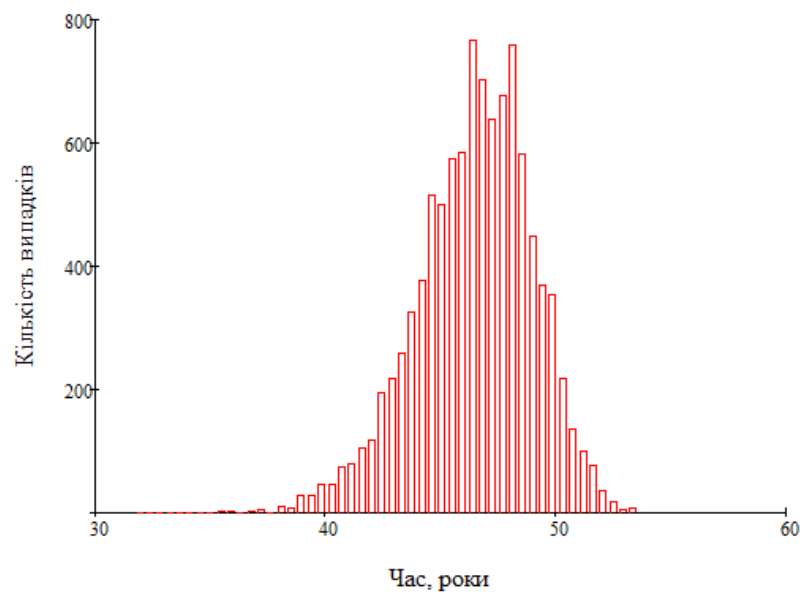


Рисунок 4.24 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 15 м (приклад 3.2)

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 18 канатів К7. Висота балки 0,93 м, довжина 15 м. Схему армування показано на рис. 4.25:

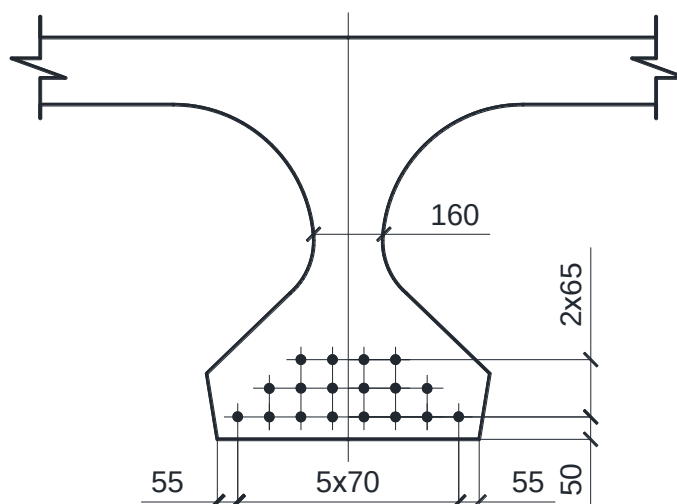


Рисунок 4.24 – Схема армування 3.503.1-81 15м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.10

Таблиця 4.10 – Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	440,4	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	207,1	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1395	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.26, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=26,8$ років, $\sigma=2,5$).

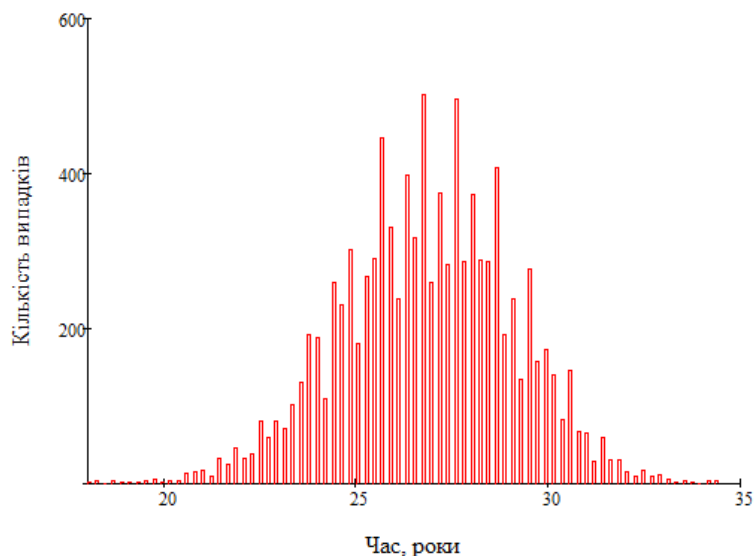


Рисунок 4.26 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис.4.27 ($\mu=9,9$ років, $\sigma=1,5$).

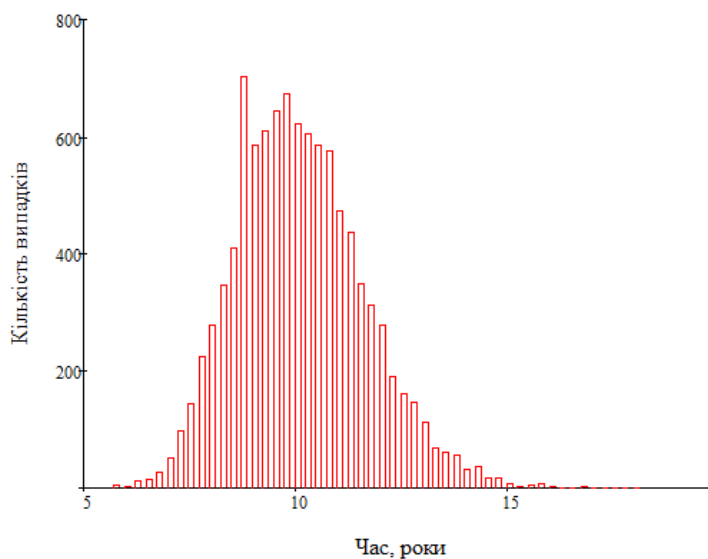


Рисунок 4.27 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.28, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=57,7$ років, $\sigma=1,5$).

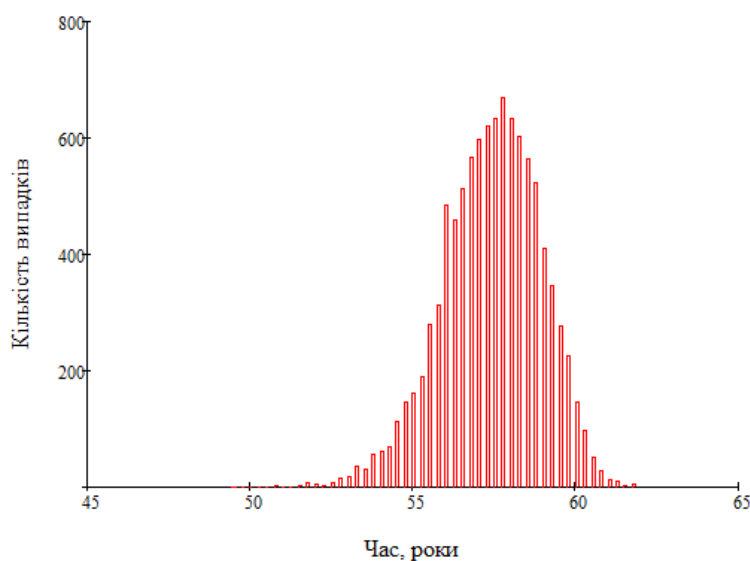


Рисунок 4.28 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 18 м (приклад 4.1):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 5 пучків 24d5 мм зі сталі класу В-II. Висота балки 1,23 м, довжина 18 м. Схему армування показано на рис. 4.29:

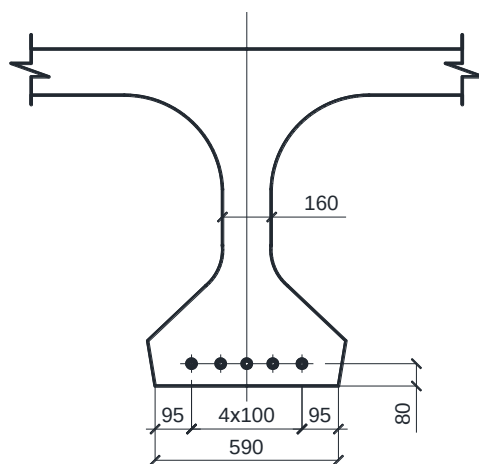


Рисунок 4.29 – Схема армування 3.503.1-81 18 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.11:

Таблиця 4.11 – Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	708,4	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	268,5	0,17
Навантаження від НК, кН·м	995	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1335	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.30, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=46,0$ років, $\sigma=3,1$).

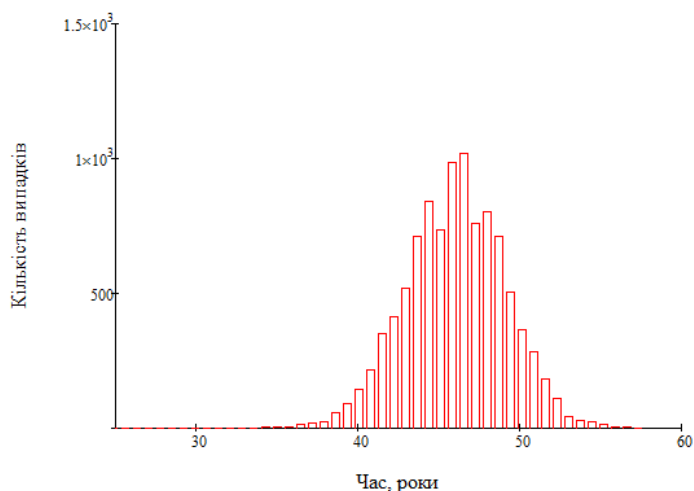


Рисунок 4.30 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис.4.31 ($\mu=16,3$ років, $\sigma=2,5$).

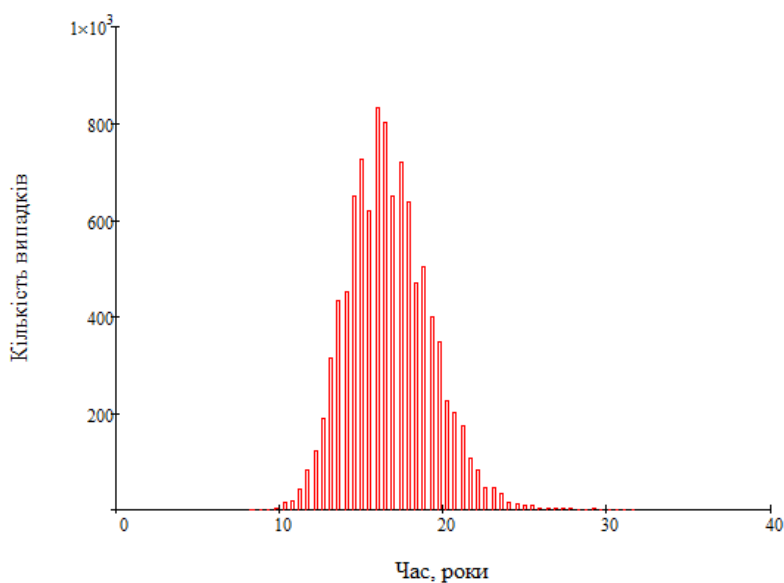


Рисунок 4.31 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис .4.32, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=36,0$ років, $\sigma=2,5$).

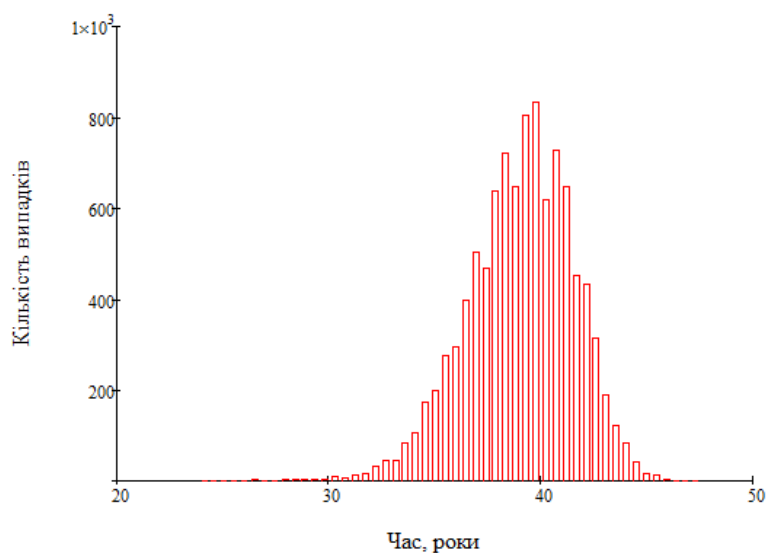


Рисунок 4.32 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 18 м (приклад 4.2):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 18 канатів К7. Висота балки 0,93 м, довжина 18 м. Схему армування показано на рис. 4.33:

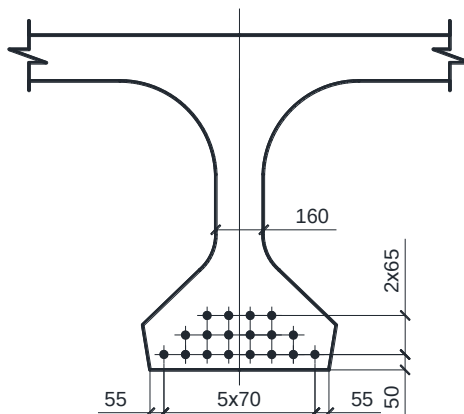


Рисунок 4.33 – Схема армування 3.503.1-81 18 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл.4.12:

Таблиця 4.12 – Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	708,4	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	268,5	0,17
Навантаження від НК, кН·м	995	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1395	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.34, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=26,8$ років, $\sigma=2,3$).

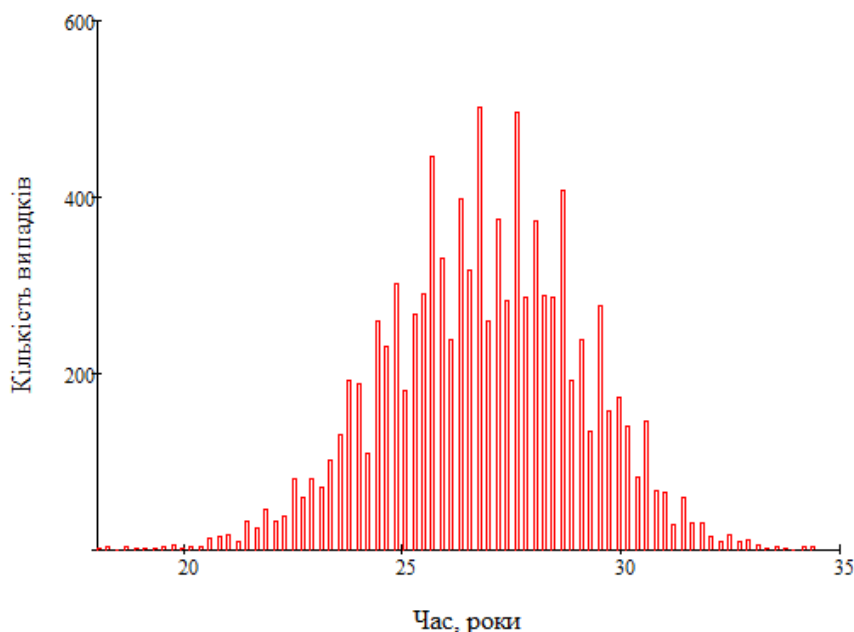


Рисунок 4.34 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.35 ($\mu=9,9$ років, $\sigma=1,5$).

Гістограма, зображена на рис. 4.36, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=57,7$ років, $\sigma=1,5$).

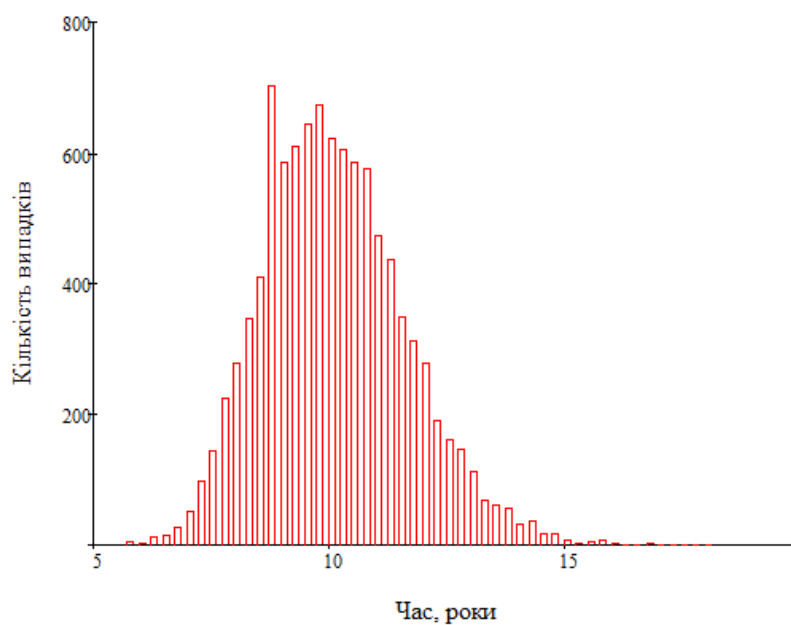


Рисунок 4.35 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

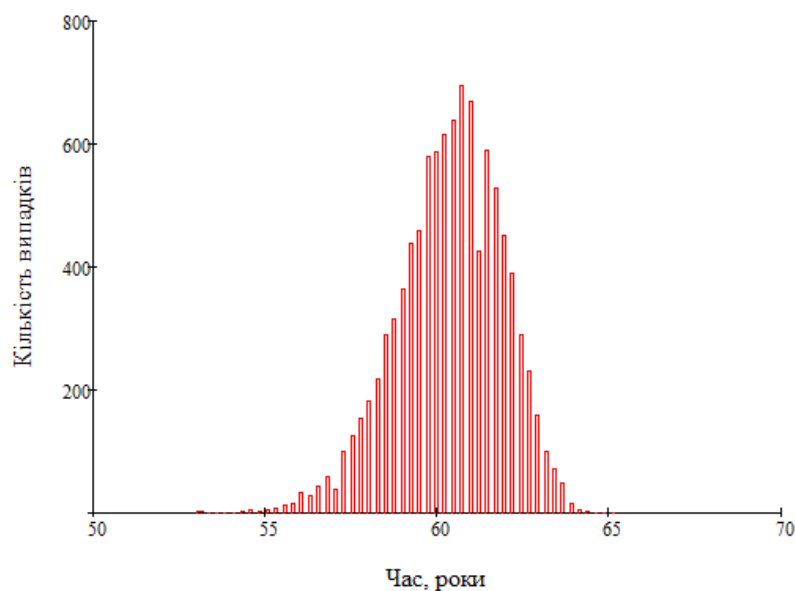


Рисунок 4.36 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 21 м (приклад 5.1):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 7 пучків 24d5 мм зі сталі

класу В-II. Висота балки 1,23 м, довжина 21 м. Схему армування показано на рис. 4.37:

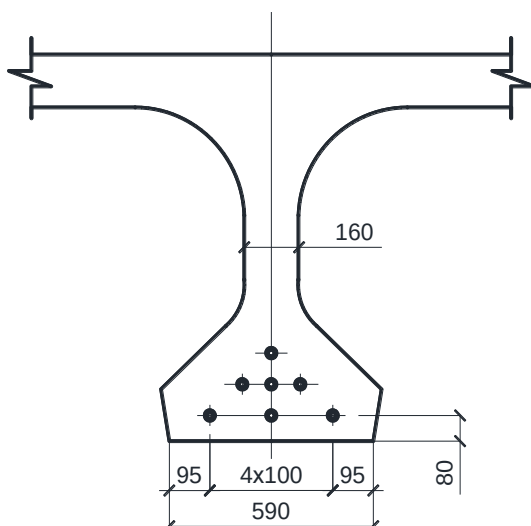


Рисунок 4.37 – Схема армування 3.503.1-81 21 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.13:

Таблиця 4.13 – Характеристичні дані

	Значення	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	963,5	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	403,1	0,17
Навантаження АК+натовп, кН·м	1208,1	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1335	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.38, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=46,0$ років, $\sigma=3,0$).

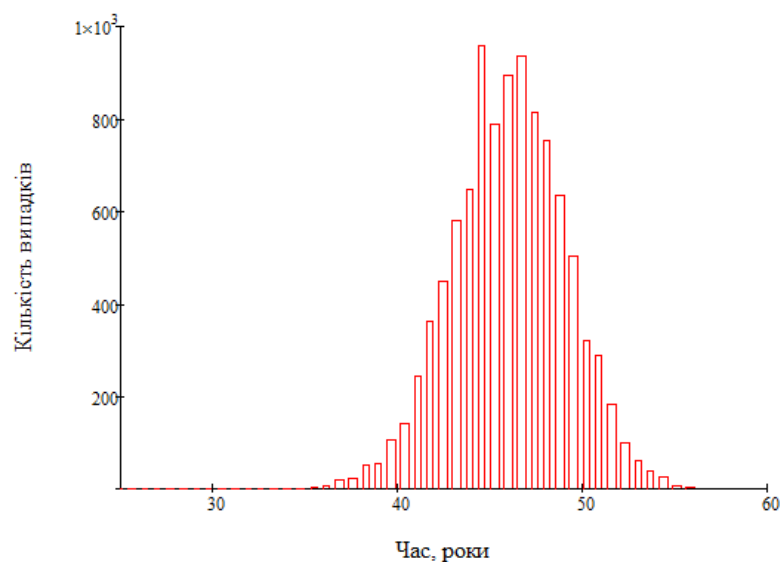


Рисунок 4.38 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.39 ($\mu=16,4$ років, $\sigma=2,5$).

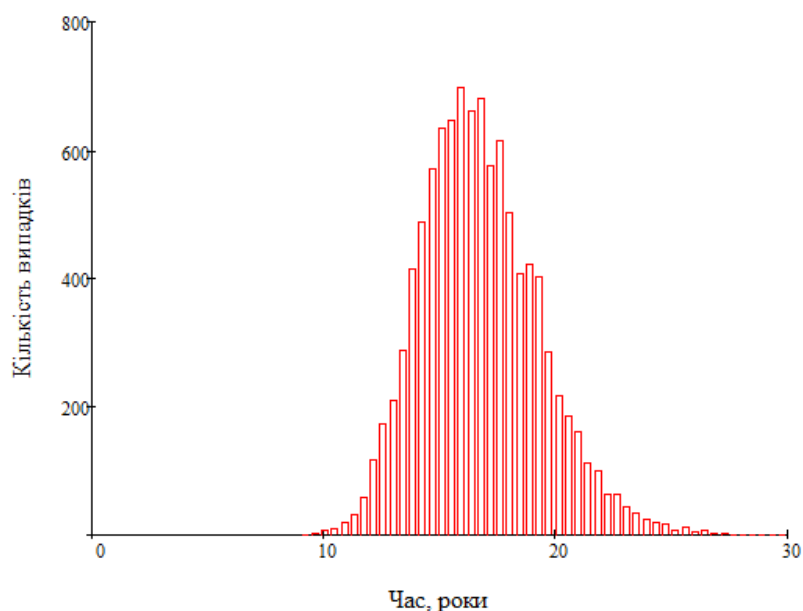


Рисунок 4.39 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.40, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=68,3$ років, $\sigma=2,5$).

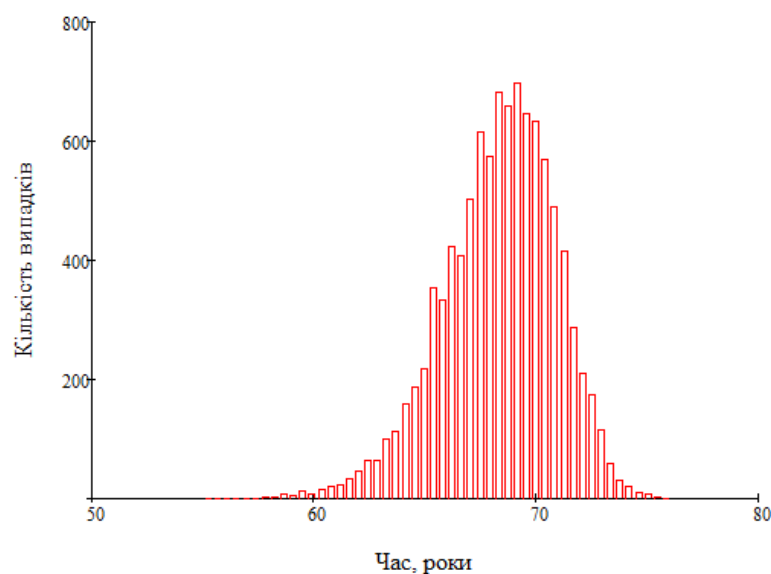


Рисунок 4.40 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 21 м (приклад 5.2):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 22 канати К7. Висота балки 0,93 м, довжина 21 м. Схему армування показано на рис. 4.41:

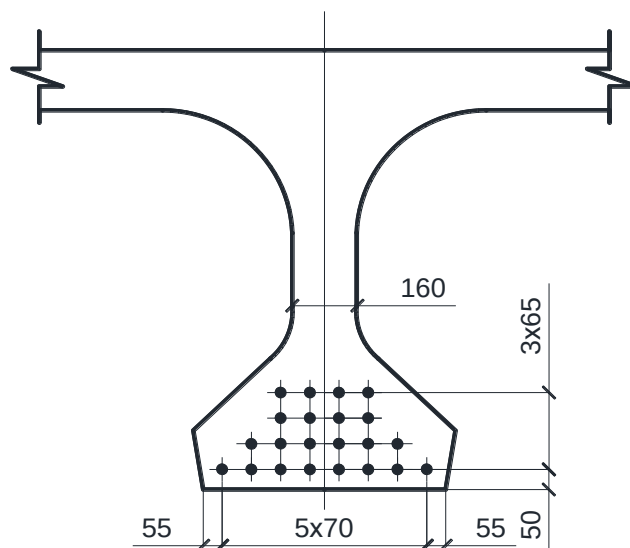


Рисунок 4.41. – Схема армування 3.503.1-81 21 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.14

Таблиця 4.14 – Характеристичні дані

	Значення	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	963,5	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	403,1	0,17
Навантаження АК+натовп, кН·м	1208,1	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1395	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.42, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=26,8$ років, $\sigma=2,3$).

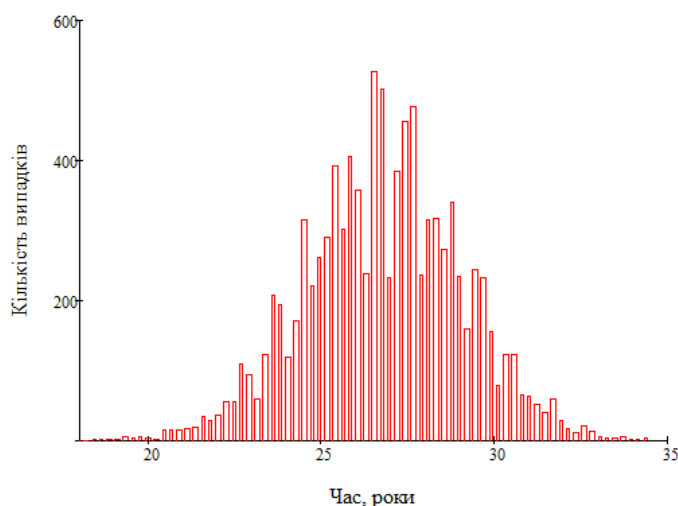


Рисунок 4.42 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис.4.43 ($\mu=9,9$ років, $\sigma=1,5$).

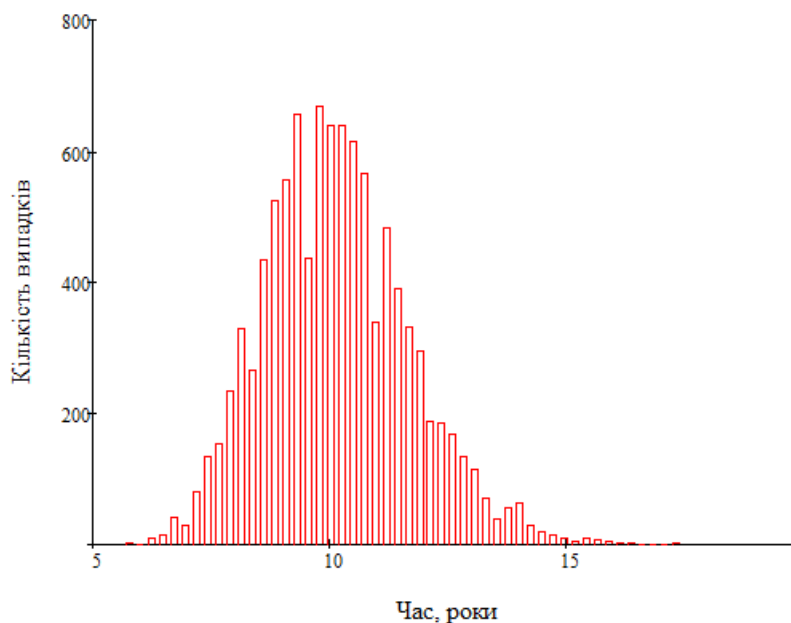


Рисунок 4.43 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис.4.44, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=83,8$ років, $\sigma=1,5$).

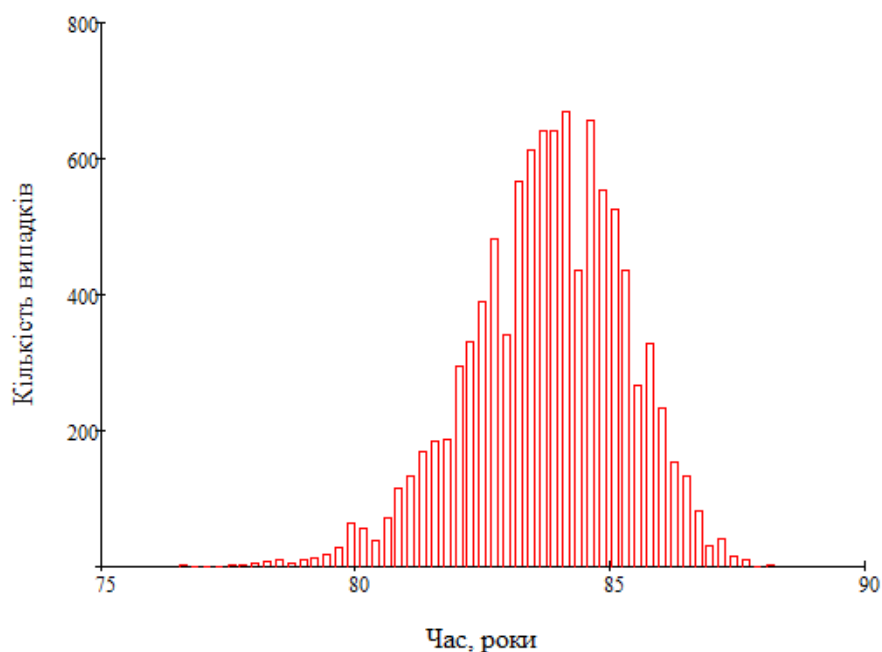


Рисунок 4.44 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 24 м (приклад 6):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 9 пучків 24d5мм зі сталі класу В-ІІ. Висота балки 1,23м, довжина 24м. Схему армування показано на рис. 4.45:

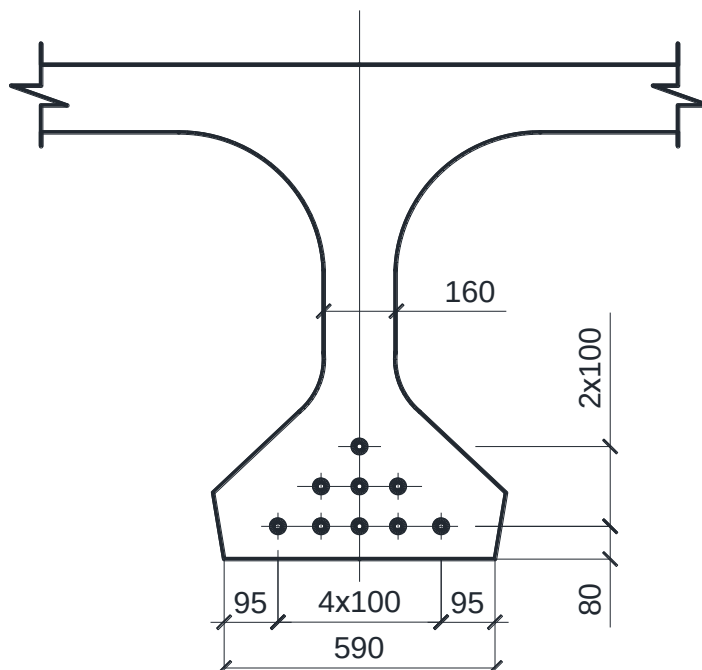


Рисунок 4.45 – Схема армування 3.503.1-81 24 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.15.

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.46., що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=46,0$ років, $\sigma=3,1$).

Таблиця 4.15 – Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	1278,5	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	530,2	0,17
Навантаження АК+натовп, кН·м	1442,2	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1335	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

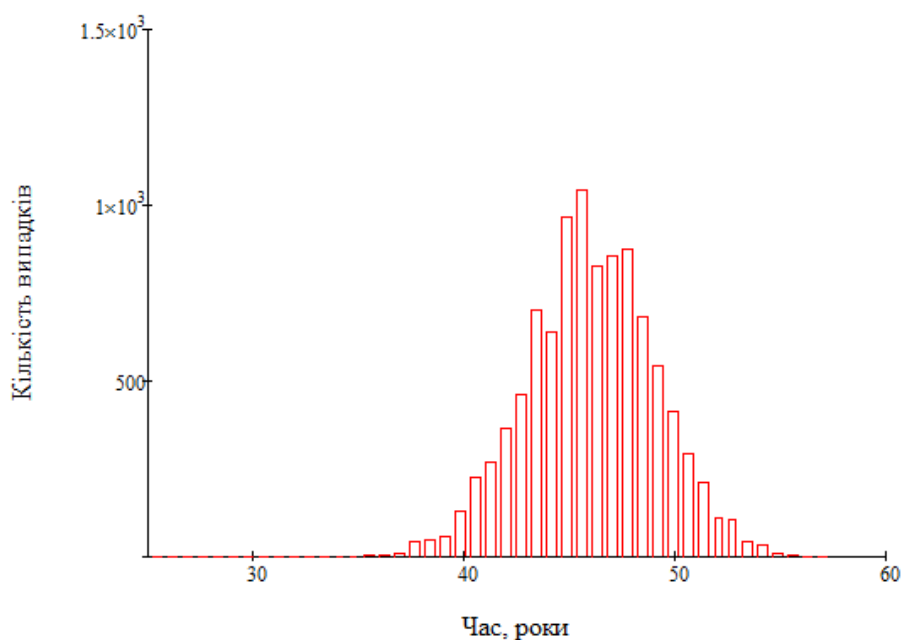


Рисунок 4.46 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.47. ($\mu=16,3$ років, $\sigma=2,5$).

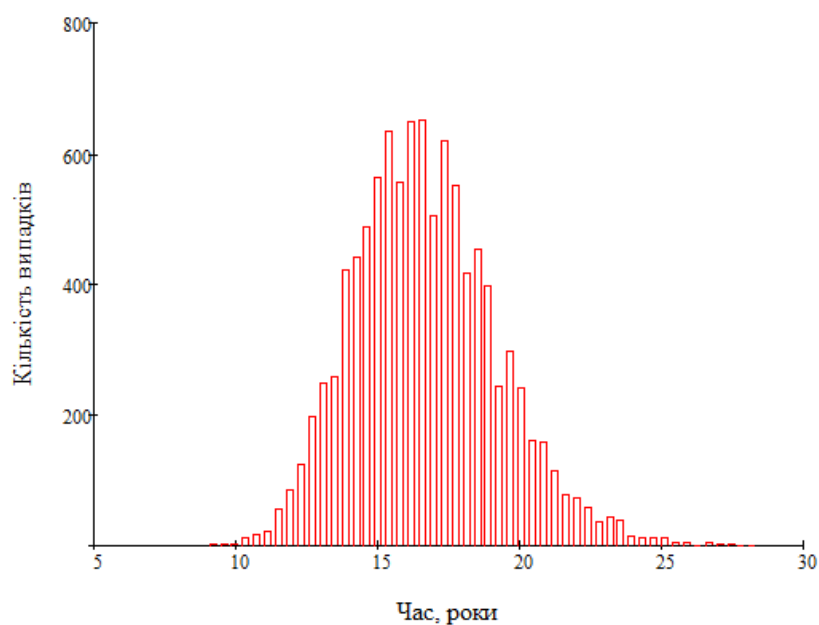


Рисунок 4.47 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.48., демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=49,3$ років, $\sigma=2,5$).

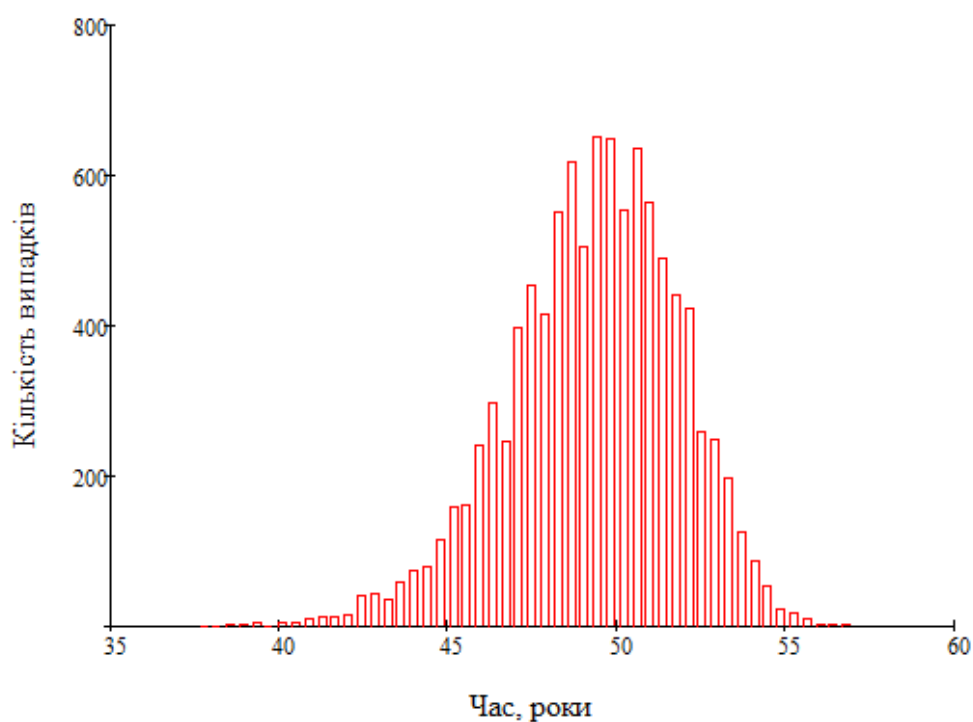


Рисунок 4.47 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 3.503.1-81 33 м (приклад 7):

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – попередньо напружена 12 пучків 24d5 мм зі сталі класу В-II. Висота балки 1,53 м, довжина 33 м. Схему армування показано на рис. 4.49:

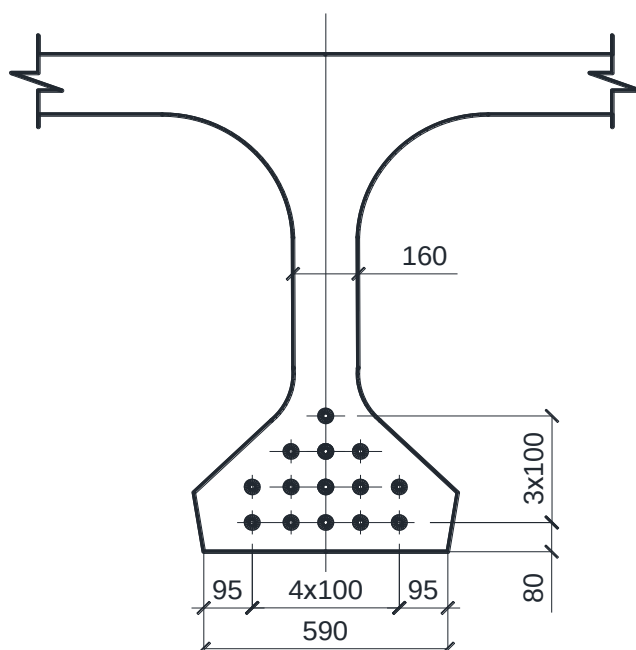


Рисунок 4.49. – Схема армування 3.503.1-81 33 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.16.

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.50, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=26,8$ років, $\sigma=2,3$).

Таблиця 4.16 – Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	2638	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	1018,9	0,17
Навантаження АК+натовп, кН·м	2235,1	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	25,5	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1335	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

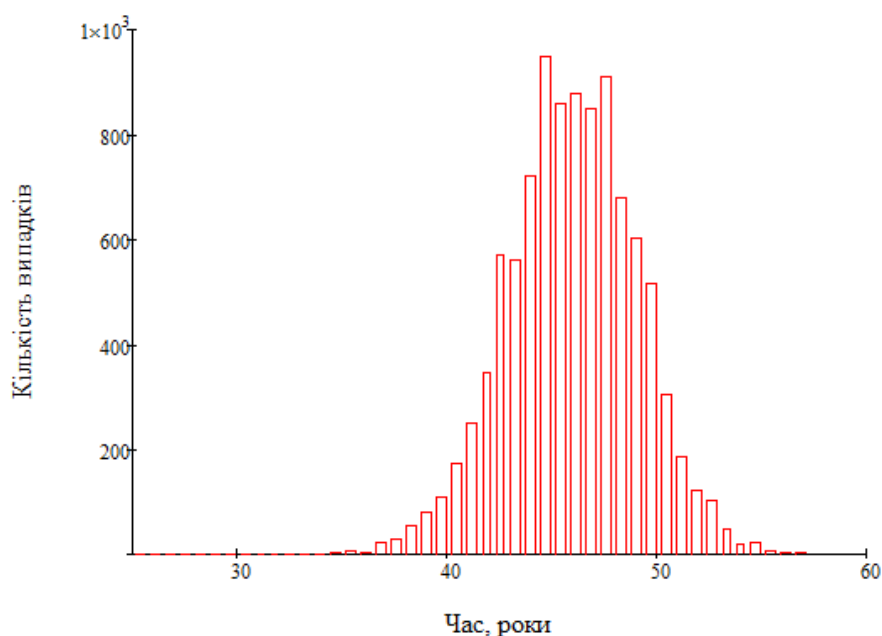


Рисунок 4.50 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис.4.51 ($\mu=16,3$ років, $\sigma=2,5$).

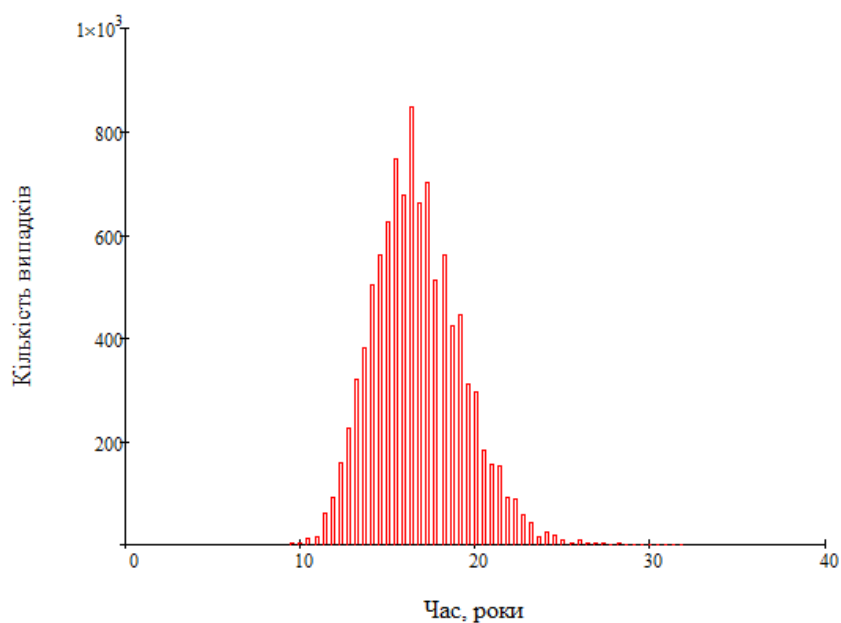


Рисунок 4.51 – Прогноз карбонізації захисного шару до рівня поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис.4.52, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=97,2$ років, $\sigma=2,5$).

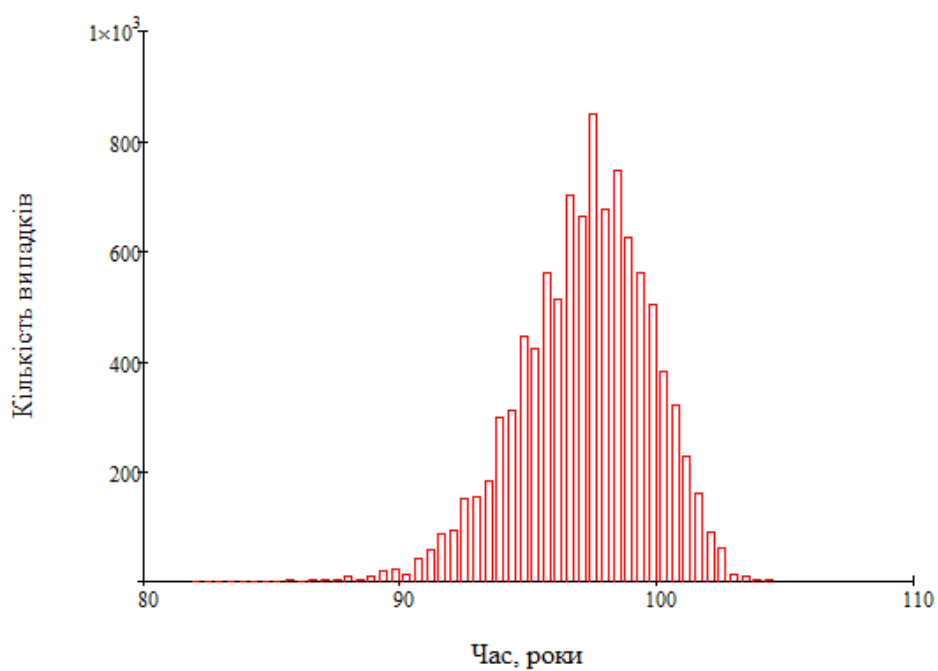


Рисунок 4.52 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 56Д 12,5 м (приклад 8)

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – каркасна арматура класу А-ІІ 12d32. Висота балки 0,85 м, довжина 12,5 м.

Схему армування показано на рис. 4.53:

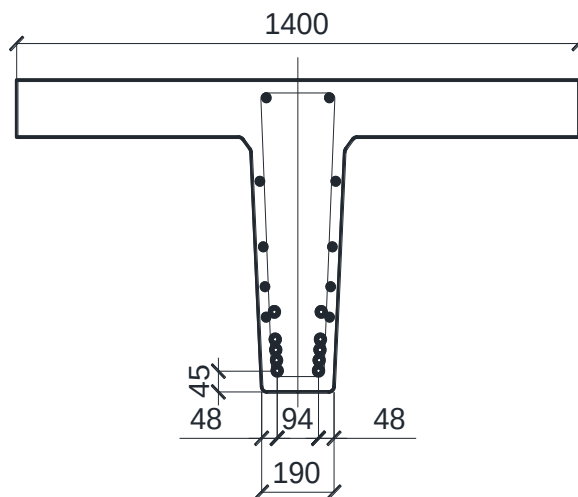


Рисунок 4.53 – Схема армування серії 56Д 12,5м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.17:

Таблиця 4.17 – Характеристичні дані

	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Постійне навантаження, т·м	39	0,17
Навантаження від НК, т·м	81,6	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	16,8	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	290	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис. 4.54, що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=29,9$ років, $\sigma=2,4$).

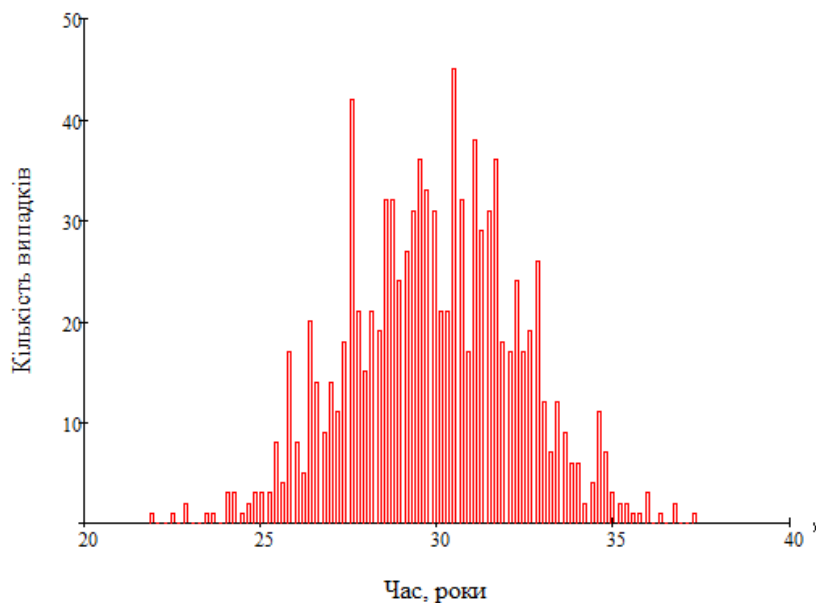


Рисунок 4.54 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис. 4.55 ($\mu=11,6$ років, $\sigma=1,8$).

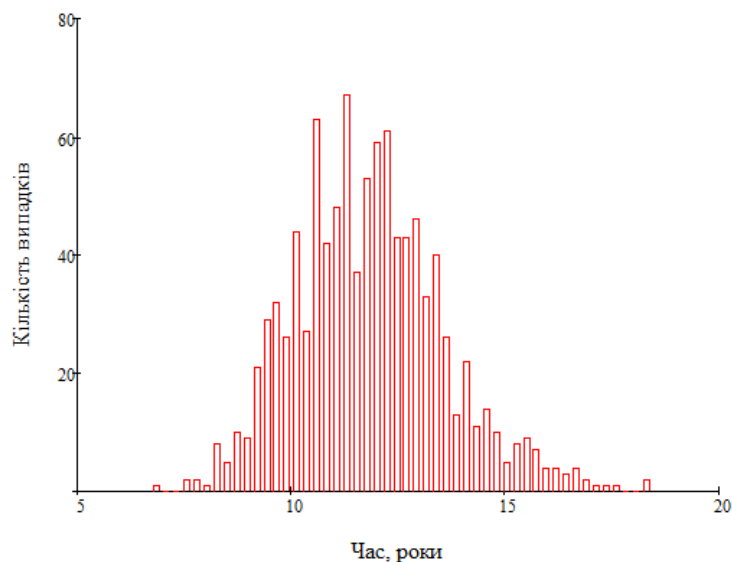


Рисунок 4.55 – Прогноз карбонізації захисного шару на поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис. 4.56, демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=112,3$ років, $\sigma=1,8$).

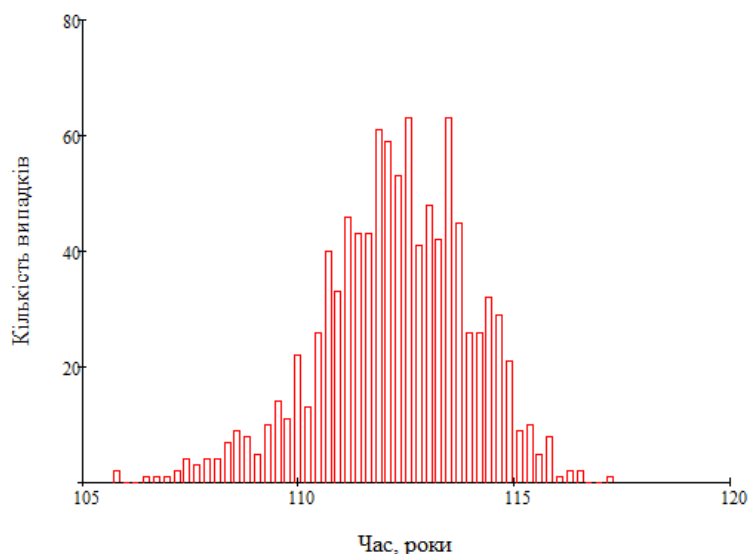


Рисунок 4.56 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

Прогноз довговічності балки прогонової будови серії 56Д 15м (приклад 9)

Збірні балки прогонової будови виконано з гідротехнічного бетону класу В35. Робоча арматура балок – каркасна арматура класу А-ІІ 12d32+2d16. Висота балки 1,0 м, довжина 15 м.

Схему армування показано на рис. 4.57:

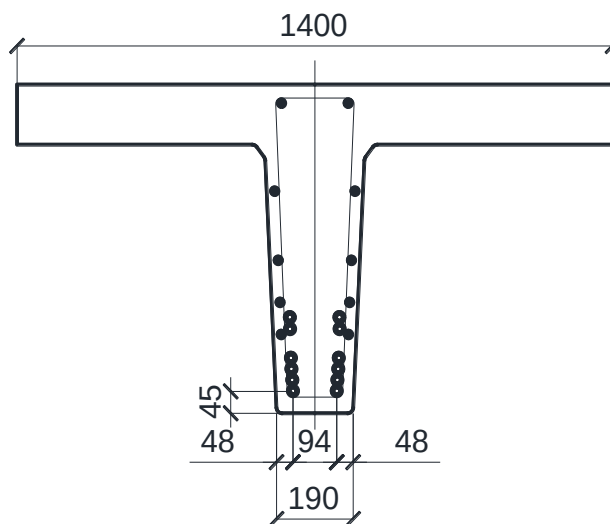


Рисунок 4.57 – Схема армування 3.503.1-81 15 м

Значення параметрів моделі для прогнозу довговічності плити проїзної частини в перерізі середини прольоту плити наведені в табл. 4.18:

Таблиця 4.18 – Характеристичні дані

	Значення зусиль, т·м	Коеф. варіації V_x
Постійне навантаження, кН·м	57,8	0,17
Навантаження від НК, кН·м	97,4	0,17
Нормативний опір бетону стисненню R_{bn} , МПа	16,8	0,111
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	290	0,07
Район будівництва	Київ	
Концентрація хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) на денній поверхні всередині бетону C_s	2,00%	0,2
Вміст хлорид-іонів (у відсотках від маси в'язучого) у складі бетону на момент будівництва C_0	0,60%	0,2
Кількість випробувань N	10000	-

За результатами числових експериментів побудована гістограма, зображена на рис.4.58., що демонструє прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури ($\mu=29,9$ років, $\sigma=2,4$).

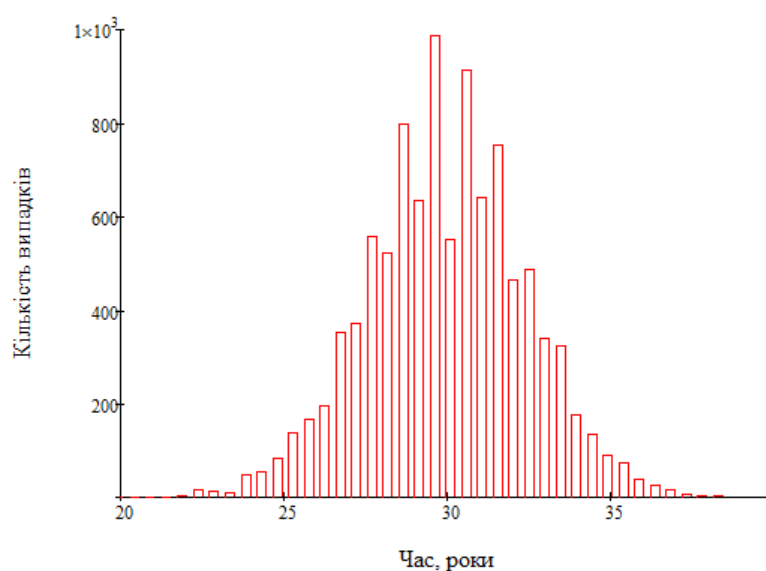


Рисунок 4.58 – Прогноз насичення захисного шару хлоридами до критичної концентрації на поверхні арматури

Результати розрахунку карбонізації захисного шару залізобетонного елемента представлені на рис.4.59. ($\mu=11,5$ років, $\sigma=1,8$).

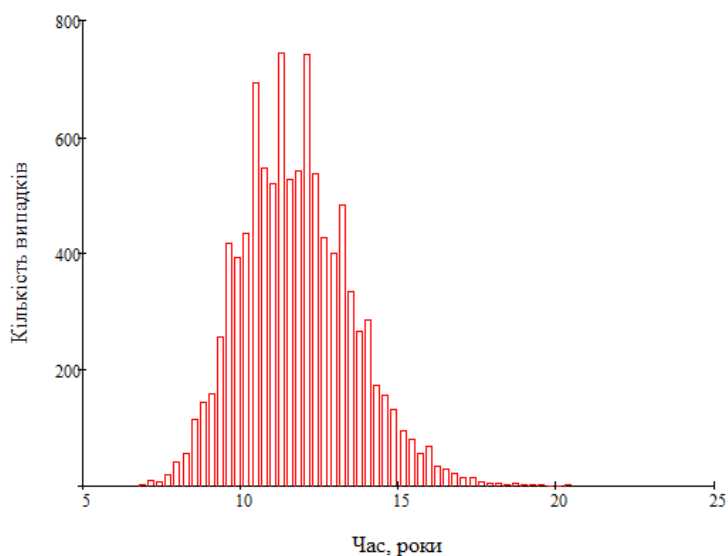


Рисунок 4.59 – Прогноз карбонізації захисного шару на поверхні арматури

Гістограма, зображена на рис.4.60., демонструє прогноз ресурсу залізобетонного елемента за критерієм вичерпання запасу несної здатності перерізу в середині прогону за згинальним моментом ($\mu=90,0$ років, $\sigma=1,8$).

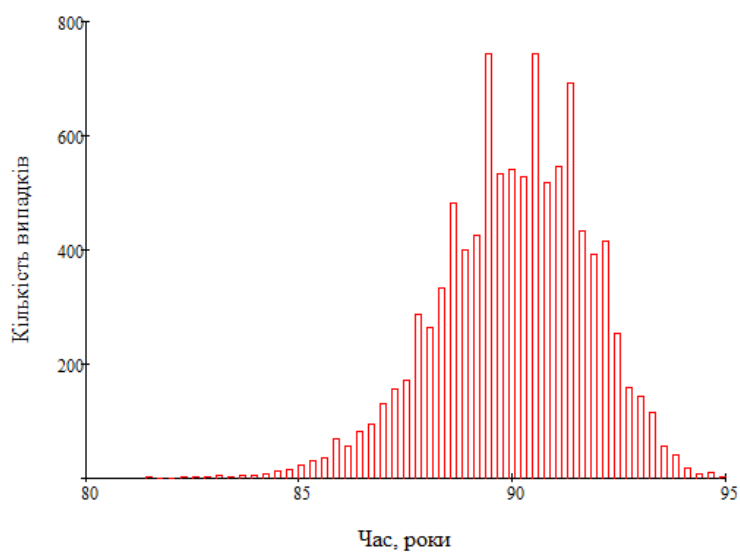
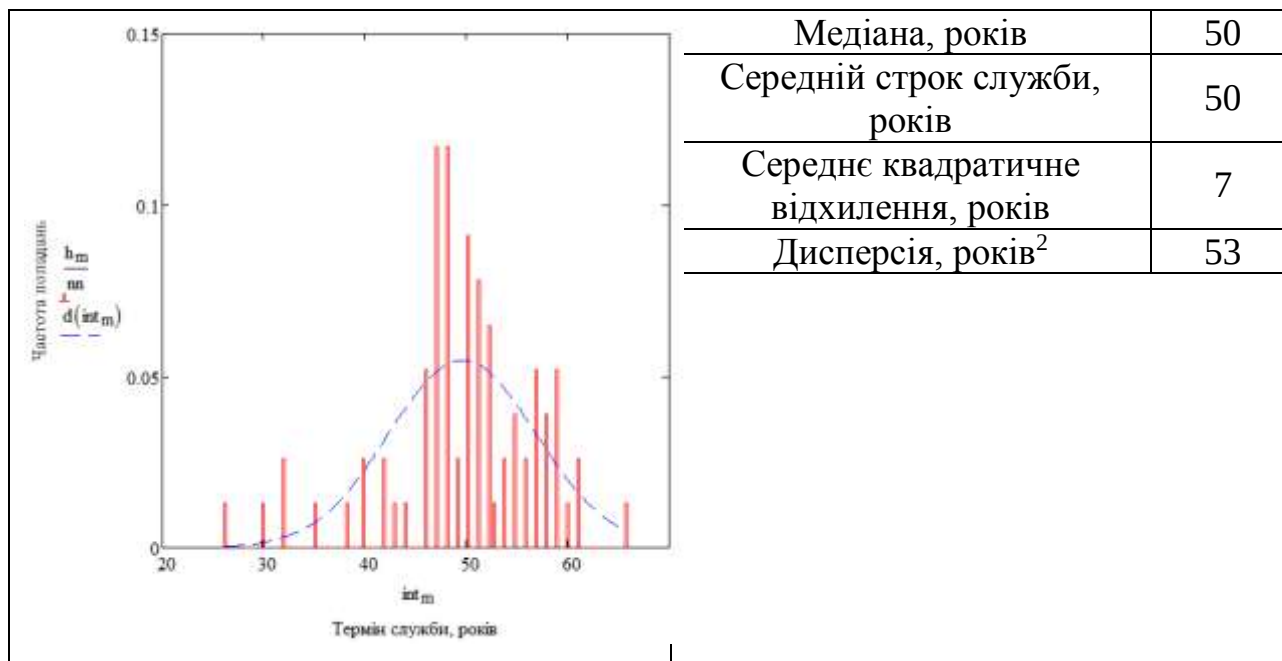


Рисунок 4.60 – Прогноз довговічності залізобетонного елемента

4.5 Аналіз адекватності моделі

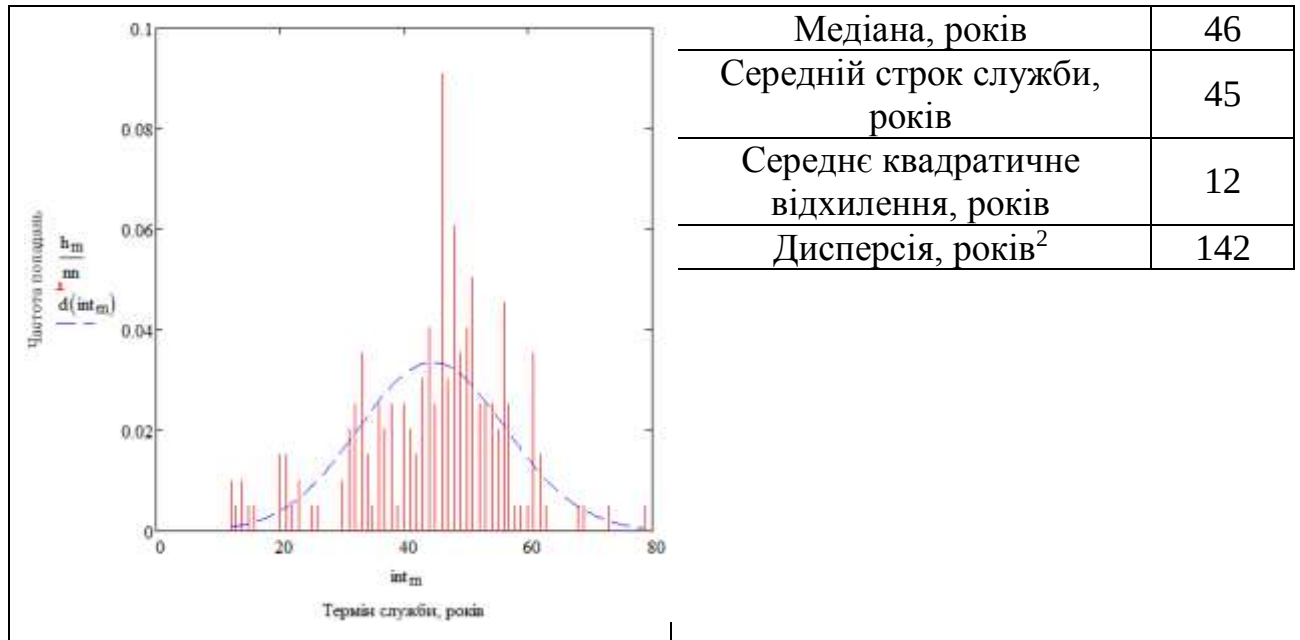
Варіаційний ряд строків служби прогонових будов з **монолітного залізобетону** в експлуатаційному стані 5 представлено обсягом $n = 77$ од. На гістограмі наведена для порівняння теоретична крива щільності нормального розподілу. Результати зведені в таблицю 4.19.

Таблиця 4.19 – Стан 5. Прогонові будови з монолітного залізобетону



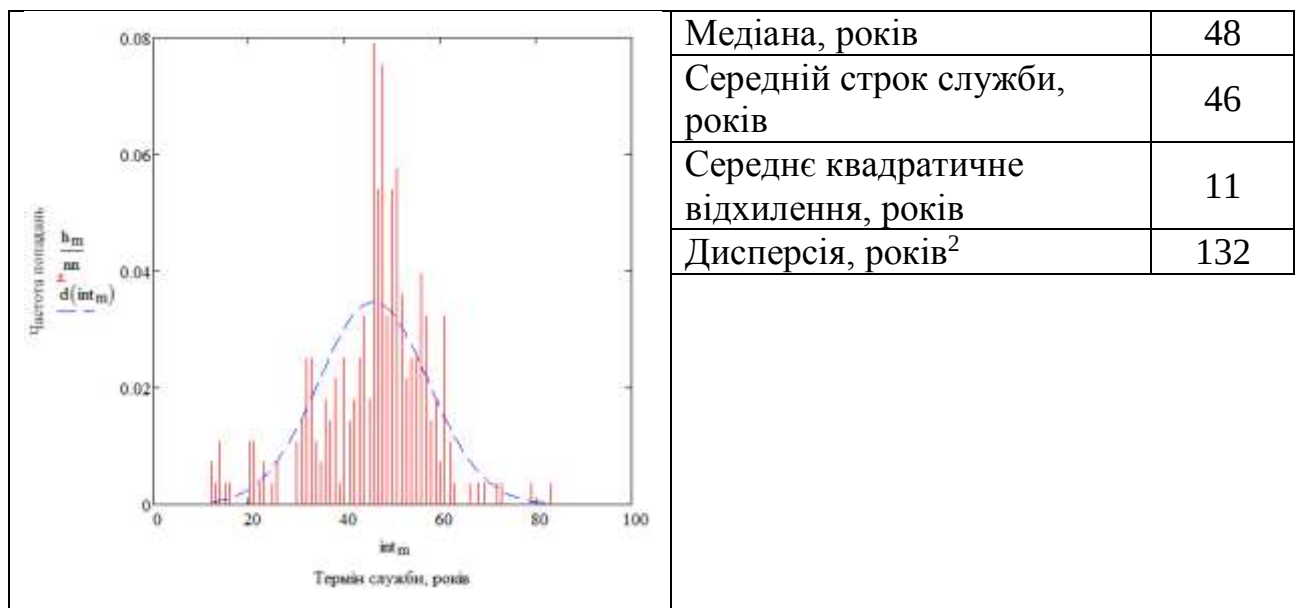
Варіаційний ряд строків служби прогонових будов із збірно-монолітного залізобетону в експлуатаційному стані 5 представлено обсягом $n = 198$ од. Обчислення статистичних характеристик і побудова гістограми виконані в програмі MathCAD (Додаток Б). Результати зведені в таблицю 4.20.

Таблиця 4.20 – Стан 5. Прогонові будови із збірно-монолітного залізобетону



Варіаційний ряд строків служби прогонових будов **всіх типів** в експлуатаційному стані 5 представлено обсягом $n = 275$ од. Обчислення статистичних характеристик і побудова гістограми виконані в програмі MathCAD. Результати зведені в таблицю 4.21.

Таблиця 4.21 – Стан 5. Прогонові будови всіх типів



Таблиця 4.22 – Статистичні оцінки параметрів для кожної групи даних

	Медіана	Me_{min}	Me_{max}	Середнє значення елементів, μ	Середнє квадратичне відхилення, σ	Дисперсія, D
	Стан 2					
Монолітні	46	28	66	41	18	342
Зб.-мон.	35	19	51	35	15	229
Всі типи	37	20	54	36	16	259
	Стан 3					
Монолітні	51	35	67	52	16	249
Зб.-мон.	41	25	57	41	16	252
Всі типи	45	28	62	45	17	276
	Стан 4					
Монолітні	52	39	65	52	13	166
Зб.-мон.	44	30	58	43	14	188
Всі типи	46	32	60	46	14	202
	Стан 5					
Монолітні	50	43	57	50	7	53
Зб.-мон.	46	34	58	45	12	142
Всі типи	48	37	59	46	11	132

Згідно даних таблиці 4.22 були побудовані графіки життєвого циклу мостів для медіани (рис. 4.61).

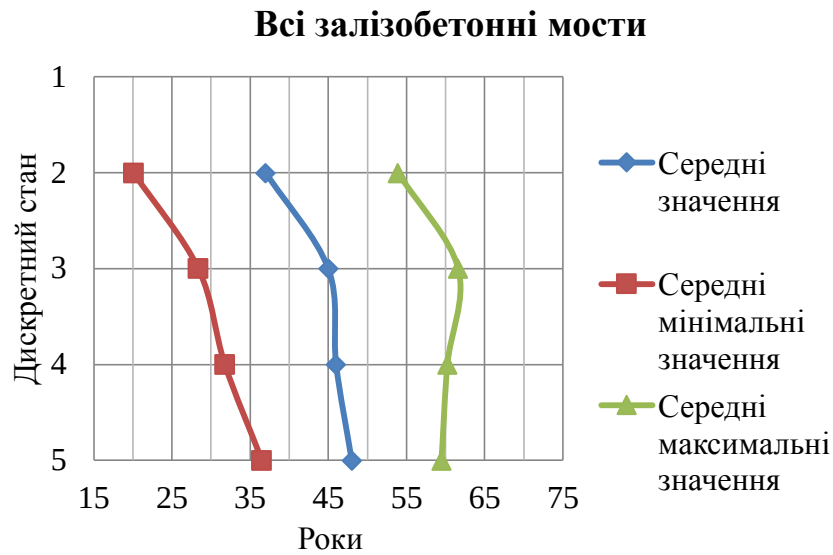


Рисунок 4.61 – Життєвий цикл всіх залізобетонних мостів

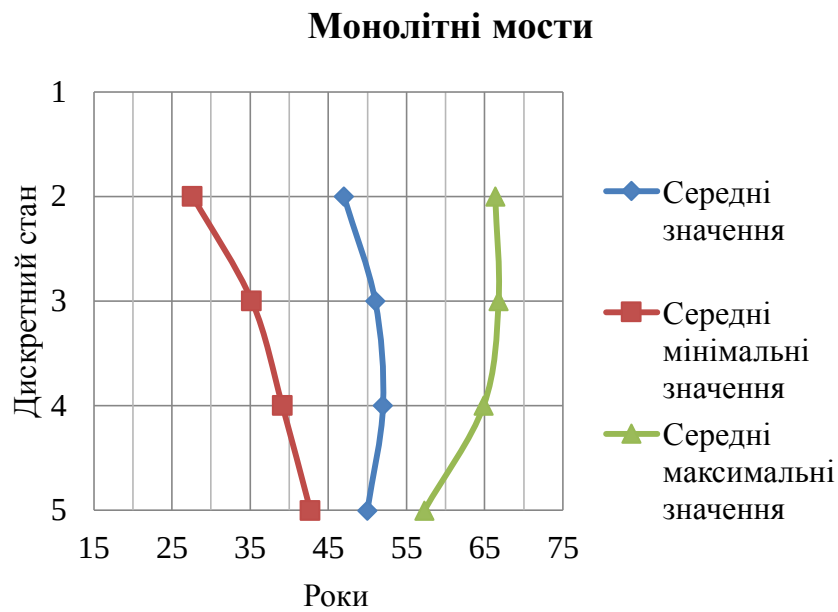


Рисунок 4.62 – Життєвий цикл монолітних мостів

Збірно-монолітні мости

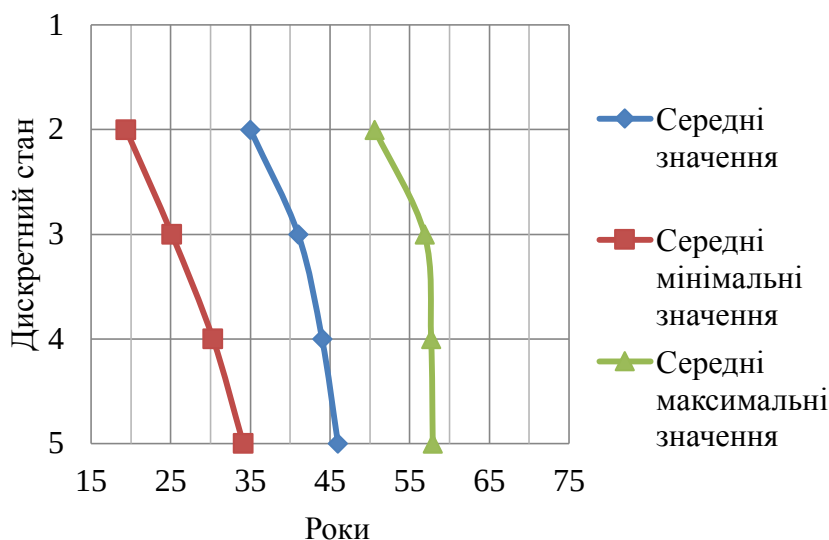


Рисунок 4.63 – Життєвий цикл збірно-монолітних мостів

4.6 Висновки до розділу 4

1. Виконаний аналіз дав підставу вважати, що найбільш повним, з точки зору можливостей опису процесу деградації залізобетону, є фізичний підхід. Дійсно, в цьому випадку вихідними даними моделі є фізико-механічні характеристики бетону та арматури, параметри агресивності оточуючого середовища.

2. Вперше розроблено об'єднану стохастичну модель деградації бетону захисного шару і арматури згинаного елемента моста шляхом статистичних випробувань (метод Монте-Карло) з урахуванням впливу стану оточуючого середовища, навантажень, корозійних процесів і напружено-деформованого стану.

3. Сформульовано принципи формування параметричної моделі. Доведено, що для правильного функціонування моделі необхідно розділити на дві групи: параметри, описані випадковими величинами величини та параметри, що являють собою стохастичний процес.

4. 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.

5. 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.

6. Результати обчислень при співставленні результатів показали адекватність моделі. Необхідно відзначити, що на відміну від результатів прогнозу моделі 2.2 для товщин захисного шару 25,3мм, 50,6мм, 63,5мм, 76,2мм, де за певних умов результати прогнозу розходяться з даними натурних спостережень, модель 4.1.2 дає реалістичний результат у всьому діапазоні проаналізованих товщин захисного шару.

7. Необхідно відзначити, що за певних співвідношень критичної та поверхневої концентрацій хлоридів модель не працює через специфіку функції помилок, яка може бути використана у вузькому діапазоні значень аргумента.

8. Аналіз достовірності моделі показав адекватність отриманих даних з результатами лабораторних і натурних спостережень, описаних в роботах [1, 25, 72, 77].

РОЗДІЛ 5

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЗГИНАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ

5.1 Концепція методики

Розроблена методика прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів містить два підходи:

- напівймовірнісний
- ймовірнісний.

Обидва підходи самодостатні, проте можливе паралельне використання підходів для аналізу і корегування отриманих результатів.

Напівймовірнісний підхід по суті є реалізацією аналітичної моделі 2.1.2 з включенням апарату розрахунку коефіцієнта надійності.

Ймовірнісний підхід, заснований на методі статистичних випробувань представлено в роботах [128, 160].

5.1.1 Теоретичні засади

Приймемо нормальний закон розподілу (Гауса) [17]) часу служби, зі щільністю (рис. 5.1):

$$f(T_{\text{сл}}) = \frac{1}{\sigma_{T_{\text{сл}}} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(T_{\text{сл}} - \mu_{T_{\text{сл}}})^2}{2\sigma_{T_{\text{сл}}}^2}\right), \quad T_{\text{сл}} \geq 0, \quad (5.1)$$

де $\sigma_{T_{\text{сл}}} = \sqrt{D(T_{\text{сл}})}$ – параметр нормального розподілу – стандарт (середнє квадратичне відхилення).

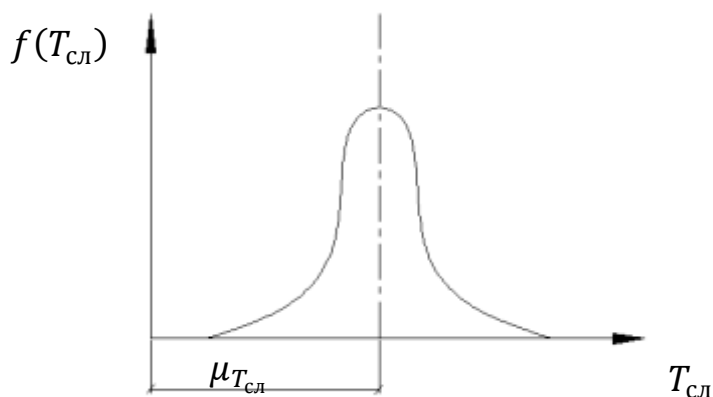


Рисунок 5.1 – Щільність нормального закону розподілу випадкової змінної строку служби $T_{сл}$ залізобетонного елемента автодорожнього моста.

Інтегральна функція нормального закону розподілу в цьому випадку має вигляд:

$$F(T_{сл}) = \int_{-\infty}^{T_{сл}} f(T_{сл}) dT_{сл} = \frac{1}{\sigma_{T_{сл}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T_{сл}} \exp\left(-\frac{(T_{сл} - \mu_{T_{сл}})^2}{2\sigma_{T_{сл}}^2}\right) dT_{сл}. \quad (5.2)$$

Інтегральну функцію нормального закону розподілу прийнято записувати, вводячи нову змінну:

$$z = \frac{T_{сл} - \mu_{T_{сл}}}{\sigma_{T_{сл}}}. \quad (5.3)$$

Тоді вираз (5.2) прийме вигляд:

$$F(T_{сл}) = \frac{1}{\sigma_{T_{сл}} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{T_{сл} - \mu_{T_{сл}}}{\sigma_{T_{сл}}}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (5.4)$$

Інтеграл у (5.4) не обчислюється в елементарних функціях. Тому його виражають через спеціальну функцію Лапласа $\Phi(T_{сл})$ (або «інтеграл імовірності»), нормовану таким чином, що $\mu_{T_{сл}} = 0$; $\sigma_{T_{сл}} = 1$:

$$\Phi(T_{сл}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{T_{сл}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (5.5)$$

Виразимо функцію розподілу (5.5) величини строку служби $T_{\text{сл}}$ з параметрами $\mu_{T_{\text{сл}}}$ та $\sigma_{T_{\text{сл}}}$ через функцію Лапласа $\Phi(T_{\text{сл}})$:

$$F(T_{\text{сл}}) = \Phi\left(\frac{T_{\text{сл}} - \mu_{T_{\text{сл}}}}{\sigma_{T_{\text{сл}}}}\right). \quad (5.6)$$

Таким чином, прийнявши закон розподілу випадкової змінної строку служби $T_{\text{сл}}$, при відомому з детермінованого рішення (з алгоритму моделі 2.1.2) математичному очікуванні $\mu_{T_{\text{сл}}}$ отримуємо можливість з (5.6) визначити ймовірність попадання випадкової змінної в заданий часовий інтервал $[T_0, T_1]$:

$$P(T_0 < T_{\text{сл}} < T_1) = \Phi\left(\frac{T_1 - \mu_{T_{\text{сл}}}}{\sigma_{T_{\text{сл}}}}\right) - \Phi\left(\frac{T_0 - \mu_{T_{\text{сл}}}}{\sigma_{T_{\text{сл}}}}\right). \quad (5.7)$$

Для оцінки точності й надійності строку служби, що прогнозується, елементу автодорожнього моста визначимо довірчий інтервал I_ψ , який накриває випадкову змінну $T_{\text{сл}}$ з довірчою ймовірністю ψ .

Для випадкової змінної $T_{\text{сл}}$, розподіленої за нормальним законом з параметрами $\mu_{T_{\text{сл}}}$ та $\sigma_{T_{\text{сл}}}$, довірчий інтервал I_ψ визначається як:

$$I_\psi = \left(\mu_{T_{\text{сл}}} - t_\psi \frac{\sigma_{T_{\text{сл}}}}{\sqrt{n}}; \mu_{T_{\text{сл}}} + t_\psi \frac{\sigma_{T_{\text{сл}}}}{\sqrt{n}} \right), \quad (5.8)$$

де t_ψ – число середніх квадратичних відхилень для нормального закону розподілу, яке необхідно відкласти ліворуч і праворуч від центру розсіювання для того, щоби ймовірність потрапляння в отриману ділянку дорівнювала ψ ;

n – об'єм добірки випадкової змінної $T_{\text{сл}}$.

Величина t_ψ визначається законом розподілу Стюдента в залежності від числа ступеня свободи $n - 1$ і довірчої ймовірності ψ [17].

5.1.2 Визначення коефіцієнта надійності детерміністичної моделі

Коефіцієнт надійності строку служби – це відношення математичного очікування строку служби до розрахунковому строку служби [146,151]:

$$\gamma_t = \frac{\mu_{T_{\text{сл}}}}{T_g}, \quad (5.9)$$

де γ_t – коефіцієнт надійності строку служби;

$\mu_{T_{сл}}$ – математичне очікування сорока служби, років;

T_g – розрахунковий строк служби з заданою забезпеченістю, років.

Залежність (5.9) дозволяє визначити розрахунковий строк служби елемента із заданою забезпеченістю, якщо згідно моделі життєвого циклу (5.10) визначено строк служби проектного перерізу:

$$T_g = \frac{\mu_{T_{сл}}}{\gamma_t}. \quad (5.10)$$

Також за допомогою коефіцієнта надійності строку служби γ_t можна перейти від нормативного необхідного строку служби елемента, який відповідає максимально допустимій ймовірності відмови, до відповідного середнього проектного строку служби T_d [146,151]:

$$T_d = \gamma_t T_g \quad (5.11)$$

Коефіцієнт надійності строку служби залежить від максимально допустимої ймовірності відмови (рівня надійності) і від типу закону розподілу строку служби $T_{сл}$. Графічна інтерпретація значення коефіцієнта надійності строку служби γ_t при проектуванні з урахуванням довговічності показана на рис. 5.2. Крива $R(t)$ відповідає зниженню узагальненого опору перерізу в часі в результаті деградації залізобетону. R_{min} – мінімально допустимий рівень узагальненого опору. Різниця $R(t) - R_{min}$ являє собою запас міцності. Абсциса точки перетину функції $R(t)$ з R_{min} відповідає середньому значенню проектного строку служби елемента T_d .

Коефіцієнти надійності строку служби визначимо, дотримуючись процедури єврокодів, у функції характеристики безпеки [35, 149, 159]. Характеристика безпеки β вводиться на підставі фундаментальних принципів теорії ймовірностей і математичної статистики, за таких гіпотез:

- припускається, що узагальнене опір R і узагальнений навантажувальний ефект E - суть випадкові величини;
- постулюється, що випадкові змінні R і E мають нормальний розподіл.

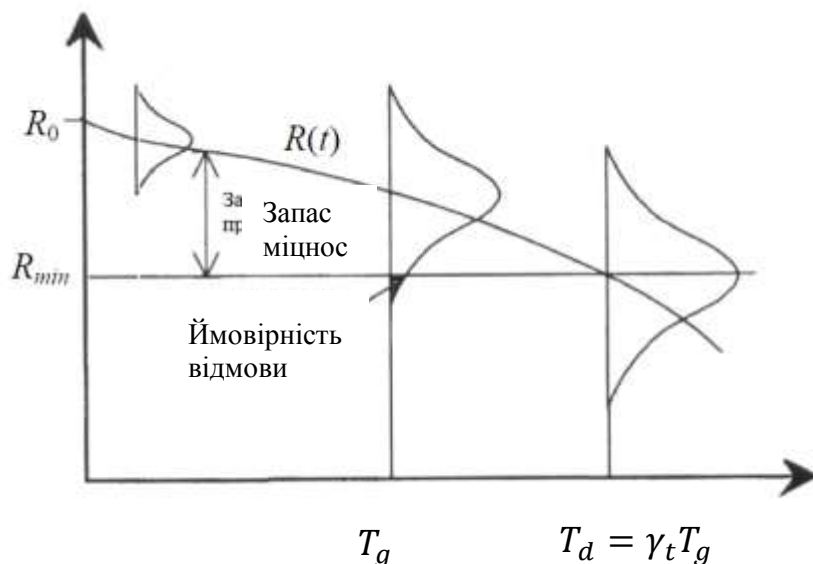


Рисунок 5.2 – Роль коефіцієнта надійності строку служби γ_t при проектуванні з урахуванням довговічності.

Визначається характеристика безпеки як відношення середнього значення (математичного очікування) резерву опору μ до середнього квадратичного відхилення (стандарт) резерву опору σ :

$$\beta = \frac{\mu}{\sigma}. \quad (5.11)$$

Представивши середнє значення резерву опору μ як різницю $\mu_R - \mu_E$ і середнє квадратичне відхилення (стандарт) узагальненого резерву опору виразом $\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}$ отримаємо:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}, \quad (5.12)$$

де μ_R – середнє значення узагальненого опору елемента;

μ_E – середнє значення узагальненого навантажувального ефекта;

σ_R – середнє квадратичне відхилення узагальненого опору елемента та;

σ_E – середнє квадратичне відхилення узагальненого навантажувального ефекта.

Зауважимо, що формулювання характеристики безпеки (5.12) належить А.Р. Ржаніцину (1952 г) [98]. У сучасних літературних джерелах нерідко зустрічається назва параметра β - «індекс надійності», що є дослівним

перекладом англійського «reliability index». Буде коректним застосовувати ту назву, під якою цей параметр був вперше опублікований.

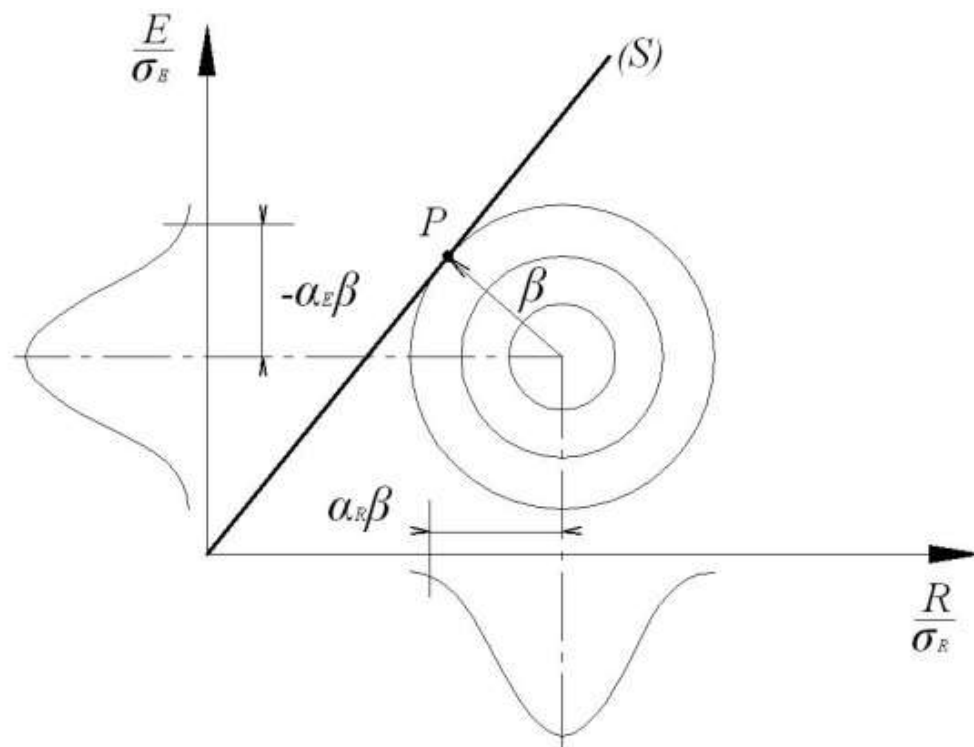
Між надійністю і характеристикою безпеки за визначенням (5.9) існує чіткий математична зв'язок:

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (5.13)$$

де P_f – надійність;

$\Phi()$ – нормальна функція розподілу.

Графічна інтерпретація характеристики безпеки в просторі випадкових змінних E, R наведена на рис. 5.3:



(G) – межа зони безпеки; P – проектна точка.

Рисунок 5.3 – Характеристики безпеки в просторі випадкових змінних E, R

Якщо вектор базових змінних $\mathbf{X} = X_1, X_2, \dots, X_m$ змінюється в часі, то ймовірність відмови p теж змінюється в часі і повинна бути віднесена до певного базового періоду T , який може різнитися з проектним строком служби T_d . Для конструкції з заданим рівнем надійності проектна ймовірність відмови $p_d = p_n$, відповідно базовому періоду T_n , може бути отримана за допомогою

альтернативний ймовірності відмови $p_a = p_1$, яка відповідає певному базовому періоду $T_a = T_1$.

Якщо випадкові змінні мають статистично незалежні максимальні значення, що визначаються на період повторюваності в 1 рік, для базового періоду в $T_n = n$ років, значення характеристики безпеки β_n обчислюється за наближеною залежністю (правило Turkstra, C.J. [159, 98]):

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n, \quad (5.14)$$

де β_1 – характеристика безпеки для базового періоду повторюваності в 1 рік;
 β_n – характеристика безпеки для базового періоду повторюваності $T_n = n$ років.

В термінах надійності (5.14) має вигляд:

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n, \quad (5.15)$$

де P_1 – ймовірність відмови для базового періоду повторюваності в 1 рік;
 P_n – ймовірність відмови для базового періоду повторюваності $T_n = n$ років.

Для малих значень ймовірності досягнення граничного стану це відношення може бути спрощено:

$$P_n = P_1 \frac{T_n}{T_1}. \quad (5.16)$$

За умови, що дані для аналізу надійності були зібрані за період $T=1$ рік, залежності (5.13-5.16) дозволяють оцінити необхідне значення імовірності відмови p_1 і характеристики безпеки β_1 , які відповідають проектному рівню надійності з показниками p_a та β_a для проектного строку служби T_a .

Коефіцієнти надійності строку служби («часткові коефіцієнти» в термінології Єврокоду [35,159] та «часткові коефіцієнти» в визначеннях ДБН В.1.2-14:2009 [26]) отримуємо, прийнявши нормальний (лог-нормальний) розподіл ймовірнісних змінних.

Коефіцієнт надійності строку служби γ_t визначимо як коефіцієнт надійності властивостей матеріалу γ_R у вигляді відношення характеристичного значення узагальненої змінної опору R до її розрахунковому (проектному) значенням:

$$\gamma_t = \gamma_R = \frac{R_k}{R_d}, \quad (5.17)$$

де R_k – характеристичне значення узагальненої змінної опору R ;

R_d – її розрахункове значення узагальненої змінної опору R .

Прийнято характеристичні значення R_k визначати як 5% квантиль [98, 159]:

$$R_k = \mu_R e^{-1,645 V_R}. \quad (5.18)$$

Розрахункове значення R_d визначається через характеристику безпеки для базового періоду повторюваності в 1 рік:

$$R_d = \mu_R e^{-\alpha_R \beta_a V_R}, \quad (5.19)$$

де α_R – коефіцієнт чутливості (направляючі косинуси діаграми на рис. 5.2);

β_a – характеристика безпеки для базового періоду повторюваності в 1 рік;

V_R – коефіцієнт варіації матеріалу;

1,645 – коефіцієнт приведення математичного очікування (середнього значення) змінної до її характеристичного значення, що відповідає 5% забезпеченості (5% квантиль змінної).

Коефіцієнт варіації матеріалу композитного елемента визначається загальною формулою математичної статистики:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2 + \sum_1^m V_{Ri}^2 V_{Rj}^2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (5.20)$$

де m – кількість матеріалів, що містяться в композитному елементі.

Коефіцієнти чутливості, в загальному випадку (див. Рис. 5.3), визначаються так:

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}, \quad (5.21)$$

$$\alpha_E = \frac{\sigma_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}. \quad (5.22)$$

Вочевидь, має дотримуватись умова $\alpha_R^2 + \alpha_E^2 = 1$.

Відповідно до [35, 159] α_R та α_E можуть бути прийняті альтернативно, як 0,8 та -0,7 відповідно, за умови:

$$0,16 < \frac{\sigma_E}{\sigma_R} < 7,6. \quad (5.23)$$

Внесемо в (5.17) вирази (5.18) і (5.19) і отримаємо вираз для коефіцієнта надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = \frac{e^{-1,645V_Q}}{e^{-\alpha_R\beta V_R}} = e^{(0,8\beta V_R - 1,645V_Q)}. \quad (5.24)$$

5.1.3 Алгоритм прогнозування ресурсу

Алгоритм прогнозу ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування складається з наступних кроків:

- формування вихідних конструкційних і експлуатаційних характеристик елемента;
- прогноз часу карбонізації захисного шару t_1 ;
- прогноз часу накопичення критичної концентрації хлоридів у поверхні арматури t_2 ;
- визначення часу корозії арматури t_3 ;
- визначення проектного строку служби елемента T_d ;
- визначення коефіцієнта надійності строку служби γ_t ;
- визначення розрахункового строку служби T_g з забезпеченістю 95%.

Логічна схема алгоритму представлена на рис. 5.4.

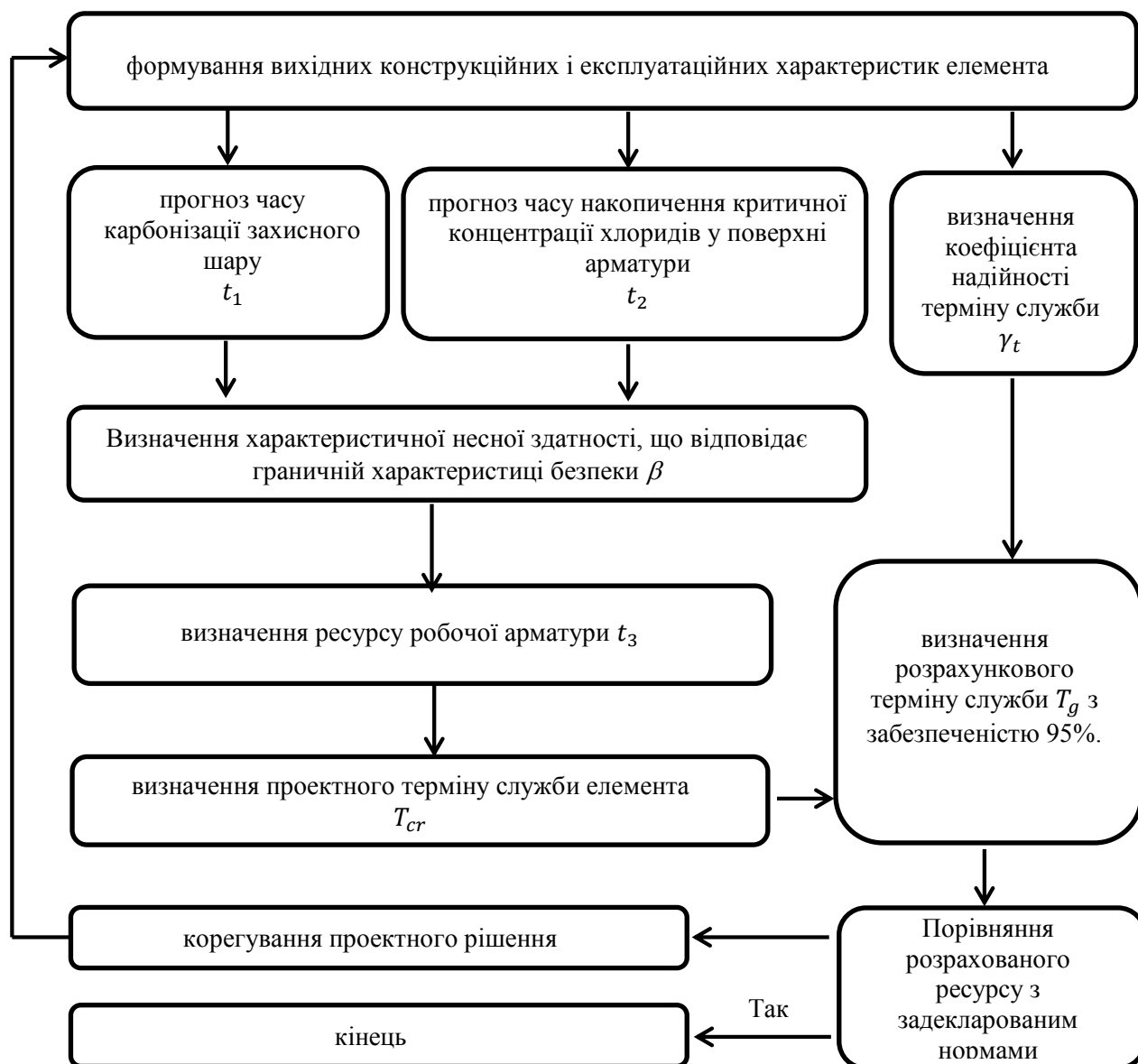


Рисунок 5.4 – Логічна схема алгоритму обчислення розрахункового строку служби.

Час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_1 = \frac{m_0 \cdot x^2}{2D_e \cdot C_0}, \quad (5.25)$$

де x – товщина захисного шару, м;

D_e ефективний коефіцієнт дифузії (табл. 5.1 згідно СНиП 2.03.11-85 [109]);

m_0 – реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні.

Таблиця 5.1 – Показники проникності бетону [109]

Умовні позначення показника проникності бетону	марка бетону по водоне-проникності	коефіцієнт фільтрації, см/с (за рівноважної вологості), K_f	ефективний коефіцієнт дифузії, D_{10}^{-4} , см ² /с	водоцементне співвідношення В/Ц, не більше
Н — бетон нормальної проникності	W4	Більше. $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	Б. 0,2 до 1	0,6
П — бетон пониженої проникності	W6	$> 6 \cdot 10^{-10} > 2 \cdot 10^{-9}$	$> 0,04$ до 0,2	0,55
О — бетон особливо низької проникності	W8	$> 1 \cdot 10^{-10} > 6 \cdot 10^{-10}$	до 0,04	0,45

Реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні згідно документу [37]:

$$m = 3 \cdot \omega / c - 0,6 . \quad (5.26)$$

Можна приймати для портландцементу $m = 0,2 - 0,3$ і для зольного та шлакового цементу $m = 0,6 - 0,7$.

Час досягнення критичної концентрації хлоридів на рівні робочої арматури на глибині x :

$$t_2 = \frac{1}{K_{\text{эф}} \cdot D_0} \left[\frac{x}{2 \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1} \right)} \right]^2, \quad (5.27)$$

де C_S – концентрація хлорид-іонів на поверхні елемента;

C_1 – початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону;

C_{CR} концентрація хлорид-іонів на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури;

$\text{erf}(\cdot)$ – функція помилок;

$K_{\text{эф}}$ – коефіцієнт ефективності;

D_0 – початковий коефіцієнт дифузії з урахуванням впливу складу бетону λ і вмісту летючої золи (ξ , %) [11]:

$$K_{\phi} = \left[1 + \frac{(1-H)^4}{(1-H_c)^4} \right]^{-1} \cdot e^{q \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma}{f} \right) \right]^2, \quad (5.28)$$

де H – відносна вологість;

H_c – критична вологість;

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 – гранична міцність бетону.

$$D_0 = 10^{(-12,06+2,4B/C)} \lambda \xi, \quad (5.29)$$

де B/C – водоцементне відношення.

Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$\mu_R(\beta) = - \frac{\mu_Q + \beta \cdot \mu_Q \sqrt{V_Q^2 - V_Q^2 \cdot V_R^2 \cdot \beta^2 + V_R^2}}{V_R^2 \cdot \beta^2 - 1}, \quad (5.30)$$

де V_Q – коефіцієнт варіації узагальненого навантаження;

V_R – коефіцієнт узагальненої опірності елемента;

μ_R – математичне очікування узагальненого опору елемента;

μ_Q – математичне очікування узагальненого навантаження елемента.

Характеристична несна здатність $M_{\beta n}$, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$M_{\beta n} = \mu_R(\beta) \cdot (1 - 1,64V_Q). \quad (5.31)$$

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:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n} \quad (5.32)$$

Рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_C :

$$\Delta d_C = 2v_C \cdot (t_2 - t_1), \quad (5.33)$$

де, v_C – швидкість корозії арматури в умовах карбонізованого бетону.

Ресурс арматури:

$$t_3 = \frac{d - \Delta d_C}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (d - \Delta d_C)^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right)} \right), \quad (5.34)$$

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).

Швидкість корозії за відсутності напружень показана в табл. 5.2.

З урахуванням впливу напружень, температури та вологості на швидкість корозії арматури з роботи [25]:

$$v = v_0 \exp\left(\frac{V \cdot \sigma}{R \cdot T}\right), \quad (5.35)$$

де δ – глибина корозійного ушкодження арматури (м);

v_0 – швидкість корозії за відсутності напружень (мкм/рік, згідно з RILEM [179] в умовах хлориднасиченого середовища 98 мкм/рік.);

V – мольний об'єм кородуючого металу (м³/моль);

σ – напруження в арматурі (МПа);

R – універсальна газова стала 8,314472 Дж/(моль·К);

T – температура (К).

В термінах часу, ресурс елемента:

$$T_{cr} = t_2 + t_3, \quad (5.36)$$

де перший період життєвого циклу t_1 – період депасивації захисного шару, арматура не кородує ($t_1 = t_C$) відсутній через те що він повністю завершується

впродовж другого періоду життєвого циклу; другий період життєвого циклу t_2 – період, впродовж якого арматура кородує в умовах карбонізованого бетону, концентрація хлоридів недостатня для активації хлоридної корозії; третій період t_3 – період активної хлоридної корозії, характеризується активним зниженням несної здатності в часі.

Таблиця 5.2 – Швидкість корозії V_{cor} і період зволоження W_t в залежності від класу середовища експлуатації [147]

Позначення класу середовища	Характеристика середовища	Характеристика елементів прогонової будови мостів та умов їх експлуатації (приклади)	V_{cor} , мм/рік	W_t
Корозія арматури, викликана карбонізацією				
XC3	Вологе	Елементи, прогонової будови, захищені від дощу (проміжні ребристі та плитні прогонові удови)	0,002	0,5
XC4	Періодично зволожене, сухе	Елементи, прогонової будови, що періодично контактують з водою (крайні ребристі та плитні прогонові будови, плита проїзної частини за умов порушення гідроізоляції)	0,005	0,75
Корозія арматури, викликана хлоридизацією				
XD1	Вологе	Елементи, прогонової будови, захищені від дощу (проміжні ребристі та плитні прогонові удови)	0,030	0,5
XD3	Періодично зволожене, сухе	Елементи, прогонової будови, що періодично контактують з водою (крайні ребристі та плитні прогонові будови, плита проїзної частини за умов порушення гідроізоляції)	0,030	0,75

Коефіцієнт варіації матеріалу композитного елемента:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2 + \sum_1^m V_{Ri}^2 V_{Rj}^2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (5.37)$$

де m – кількість матеріалів, що містяться в композитному елементі.

Коефіцієнт варіації узагальненого навантаження на елемент:

$$V_Q = \sqrt{\sum_1^m V_{Qi}^2 + \sum_1^m V_{Qi}^2 V_{Qj}^2}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (5.38)$$

де m – кількість навантажень, що діють на переріз елемента.

Математичне очікування узагальненого опору елемента:

$$\mu_R = \frac{M_u}{1 - 1,64V_R}, \quad (5.39)$$

де M_u – характеристична несна здатність перерізу за моментом.

Математичне очікування узагальненого навантаження на елемент:

$$\mu_Q = \frac{M_{max}}{1 + 1,64V_Q}, \quad (5.40)$$

де M_{max} – характеристичний згинальний момент від всіх типів навантаження.

Характеристика безпеки:

$$\beta = \frac{\frac{\mu_R}{\mu_Q} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \left(\frac{\mu_R}{\mu_Q}\right)^2 V_R^2}}, \quad (5.41)$$

Коефіцієнт надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = e^{(0,8\beta V_R - 1,645V_R)}. \quad (5.42)$$

Розрахунковий ресурс елемента:

$$T = T_{cr} \cdot \gamma_t. \quad (5.43)$$

5.1.4 Приклад оцінки ресурсу попередньо напруженої залізобетонної балки мосту

Практична реалізація алгоритму прогнозу ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів на стадії проектування наводиться нижче. 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. 5.5.

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-II. Балка армована пучками, кожен з яких містить 24 дроти (рис. 5.6). Параметри, взяті для прикладу наведено в табл. 5.3.

Робоча арматура крайньої балки в середині прольоту являє собою 11 арматурних пучків загальною площею $51,81 \text{ см}^2$ (площа одного пучка $24 \cdot d \cdot f = 4,71 \text{ см}^2$). Характеристична несна здатність елемента за згинальним моментом $7,81 \text{ МН}\cdot\text{м}$. Характеристичне навантаження $3,59 \text{ МНм}$. Гранична характеристика безпеки $\beta=1,7$ (таб.5.4).

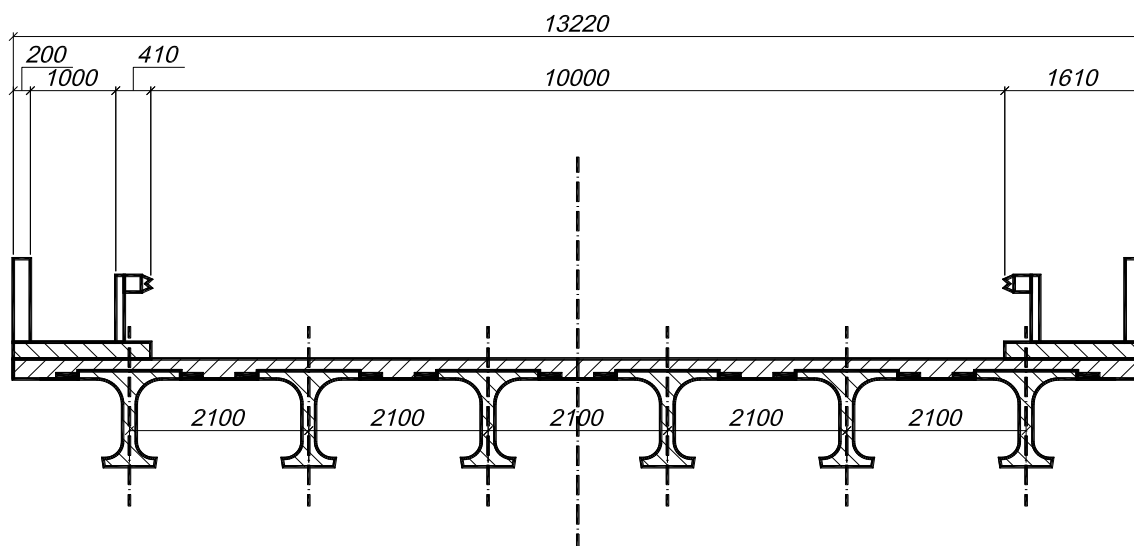


Рисунок 5.5 – Поперечний переріз мосту

Таблиця 5.3 – Параметри захисного шару

Параметр	Значення,
Товщина захисного шару x , м	0,05
Концентрація хлорид-іонів на денній поверхні всередині бетону C_s , % від маси в'язучого	0,55
Початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону C_1 , % від маси в'язучого	0,0
Концентрація хлорид-іонів на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури C_{CR} , % від маси в'язучого	0,3
Відносна вологість повітря H , %	81
Критична вологість повітря H_c , %	75
Водоцементне співвідношення В/Ц	0,4
Константа активації дифузії (рис 2.2) q	6000
Нормальна температура K_0 , К	274
Температура повітря в районі будівництва K , К	284,7
Коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні A	0,0496
Напруження в бетоні σ , МПа	1,3
Граничний опір бетону розтягу f , МПа	2,1
m_0 - реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні	0,25
D_e ефективний коефіцієнт дифузії (таб.2.1 згідно СНиП 2.03.11-85 [109]) $\times 10^{-4} \text{см}^2/\text{с}$	0,08
C – концентрація діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону (від 0,01% до 0,04%)	0,03

Таблиця 5.4 – Конструктивні властивості

Вид зусилля	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	1426	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	581	0,170
Навантаження від танделу, кН·м	978	0,170

Кінець таблиці 5.4

Вид зусилля	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК, кН·м	529	0,240
Рівномірно-розповсюджене навантаження від натовпу, кН·м	76	0,140
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	1335	0,07
Пружно-пластичний момент опору W , м ³	0,159	0,023

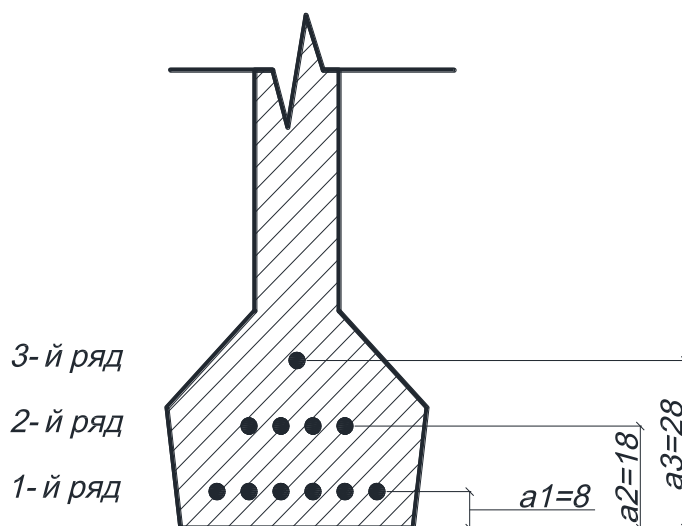


Рисунок 5.6. – Розташування арматури

1. Час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_1 = \frac{m_0 \cdot x^2}{2D_e \cdot C} = \frac{0,25 \cdot (0,05\text{м})^2}{2 \cdot 0,08\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-8} \cdot 0,03\%} = 4,141 \cdot 10^8 \text{с} \approx 41 \text{рік}$$

2. Час досягнення критичної концентрації хлоридів на рівні робочої арматури на глибині x :

а) Визначення коефіцієнта ефективності

$$K_{\text{эф}} = \left[1 + \frac{(1-H)^4}{(1-H_c)^4} \right]^{-1} \cdot e^{q \left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K} \right)} \cdot \left[1 + A \left(\frac{\sigma}{f} \right) \right]^2 =$$

$$= \left[1 + \frac{(1-81\%)^4}{(1-75\%)^4} \right]^{-1} \cdot e^{6000 \left(\frac{1}{274} - \frac{1}{284,7} \right)} \cdot \left[1 + 0,0496 \left(\frac{1,3}{2,1} \right) \right]^2 = 1.814$$

б) Визначення початкового коефіцієнта дифузії хлоридів

$$D_0 = 10^{(-12,06+2,4B/II)} = 10^{(-12,06+2,4 \cdot 0,4)} = 7,943 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$$

в) Визначення часу накопичення критичної концентрації хлоридів на поверхні арматури

$$t_2 = \frac{1}{K_{\text{эф}} \cdot D_0} \left[\frac{x}{2 \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{CR} - C_1}{C_S - C_1} \right)} \right]^2 =$$

$$= \frac{1}{1,814 \cdot 7,943 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}} \left[\frac{0,05 \text{ м}}{2 \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{0,3\% - 0,0\%}{0,55\% - 0,0\%} \right)} \right] \approx 75 \text{ років}$$

3. Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

а) Коефіцієнт варіації матеріалу композитного елемента:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2} = \sqrt{(0,07^2 + 0,023^2)} = 0,135$$

б) Коефіцієнт варіації узагальненого навантаження на елемент:

$$V_Q = \sqrt{\sum_1^m V_{Qi}^2} = \sqrt{(0,033^2 + 0,17^2 + 0,17^2 + 0,24^2 + 0,14^2)} = 0,369$$

в) Математичне очікування узагальненого опору елемента:

$$\mu_R = \frac{M_u}{1 - 1,64V_R} = \frac{7810000 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 - 1,64 \cdot 0,135} = 10,040 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

г) Математичне очікування узагальненого навантаження на елемент:

$$\mu_Q = \frac{M_{max}}{1 + 1,64V_Q} = \frac{3590000 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 + 1,64 \cdot 0,369} = 2,237 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

д) Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$\begin{aligned}\mu_R(\beta) &= -\frac{\mu_Q + \beta \cdot \mu_Q \sqrt{V_Q^2 - V_Q^2 \cdot V_R^2 \cdot \beta^2 + V_R^2}}{V_R^2 \cdot \beta^2 - 1} = \\ &= -\frac{2,237 \text{ МН} \cdot \text{м} + 1,7 \cdot 2,237 \text{ МН} \cdot \text{м} \sqrt{0,369^2 - 0,369^2 \cdot 0,135^2 \cdot 1,7^2 + 0,135^2}}{0,135^2 \cdot 1,7^2 - 1} = \\ &= 3,902 \text{ МН} \cdot \text{м}\end{aligned}$$

є) Характеристична несна здатність $M_{\beta n}$, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$M_{\beta n} = \mu_R(\beta) \cdot (1 - 1,64 V_R) = 3,902 \text{ МН} \cdot \text{м} \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 3,036 \text{ МН}$$

4. 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:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n} = 7,810 \text{ МН} \cdot \text{м} - 3,036 \text{ МН} \cdot \text{м} = 4,773 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

5. Ресурс арматури:

а) Рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_C :

$$\Delta d_C = 2v_C \cdot (t_2 - t_1) = 2 \cdot 0,050 \text{ мм/рік} (75 \text{ років} - 41 \text{ років}) = 3,39 \text{ мм}$$

б) Ресурс арматури:

$$\begin{aligned}t_3 &= \frac{d - \Delta d_C}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (d - \Delta d_C)^2}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right) \right) = \frac{0,005 \text{ м} - 0,00339 \text{ м}}{2 \cdot 0,035 \text{ мм/рік}} \cdot \\ &\cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 29 \text{ МПа} \cdot 2,1 \text{ м}}{1335 \text{ МПа} \cdot \pi \cdot 144 \cdot (0,005 \text{ м} - 0,00339 \text{ м})^2}} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 4,774 \text{ МНм}}{29 \text{ МПа} \cdot 2,1 \text{ м} \cdot (1,185 \text{ м})^2}} \right) \right) \approx \\ &\approx 23 \text{ років}\end{aligned}$$

6. Характеристичний ресурс елемента:

$$T_{cr} = t_2 + t_3 = 75 + 23 = 98 \text{ років}$$

7. Проектна характеристика безпеки:

$$\beta_0 = \frac{\frac{\mu_R}{\mu_Q} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \left(\frac{\mu_R}{\mu_Q}\right)^2 V_R^2}} = \frac{\frac{10,040 \text{ МНм}}{2,237 \text{ МНм}} - 1}{\sqrt{0,369^2 + \left(\frac{10,040 \text{ МНм}}{2,237 \text{ МНм}}\right)^2 0,135^2}} = 4,909$$

8. Коефіцієнт надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = e^{(0,8\beta_0 V_R - 1,645 V_R)} = e^{(0,8 \cdot 4,909 \cdot 0,135 - 1,645 \cdot 0,369)} = 0,926$$

9. Розрахунковий ресурс елемента:

$$T = T_{\text{ст}} \cdot \gamma_t = 98 \text{ років} \cdot 0,926 = 90 \text{ років}$$

Прогнозований строк служби з 95% забезпеченістю складає 90 років, що відповідає директивному показнику у 80 років за ДБН [30].

5.1.5 Приклад оцінки ресурсу залізобетонної плити проїзної частини армованої ненапруженою арматурою

Плита проїзної частини монолітна, висота $h'_{\text{ф}} = 26,0$ 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. Параметри, взяті для прикладу наведено в табл. 5.5-5.7:

Таблиця 5.5 – Параметри захисного шару

Параметр	Значення
Товщина захисного шару x , м	0,02
Концентрація хлорид-іонів на денній поверхні всередині бетону C_s , % від маси в'язучого	0,55
Початкова концентрація хлорид-іонів всередині бетону C_l , % від маси в'язучого	0,0
Концентрація хлорид-іонів на глибині x , необхідна для початку активної корозії арматури C_{CR} , % від маси в'язучого	0,3
Відносна вологість повітря H , %	81
Критична вологість повітря H_c , %	75
Водоцементне співвідношення В/Ц	0,4
Константа активації дифузії (рис 2.2) q	6000

Кінець таблиці 5.5

Параметр	Значення
Нормальна температура K_0 , К	274
Температура повітря в районі будівництва K , К	284,7
Коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні A	-0,0236
Напруження в бетоні σ , МПа	1,1
Граничний опір бетону розтягу f , МПа	2,1
m_0 - реакційна здатність бетону, функція властивостей і кількості цементу в бетоні	0,053
D_e ефективний коефіцієнт дифузії (таб.2.1 згідно СНиП 2.03.11-85 [109]) $\times 10^{-4}$ см ² /с	0,08
C – концентрація діоксиду вуглецю у повітрі на поверхні бетону (від 0,01% до 0,04%)	0,02

Таблиця 5.6 – Конструктивні властивості

Вид зусилля	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	3,00	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	1,16	0,170
Навантаження від тандему, кН·м	23,96	0,240
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК, кН·м	3,09	0,240
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	390	0,07

1. Час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_1 = \frac{m_0 \cdot x^2}{2D_e \cdot C} = \frac{0,25 \cdot (0,02\text{м})^2}{2 \cdot 0,08\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-8} \cdot 0,02\%} \approx 7\text{років},$$

2. Час досягнення критичної концентрації хлоридів на рівні робочої арматури на глибині x :

а) Визначення коефіцієнта ефективності

$$K_{\varepsilon\phi} = \left[1 + \frac{(1-H)^4}{(1-H_c)^4} \right]^{-1} \cdot e^{q\left(\frac{1}{K_0} - \frac{1}{K}\right)} \cdot \left[1 + A\left(\frac{\sigma}{f}\right) \right]^2 =$$

$$= \left[1 + \frac{(1-81\%)^4}{(1-75\%)^4} \right]^{-1} \cdot e^{6000\left(\frac{1}{274} - \frac{1}{284,7}\right)} \cdot \left[1 - 0,0236\left(\frac{1,1}{2,1}\right) \right]^2 = 1,666$$

б) Визначення початкового коефіцієнта дифузії хлоридів

$$D_0 = 10^{(-12,06+2,4B/U)} = 10^{(-12,06+2,4 \cdot 0,4)} = 7,943 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 / \text{с}$$

в) Визначення часу накопичення критичної концентрації хлоридів у поверхні арматури

$$t_2 = \frac{1}{K_{\varepsilon\phi} \cdot D_0} \left[\frac{x}{2 \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{CR} - C_1}{C_s - C_1}\right)} \right]^2 =$$

$$= \frac{1}{1,666 \cdot 7,943 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 / \text{с}} \left[\frac{0,02 \text{ м}}{2 \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{0,3\% - 0,0\%}{0,55\% - 0,0\%}\right)} \right]^2 \approx 13 \text{ років}$$

3. Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

а) Коефіцієнт варіації матеріалу композитного елемента:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2} = \sqrt{(0,07^2 + 0,023^2)} = 0,135$$

б) Коефіцієнт варіації узагальненого навантаження на елемент:

$$V_Q = \sqrt{\sum_1^m V_{Qi}^2} = \sqrt{(0,033^2 + 0,17^2 + 0,17^2 + 0,24^2 + 0,14^2)} = 0,369$$

в) Математичне очікування узагальненого опору елемента:

$$\mu_R = \frac{M_u}{1 - 1,64V_R} = \frac{43,256 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1 - 1,64 \cdot 0,135} = 55,903 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

г) Математичне очікування узагальненого навантаження на елемент:

$$\mu_Q = \frac{M_{max}}{1 + 1,64V_Q} = \frac{21,210 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1 + 1,64 \cdot 0,369} = 19,444 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

д) Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$\begin{aligned} \mu_R(\beta) &= -\frac{\mu_Q + \beta \cdot \mu_Q \sqrt{V_Q^2 - V_Q^2 \cdot V_R^2 \cdot \beta^2 + V_R^2}}{V_R^2 \cdot \beta^2 - 1} = \\ &= -\frac{19,44 \text{ кН} \cdot \text{м} + 1,7 \cdot 19,44 \text{ кН} \cdot \text{м} \sqrt{0,369^2 - 0,369^2 \cdot 0,135^2 \cdot 1,7^2 + 0,135^2}}{0,135^2 \cdot 1,7^2 - 1} = \\ &= 33,912 \text{ кН} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

е) Характеристична несна здатність $M_{\beta n}$, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$M_{\beta n} = \mu_R(\beta) \cdot (1 - 1,64V_R) = 33,912 \text{ кН} \cdot \text{м} \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 26,404 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

4. 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:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n} = 43,526 \text{ кН} \cdot \text{м} - 26,404 \text{ кН} \cdot \text{м} = 17,122 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

5. Ресурс арматури:

а) Рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_C :

$$\Delta d_C = 2v_C \cdot (t_2 - t_1) = 2 \cdot 0,050 \text{ мм/рік} (13 \text{ років} - 7 \text{ років}) = 0,65 \text{ мм}$$

б) Ресурс арматури:

$$\begin{aligned} t_3 &= \frac{d - \Delta d_C}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (d - \Delta d_C)^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right)} \right) = \frac{0,01 \text{ м} - 0,0065 \text{ м}}{2 \cdot 0,035 \text{ мм/рік}} \cdot \\ &\cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 29 \text{ МПа} \cdot 1 \text{ м} \cdot 0,24 \text{ м}}{390 \text{ МПа} \cdot \pi \cdot 6 \cdot (0,005 \text{ м} - 0,00065 \text{ м})^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 17,122 \text{ кН} \cdot \text{м}}{29 \text{ МПа} \cdot 1,0 \text{ м} \cdot (0,24 \text{ м})^2}} \right)} \right) \approx \\ &\approx 35 \text{ років} \end{aligned}$$

6. Проектний ресурс елемента:

$$T_{cr} = t_2 + t_3 = 13 + 34 = 47 \text{ років}$$

7. Проектна характеристика безпеки:

$$\beta_0 = \frac{\frac{\mu_R}{\mu_Q} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \left(\frac{\mu_R}{\mu_Q}\right)^2 V_R^2}} = \frac{\frac{10,040 \text{ МНм}}{2,237 \text{ МНм}} - 1}{\sqrt{0,369^2 + \left(\frac{10,040 \text{ МНм}}{2,237 \text{ МНм}}\right)^2 0,135^2}} = 4,909$$

8. Коефіцієнт надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = e^{(0,8\beta V_R - 1,645V_R)} = e^{(0,8 \cdot 3,501 \cdot 0,135 - 1,645 \cdot 0,369)} = 0,962$$

9. Розрахунковий ресурс елемента:

$$T = T_{cr} \cdot \gamma_t = 47 \text{ років} \cdot 0,962 = 46 \text{ років}$$

Прогнозований строк служби з 95% забезпеченістю складає 46 років, що менше директивного показника у 80 років за ДБН [30].

5.2 Стохастичний підхід

5.2.1 Алгоритм прогнозу ресурсу

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, К; W_c – водоцементне співвідношення; σ – напруження в бетоні на рівні арматури, МПа; R_{btser} – тимчасовий опір бетону розтягу, МПа; A_c – коефіцієнт, що залежить від типу напружень в бетоні (-0,0236 при стисканні, +0,0496 при розтязі); 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; $\Delta h_{\text{ряд}}$ – відстань між рядами армування, м; V_{corC} – швидкість корозії в карбонізованому бетоні, мм/рік; V_{corCL} – швидкість корозії в бетоні, насиченому хлоридами, мм/рік; M_{Pn} – характеристичний згинальний момент від тандему АК; M_{vn} – характеристичний згинальний момент від смугового навантаження АК; M_{Hn} – характеристичний згинальний момент від натовпу на тротуарах; M_{Hn} – 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).

1. 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.

2. Визначення зміщення фронту карбонізації $X_{\text{C},i}$ та хлоридизації $X_{\text{Cl},i}$

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

4. 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 1-3 повторюються, поки $M_{ui} \geq M_i$. Записується кількість кроків i – кількість місяців до вичерпання ресурсу.

Кроки 1-4 повторюються N_{cicle} разів. Будуються гістограми результатів.

Алгоритм реалізовано в програмному комплексі MathCAD (Додаток Б).

Приклад та аналіз алгоритму наведено в розділі 3.

5.3 Прогноз залишкового ресурсу елементів мостів в експлуатації

Для прогнозування залишкового ресурсу залізобетонних елементів мостів в експлуатації необхідно на основі даних вишукувань визначити глибину карбонізації та глибину насичення хлоридами захисного шару, та, у разі наявності ознак корозійного ушкодження арматури, зміну її діаметру від корозії.

5.3.1 Приклад оцінки залишкового ресурсу залізобетонної плити проїзної частини армованої ненапруженою арматурою

Параметри, взяті для прикладу наведено в таб.5.7-5.8:

Таблиця 5.7 – Параметри захисного шару

Параметр	Значення
Вік елемента від початку експлуатації t_{ln} , років	5
Товщина захисного шару x , м	0,02
Товщина карбонізованого шару бетону x_c , м	0,012
Відстань від денної поверхні до бетону насиченого хлоридами до критичної концентрації (0,3% від маси в'язучого) x_{CL} , м	0,008
Зміна діаметру робочої арматури в наслідок корозії, мм	0,0мм

Таблиця 5.8 – Конструктивні властивості

Вид зусилля	Значення зусиль	Коеф. варіації V_x
Перша частина постійного навантаження (Власна вага), кН·м	3,00	0,033
Друга частина постійного навантаження (Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів), кН·м	1,16	0,170
Навантаження від танделу, кН·м	23,96	0,240
Рівномірно-розповсюджене навантаження АК, кН·м	3,09	0,240
Нормативний опір арматури розтягу R_{sn} , МПа	390	0,07

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 100мм) 5 см.

1. Залишковий час карбонізації захисного шару визначимо залежністю:

$$t_1 = x / \left(\frac{x_c}{t_{in}} \right) = 0,02\text{м} / \left(\frac{0,012\text{м}}{5\text{років}} \right) \approx 8\text{років},$$

2. Час досягнення критичної концентрації хлоридів на рівні робочої арматури на глибині x :

$$t_2 = x / \left(\frac{x_{cl}}{t_{in}} \right) = 0,02\text{м} / \left(\frac{0,008\text{м}}{5\text{років}} \right) \approx 13\text{років}$$

3. Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

- а) Коефіцієнт варіації матеріалу композитного елемента:

$$V_R = \sqrt{\sum_1^m V_{Ri}^2} = \sqrt{(0,07^2 + 0,023^2)} = 0,135$$

- б) Коефіцієнт варіації узагальненого навантаження на елемент:

$$V_Q = \sqrt{\sum_1^m V_{Qi}^2} = \sqrt{(0,033^2 + 0,17^2 + 0,17^2 + 0,24^2 + 0,14^2)} = 0,369$$

- в) Математичне очікування узагальненого опору елемента:

$$\mu_R = \frac{M_u}{1 - 1,64V_R} = \frac{43,256 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1 - 1,64 \cdot 0,135} = 55,903 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

- г) Математичне очікування узагальненого навантаження на елемент:

$$\mu_Q = \frac{M_{max}}{1 + 1,64V_Q} = \frac{21,210 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1 + 1,64 \cdot 0,369} = 19,444 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

- д) Математичне очікування несної здатності, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$\begin{aligned}\mu_R(\beta) &= -\frac{\mu_Q + \beta \cdot \mu_Q \sqrt{V_Q^2 - V_Q^2 \cdot V_R^2 \cdot \beta^2 + V_R^2}}{V_R^2 \cdot \beta^2 - 1} = \\ &= -\frac{19,44 \text{кН} \cdot \text{м} + 1,7 \cdot 19,44 \text{кН} \cdot \text{м} \sqrt{0,369^2 - 0,369^2 \cdot 0,135^2 \cdot 1,7^2 + 0,135^2}}{0,135^2 \cdot 1,7^2 - 1} = \\ &= 33,912 \text{кН} \cdot \text{м}\end{aligned}$$

є) Характеристична несна здатність $M_{\beta n}$, що відповідає граничній характеристиці безпеки β :

$$M_{\beta n} = \mu_R(\beta) \cdot (1 - 1,64 V_R) = 33,912 \text{кН} \cdot \text{м} \cdot (1 - 1,64 \cdot 0,135) = 26,404 \text{кН} \cdot \text{м}$$

4. 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:

$$\Delta M_n = M_{0n} - M_{\beta n} = 43,526 \text{кН} \cdot \text{м} - 26,404 \text{кН} \cdot \text{м} = 17,122 \text{кН} \cdot \text{м}$$

5. Ресурс арматури:

а) Рівняння зміни діаметру арматури від корозії арматури в умовах карбонізованого бетону Δd_C :

$$\Delta d_C = 2v_C \cdot (t_2 - t_1) = 2 \cdot 0,050 \text{ мм/рік} \cdot (13 \text{ років} - 8 \text{ років}) = 0,5 \text{ мм}$$

б) Ресурс арматури:

$$\begin{aligned}t_3 &= \frac{d - \Delta d_C}{2 \cdot v_{corr}} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_{bn} \cdot b}{R_{sn} \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (d - \Delta d_C)^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot \Delta M_n}{R_{bn} \cdot b \cdot h_{01}^2}} \right)} \right) = \frac{0,01 \text{м} - 0,005 \text{м}}{2 \cdot 0,035 \text{мм/рік}} \cdot \\ &\cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 29 \text{МПа} \cdot 1 \text{м} \cdot 0,24 \text{м}}{390 \text{МПа} \cdot \pi \cdot 6 \cdot (0,005 \text{м} - 0,0005 \text{м})^2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 17,122 \text{кН} \cdot \text{м}}{29 \text{МПа} \cdot 1,0 \text{м} \cdot (0,24 \text{м})^2}} \right)} \right) \approx \\ &\approx 33 \text{роки}\end{aligned}$$

6. Проектний ресурс елемента:

$$T_{cr} = t_2 + t_3 = 13 + 33 = 46 \text{ років}$$

7. Проектна характеристика безпеки:

$$\beta_0 = \frac{\frac{\mu_R}{\mu_Q} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \left(\frac{\mu_R}{\mu_Q}\right)^2 V_R^2}} = \frac{\frac{10,040\text{МНм}}{2,237\text{МНм}} - 1}{\sqrt{0,369^2 + \left(\frac{10,040\text{МНм}}{2,237\text{МНм}}\right)^2 0,135^2}} = 4,909$$

8. Коефіцієнт надійності строку служби γ_t :

$$\gamma_t = e^{(0,8\beta V_R - 1,645V_R)} = e^{(0,8 \cdot 3,501 \cdot 0,135 - 1,645 \cdot 0,369)} = 0,962$$

9. Залишковий ресурс елемента:

$$T' = T_{cr} \cdot \gamma_t - 5 \text{ років} = 46 \text{ років} \cdot 0,962 - 5 \text{ років} = 39 \text{ років}$$

Прогнозований залишковий строк служби з 95% забезпеченістю складає 39 років.

5.4 Висновки до розділу 5.

1. Запропоновано імовірнісне трактування прогнозу ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів.

2. Вперше запропонована практична інженерна методика прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів. Методика в повній мірі відповідає національним нормам ДБН В.1.2-14:2009 [26] та Єврокоду [35,159]. Запропонована методика 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.

3. Приклад оцінки ресурсу, наведений в п.5.2.4 демонструє можливість практичної реалізації імовірнісної інженерної методики прогнозування ресурсу

залізобетонних згинаних елементів мостів без використання спеціального програмного забезпечення. Прикладом доведена адекватність методики, та ґрунтуючись на результатах даних, наведених в п.3.5 можна стверджувати, що враховуючи узагальнюючі припущення, наведені в п.2.1., результати прогнозу довговічності за імовірнісною інженерною методикою дають результати для елементів армованих каркасною арматурою в межах 10%, а попередньо напружених в межах 15% від даних натурних спостережень.

4. Вперше запропонована стохастична методика прогнозування ресурсу залізобетонних згинаних елементів мостів, що об'єднує в єдине ціле імовірнісний характер змінних, які входять в основні рівняння, описуючи фізико-механічні властивості перерізу і стохастичні процеси впливу зовнішніх факторів та фізико-хімічних процесів деградації матеріалів. Наведеним прикладом доведена реалістичність результатів, ґрунтуючись на результатах натурних спостережень, наведених в п.3.5. Запропонована стохастична методика реалізована в програмному комплексі MathCAD. Проектувальник за допомогою програми, наведеної в додатку Д.Б може отримати ресурс елемента співставний з результатами натурних спостережень. Стохастична методика та її реалізація, безумовно вимагають використання більш складного розрахункового апарату, проте є точнішою ніж імовірнісна інженерна методика.

5. Наведений приклад п.5.4.1 прогнозу ресурсу елементів мостів демонструє можливість використання запропонованої моделі на всіх етапах життєвого циклу. Приклад демонструє, що наявність даних поточного обстеження дає можливість уточнювати і корегувати до певної міри результати прогнозування. Таким чином проведення поточних ремонтів, нанесення захисних покриттів, поява аварійних ушкоджень можуть бути внесені в параметри моделі.

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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексеев С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
2. Долговечность железобетона в агрессивных средах/ [Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисиль П.] – М.: Стройиздат, 1990 – 130 с.
3. Анисимов А.В. Деградационные процессы в железобетоне мостовых конструкций. Методы оценки и прогнозирования: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.03 / А.В. Анисимов. – Пенза, 2003. – 186 с.
4. Аугусти Г. Вероятностные методы в строительном проектировании/ Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Пер. с англ. Ю.Д.Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
5. Бабушкин В.И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа / Бабушкин В.И. – Харьков, 1989 – 132 с.
6. Бекман И.Н. Математика диффузии / Бекман И.Н. – М.: Московский государственный университет, 2004. – 101 с.
7. Бліхарський З.Я. Моделювання корозійних руйнувань залізобетонних балок в агресивному середовищі / Стащук М.Г., Малик О.М. // Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. – Донецьк, 2003. – Вип. 6. – С. 48–55.
8. Богданов Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Козин Ф. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
9. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / Болотин В.В. – М.: Стройиздат, 1981.– 351с.
10. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / Болотин В.В. – М.: Стройиздат, 1971. – 255 с.
11. Бондаренко В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / Бондаренко С.В. – М.: Стройиздат, 1981. – 210 с.

12. Васильев А.И. Вероятностная оценка остаточного ресурса физического срока службы железобетонных мостов / Васильев А.И. – Сб. Труды ЦНИИС, вып. №208. – М.: 2002, – С. 101 – 120.
13. Васильев А.И. Прогноз коррозии арматуры железобетонных конструкций автодорожных мостов в условиях хлоридной агрессии и карбонизации / А.И. Васильев, А.М. Подвальный // Бетон и железобетон. – М.: 2002. – №6.– С. 27-32.
14. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються: ВБН В.3.1-218-174-2002 – К. Державна служба автомобільних доріг України, 2001. – 74 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.
16. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
17. Венцель Е. С. Теория вероятностей: Учебник для студ. Вузов [Текст] / Елена Сергеевна Венцель. – 10-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 576 с.
18. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : спец. 05.22.11 – автомобільні дороги і аеродроми. – К.: 2005. – 26 с.
19. Гамеляк І.П. Оценка эксплуатационной надежности конструкций дорожных одежд городских улиц и дорог / Гамеляк І.П. // Материалы международной НПК «Проблемы надежности дорожных одежд городских улиц и дорог». – Минск: БНТУ, 2005.
20. Глагола І.І. Методи визначення корозійної тривкості, довговічності та антикорозійний захист залізобетонних конструкцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – К.: 2004. – 24 с.
21. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / Гмурман В.Е. – М.: Изд. "Высшая школа". 1971. – 368 с.

22. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей / Гнеденко Б.В. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
23. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. – М.: НАУКА, 1965. – 524 с.
24. Гордеев В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. / [Гордеев В.Н., А.И. Лантух-Лященко, А.В.Махинько, В.А.Пашинский, А.В.Перельмутер, С.Ф. Пичугин. Под общей ред. А.В.Перельмутера] – 4 изд. переработ. – М.: издательство СКАД СОФТ, издательство АСВ, издательство ДКМ Пресс, 2014 – 250 с.
25. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Гутман Э.М.. – М.: Металлургия, 1981. – 281 с.
26. Загальні принципи забезпечення надійності та безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009 – К.: Мінрегіонбуд. «Укрархбудінформ», 2009 – 75 с.
27. Мости і труби. Основні вимоги проектування: ДБН В.1.3-22 - 2009 – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 100 с.
28. Мости і труби. Правила проектування: ДБН В.1.3-14: 2006. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства. 2006 – 80 с.
29. Мости і труби. Правила проектування: ДБН В.2.3-14: 2006. – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства. –2006.
30. Мости і труби. Основні вимоги проектування: ДБН В.2.3-22-2009 – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 120 с.
31. Дехтяр В.Г. До проблеми оцінки зносу елементів моста / Дехтяр В.Г., Лантух-Лященко А.І. // 3б. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип.59. Український транспортний університет. – Київ, 2000. – с. 33–36.
32. Дехтярь А.С. Оптимальні терміни й об'єми ремонтів залізобетонних мостів / Дехтярь А.С. // 3б. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Вип.3., –Львів: Каменяр, 2001. – с. 83–86.

33. Долговечность судостроительных бетонов и корпусов плавучих железобетонных доков, эксплуатируемых в морях с различными климатическими условиями / Мишутин В.А. – М.: ЦНИИ „Румб”, 1986. – 123 с.
34. Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні вимоги: ДСТУ Б В.2.6-145:2010 – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 120 с.
35. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT) : ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. [Текст] : Уведено вперше ; чинний від 2013-07-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 116 с.
36. Державний стандарт України. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1–27: 2010. – К.: Укрархбудінформ, 2011. – 123 с.
37. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» : ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2009 – К.: Мінрегіонбуд України 2009. – 50 с.
38. Єврокод 1. /Основи проектування і дії на споруди./ Частина 1. Основи проектування. Європейська Комісія з стандартизації. 1997. [Переклад Г. Фукс, Р.Вовчук.] – К.: Вид. УТУ.– 2000. 61 с.
39. Зеленцов Д.Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы / Зеленцов Д.Г. – Днепропетровск: УХГТУ, 2002. – 167 с.
40. И.Н.Бекман, Математика диффузии. Лекции. / И.Н.Бекман, – М.: МГУ. 2004. – 150 с.
41. Иванов Ф.М. Длительные испытания бетона в растворах хлористых солей / Ф.М. Иванов, Н.Н. Янбых // Бетон и железобетон. – 1982. – № 6. – С. 26–27.
42. Игнатьев Г.А.Защита техники от коррозии, старения и биоповреждений. Справочник / Игнатьев Г.А., Михайлова А.А. – М., 1987. – 210 с.
43. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов./ Иосилевский Л.И. – М.: НИЦ «Инженер», 1999. – 294 с.
44. Карпенко Л.И. Общие модели механики железобетона / Карпенко Л.И. – М.: Стройиздат, 1996. – 185 с.

45. Карпунин В.Г. К расчету пластин и оболочек с учетом общей коррозии. Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин / Карпунин В.Г., Клещев С.И., Корнишин М.С. – т.1, Тбилиси: 1975. – С.166 – 174.
46. Кинд В. А. Деформации усадки и набухания при твердении портландцементов различного химического состава / Кинд В. А., Огороков С. Д., Вольфсон С. Л. –1937 – № 8 – М.:«Цемент», 1937. № 8 – 126 с.
47. Коваль П.Н. Внедрение аналитической экспертной системы управления мостами в Украине. / Коваль П., Лантух-Лященко А., Сидун С. // Материалы юбилейной научно-технической конференции 80 лет Белорусской дорожной науке 1928-2008 – Минск, 2008. – С. 156–165.
48. Коваль П.М. Економічна доцільність вторинного захисту залізобетонних мостових конструкцій / Коваль П.М., Парубець М.Г., Шкуратовський А.О., Колесник Д.Ю. // Автошляховик України. – 2005. – №4. – С. 34–39.
49. Кожушко В. П. Моделювання споруд на автомобільних дорогах для оцінки їх напружено-деформованого стану: : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Х., 2007. – 30 с.
50. Колесник Д.Ю. Карбонізація захисного шару бетону несучих конструкцій мостів / Колесник Д.Ю., Парубець М.Г., Коваль П.М., Колесник Ю.Р. // Автошляховик України. – 2005. – №1. – С. 34-36.
51. Коррозия. Справочник / Под ред Шрайера Л.Л. – М.:Металлургия, 1981. – 632 с.
52. Лантух-Лященко А.І. До оцінки технічного стану автодорожніх мостів/ Лантух-Лященко А.І., В.Б.Назаренко // 3б. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип.59. Український транспортний університет. Київ – 2000. – с. 149 – 152.
53. Лантух-Лященко А.І. Вероятностная модель оценки технического состояния и прогноза остаточного ресурса элементов автодорожных мостов / Лантух-Лященко А.І. – М.: Дороги и мосты. Российский дорожный научно-исследовательский институт. 2007. – с. 103–111.

54. Лантух-Лященко А.І. Визначення часу переходу елементів споруди із одного дискретного стану в інший / Лантух-Лященко А.І. // Зб. Наукових праць: Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів. Вип. 12, Київ – 2001. – с. 397-402.
55. Лантух-Лященко А.І. До проблеми оцінки зносу елементів моста // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: Український транспортний університет, 2000. – Вип.59. – с. 33 – 36.
56. Лантух-Лященко А.І. До проекту державних будівельних норм з оцінки технічного стану мостів. // Зб. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – Вип.1., Львів: Каменярь, 2000. – с. 78–83.
57. Лантух-Лященко А.І. Марковские модели накопления повреждений. / Лантух-Лященко А.І. // Наука и искусство. Промислове будівництво та інженерні споруди – К.: 2009 – №2. – с. 22–25.
58. Лантух-Лященко А.І. Модель визначення надійності прогонової будови в умовах неповної інформації / Лантух-Лященко А.І. //Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип.61. – К.:, 2001 – с. 46–54.
59. Лантух-Лященко А.І. О прогнозе остаточного ресурса моста / Лантух-Лященко А.І. // Зб. Дороги і мости. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – вип. 7, т.2. – с.3–9.
60. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами / Лантух-Лященко А.І. //Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 1999, вип.57 – с.183–188.
61. Лантух-Лященко А.І. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений / Лантух-Лященко А.І. // Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», – М.: МИИТ, 2006. – с. 259–265.
62. Лучко Й.Й. Методи оцінки тріщиностійкості та довговічності залізобетонних елементів конструкцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : спец. 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла – К.: 1999. – 25 с.

63. Лучко Й.Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій і споруд / Лучко Й.Й., Глагола І.І., Козаревич Б.Л. – Львів: Каменяр, 1999.–185 с.
64. Мамажанов Р.К. Коррозия арматуры в железобетонных пролетных строениях мостов / Р.К. Мамажанов, О.И. Дубинчик. Трансп.: Наука, техн., упр. 2000. – №6. – с. 50.
65. Маринин А.Н. Исследование наличия хлоридов и карбонизации в бетоне российских автодорожных мостов / А.Н. Маринин // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. науч. тр. Междунар. науч.-метод. межвуз. семинара. — Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2006. – С. 271–276.
66. Маринин А.Н. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния железобетонных мостовых пролетных строений с учетом хлоридной коррозии и карбонизации. дис. ... кандидата техн. наук : 05.23.11 / Маринин Александр Николаевич. – Волгоград., 2007. – 383 с.
67. Маринин А.Н. Сравнительный анализ различных моделей проникания агрессивных сред в железобетонные элементы конструкций / Маринин А.Н. // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Всероссийской научной конференции, 26-28 мая 2004 г. Ч. 1. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2004. – 276 с.
68. Маринин М.Н. О построении кинетической модели карбонизации железобетонных конструкций транспортных сооружений / Маринин М.Н. // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Третьей Всероссийской научной конференции. Ч.1: Самара. – СамГТУ, 2006. – с. 145–148.
69. Минас А.И. К вопросу о механизме корроирования строительных материалов солями и щелочами // Доклад на Всесоюз. науч.-техн. совещ. По солевой коррозии. – Минск, 1965. – С. 50-58.

70. Мкртычев О.В. Построение плотности распределения несущей способности инженерных конструкций / О.В. Мкртычев, О.Е. Саргсян // Транспортное строительство. - 2000. - №4. – С.11 – 13.
71. Мозговий В.В. Підвищення довговічності асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг і аеродромів за рахунок застосування нових полімерних матеріалів / Мозговий В.В., Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф. // Зб. Дороги і мости, вип. 12. – К.: 2010, – с. 140 – 144.
72. Москвин В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / [Москвин В.М. и др.] – М., 1980. – 175с.
73. Настанови з визначення технічного стану мостів ТАУ / [В.І.Кир'ян, П.М.Коваль та ін.]. – Вид. "Логос", К.: 2001. – 117 с.
74. Нерепст П. Воздействие мороза на бетон / Нерепст П. // IV Международный конгресс по химии цемента – М.: Стройиздат, 1964.
75. Никитин В.И. Расчет жаростойкости металлов / В.И. Никитин. – М.: Металлургия, 1976. – 208 с.
76. Овчинников И.Г. Расчет элементов конструкций с наведенной неоднородностью при различных схемах воздействия хлоридсодержащих сред / И.Г. Овчинников, Н.С. Дядькин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. – 220 с.
77. Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. пос. в 4-х т. под. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988-1990 – 230с.
78. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / Перельмутер А.В. – К.:Изд. УкрНИИпроектстальконструкция. 2000. – 215 с.
79. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных кон-струкций. / Перельмутер А.В. – М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2007. – 185с.
80. Перельмутер А.В. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / [Перельмутер А.В., Гордеев В.Н. , Горохов Є.В. та ін. За ред. А.В.Перельмутера] – К.: Вид-во «Сталь», 2002.

81. Пирадов К.А. Механика разрушения железобетона / Пирадов К.А., Гузеев Е.А. – М.: 1998. – 171с.
82. Визначення ресурсу з використанням параметра пошкоджуваності при багатоцикловому навантаженні / Пискунов С.О , Гуляр О.І., Мицюк С.В. // ISSN 0132-1471. Опір матеріалів і теорія споруд. – 2009 – № 84 – с. 20 -31.
83. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий / Пичугин С.Ф. – Полтава: ООО «АСМИ», 2009. – 452 с.
84. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий. – Полтава: ООО АСМИ, 2009.
85. Плудек В. Защита от коррозии на стадии проектирования / Плудек В. – М.: Стройиздат, 1980. – 153 с.
86. Полак А.Ф. Физико-химические основы коррозии железобетона / Полак А.Ф. – Уфа, 1982. – 164 с.
87. Попеско А.И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии / А.И. Попеско. – СПб.: СПб гос. Архит.-строит. ун-т, 1996. – 182 с.
88. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Зб. наукових статей. Науковий керівник - академік НАН України Б.Є.Патон. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. – К.: 2006. – 85 с.
89. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: Монография / Л.М. Пухонто. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 424 с.
90. Особенности расчетных моделей воздействий окружающей среды на ограждающие конструкции зданий большой этажности/ Пухонто Л. М., Вишняков Д. К. // Сб. докл. науч.-техн. конф. профессорско-преподават. состава ф-та ПГС. – М : МГСУ, 2004. – с. 43-49
91. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании / Райзер В.Д. – М.: изд-во АСВ, 1998. – 304 с.
92. Расулов И.Р. О математическом прогнозировании коррозионного разрушения конструкций в агрессивных средах / И.Р. Расулов, Э.М. Гасымов,

ЛТ.Р. Абдурахманов // Уч. записки Азерб. инж.-стр. ин-та. Баку, 1978. – Серия Х. – С. 147–151.

93. Редченко В.П. Моніторинг технічного стану мостів методами пасивної вібраційної діагностики / В. П. Редченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2010. – Вип. 33. – С. 223-227

94. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении – М.: Стройиздат, 1990. – 160с.

95. Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. – М.: Всесоюзный Ордена Октябрьской революции Научно-исследовательский Институт Транспортного Строительства. – 1989. – 58 с.

96. Определение коэффициента запаса прочности сооружений / Ржаницын А.Р. // Строительная промышленность – М.: 1947 – № 8.– с. 17-25.

97. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / Ржаницын А.Р. – М.: Стройиздат. – 1978. – 239 с.

98. Ржаницын А. Р. Применение статистических методов в расчётах сооружений на прочность и безопасность [Текст] / А.Р.Ржаницын // Строительная промышленность. – 1952. – №6. – С. 22–25.

99. Розенталь Н.К. Коррозионные процессы в модифицированных бетонах. / Розенталь Н.К. – Донецьк: Зб. Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. 2003. – С. 129 – 133.

100. Руководство по определению диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1974. – 20с.

101. Рысева О.П. Долговечность изделий из железобетона для промзданий на Крайнем Севере с эксплуатационной средой, содержащей хлор: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05, 05.23.01/ Киевский инж.-строит. ин-т.- Киев, 1990.– 19 с.

102. Савицький М.В. Основи розрахунку надійності залізобетонних конструкцій в агресивних середовищах [Текст] : Автореф. дис... д-ра техн. наук: / Савицький Микола Васильович ; Дніпропетровський інженерно-будівельний ін-т. – Дніпропетровськ, 1994. – 41 с.
103. Савицький М.В. Методика обстеження та оцінки технічного стану залізобетонних конструкцій відповідальних об'єктів / Савицький М.В., Т.Ю. Шевченко, А.О. Титюк, О.М. Савицький – Л.: Вид-во «Львівська політехніка», 2010. – 152 с.
104. Проектирование долговечности бетонных конструкций / Сарья А., Весикари Е. // Докл. техн. комитета RILEM 130-CSL. Центр технических исследований Финляндии. – 1994.
105. Сафрончик В.І. Захист від корозії будівельних конструкцій і технологічного устаткування/ Сафрончик В.І. – Л., 1988. – 153 с.
106. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера / Сигорский В.П.– М.: "Техника", 1977. – 768 с.
107. Скрамтаев Б. Г. Исследование выносливости бетонов / Скрамтаев Б. Г., Шубенкин П. Ф., Баженов Ю. М. // «Бетон и железобетон» – 1964 – № 12.–с.23-31
108. Мосты и трубы СНиП 1.05.03-84 – М.: Госстрой СССР.ЦИТП. 1985.
109. Защита строительных конструкций от коррозии СНиП 2.03.11-85, – М.: Госстрой СССР.ЦИТП. 1985.
110. Строительная климатология. СНиП 23-01-99. — М.: Госстрой России, 2002. – 58 с.
111. Експлуатація і реконструкція мостів. Підручник. Друге видання. / [Страхова Н.Є. та ін. Наукове редагування Лантух-Лященко А.І.] – УТУ, ТАУ. Вид.: “Донеччина”, 2002, 402 с.
112. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициентов запаса прочности сооружений / Стрелецкий Н.С. – М.: Стройиздат, 1947. – 164с.
113. Таха Хамаді А. Введение в исследование операций. / Таха Хамаді А. –М.: "МИР", 1985. –Т.1 – 1985 – 479 с.

114. Таха Хамаді А. Введение в исследование операций. / Таха Хамаді А. – М.: "МИР", 1985. – Т.1 – 1985 – 495 с.
115. Усаковский С.Б. Прикладные задачи теории сооружений. О новой парадигме теории расчета сооружений: монография / Усаковский С.Б. – К.: КНУСА, 2014. – 145 с.
116. Фаль А.Е. Дослідження акустичної емісії залізобетону під час електрохімічної корозії / П.М. Коваль, П.М. Сташук, А.Е. Фаль, А.В. Коротич // Будівництво України. – 2005. – №8. – С. 8–11. – ISSN 0135-1699
117. Прогноз опасности грунтовой коррозии для стальных сооружений / Цикерман Л. Я., Штурман Я. Г. // Защита металлов – 1967. – № 2. – С. 243–244.
118. Оценка остаточного ресурса по мере функционального состояния эксплуатирующихся железобетонных конструкций / Чернявский В.Л., Гиль Ю.Б. // 36. наукових праць Луганського національного університету – Луганськ: вид. ЛНАУ, 2004. – № 40 (52). – С. 279 -285.
119. Чернявський В.Л. Підвищення антикорозійних властивостей бетону / Чернявський В.Л. – К., 1983. – 128 с.
120. Чехов А.П. Захист будівельних конструкцій від корозії. / Чехов А.П., Глущенко В.М. – К., 1994. – 164 с.
121. Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций / Чирков В.П. – М.: Транспорт, 1980. – 133 с.
122. Оценка состояния автодорожных мостов и прогнозирование его изменения с помощью показателей физического износа / Шестериков В.И. // Инф. Сб. «Автомобильные дороги». – М.: ЦБ НТИ Росавтодор, 1991. – с.1–48.
123. Шестоперов С. В. Долговечность бетона транспортных сооружений / Шестоперов С. В. – М.: «Транспорт», 1966. – 143с.
124. Шкуратовський А.О. Вплив довкілля на довговічність залізобетонних мостів і методи її підвищення / Шкуратовський А.О., Коротич А.В. // 36. "Автомобільні дороги і дорожнє будівництво" – Київ, УТУ, 2000. – вип. 59 – с. 236–240.

125. Юхневич Р. Техника борьбы с коррозией / [Юхневич Р. и др.] – Л., 1978. – 183 с.
126. 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.
127. Яцко Ф.В. Прогноз довговічності залізобетонних елементів мостів. Статистичний підхід / Яцко Ф.В. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2010. – № 664. – С. 371–378.
128. 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.
129. Яцко Ф.В. Чутливість моделі деградації залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // Вісник ХНАДУ. – Харків, 2012. – № 58. – С. 124–129.
130. 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.
131. 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.
132. 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.
133. Яцко Ф.В. До проблеми прогнозу ресурсу залізобетонних елементів мостів / Яцко Ф.В. // Збірник наукових праць ДАЗТ. – Харків, 2015. – № 151. – С. 150–158.

134. Amey, S.L. A methodology for predicting service life of concrete structures exposed to marine environments / Amey, S.L.; Johnson, M.A.; et al – ACI SP-163, Detroit, USA.
135. Ann V.S. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete / Ann V.S., Roberto V.S. // ACI Material Journal. – 1993 – 90(5) – 441-451 p.
136. Bachoum M. /Traffic Actions for the Design of Long and Medium Span Road Bridges. A Comparison of International Codes// – IABSE Colloquium. – Basis of Design and Actions on Structures – Delft: 1996. –Vol. 74. – pp 541-550.
137. Bamforth P.B. Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments / P.B. Bamforth // Proc/ 4th Int. simp, on corrosion of reinforcement in concrete construction. – Cambridge, 1996. – P. 176–188.
138. Berke N.S. Predicting chloride profiles in concrete / N.S. Berke, M.C. Hicks // Corrosion (USA). – 1994. – 50.№ 3. – P. 234–239.
139. Cairns, J. Prediction of the ultimate state of degradation of concrete structures / Cairns, J.; Law, D.; // Proceeding of ILCDES –2003, Kuopio – pp169-174, 2003.
140. CEB-FIP “Model Code 1990” / Thomas Telford – 1993 CEB-FIP, – 437 pp.
141. Collepardi M. The Kinetics of Chloride Ions Penetration in Concrete / Collepardi M., Marcialis A., Turriziani R.: // *II cemento* – 1970.– Vol. 67 – pp. 157–164,
142. Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes / Collepardi, M., Marcialis, A., and Turriziani, R. // Journal of American Ceramic Research Society, – 1972. – V55, No. 10, – pp 534–535.
143. Cornell, A.C. A Probability Based Structural Code // ACI Journal No. 12, Proceedings – 1969 – V 66 – pp 46–52.
144. Crank, J. The mathematics of diffusion. Second edition / Crank, J. – Clarendon Press. Oxford, UK 1968. – 215 p.
145. Ditlevsen O. Structural Reliability Methods / Ditlevsen O., Madsen H.O. – John & Wiley Sons Ltd, Chichester, 1996. – 185 p.
146. Durability design of concrete structures – RILEM Report 14 / Edited by A. Sarja and E. Vesikari. – London : Taylor & Francis, 1996. – 93 p.

147. DuraCrete, Probabilistic Methods for Durability Design, Document *BE95 – 1347/R0*, The European Union – Brite EuRam III, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, CUR, Gouda, 1999.
148. Eurocode: Basis of Structural Design: EN 1990-2001. – Brussels: CEN, 2001.– 89p.
149. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization. – Brussels : European Committee for Standardization, 2004. – 225 p.
150. EuroLightCon; Chloride penetration into concrete with lightweight aggregates. Document BE96-3942/R2, Project BE96-3942, 1998.
151. Folic R. Durability design of concrete structures – Part 1: Analysis fundamentals [Текст] / R. Folic // Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering. – 2009. – Vol. 7, No 1. – P. 1-18.
152. Frangopol D. Reliability-Based Life-Cycle Management of Highway Bridges / Frangopol D. et al. // Journal of computing in Civil Engineering –January (2001), –pp. 27-34.
153. Gehlen C. Probabilistische Lebensdauersbemessung von Stahlbetonbauwerken / C. Gehlen. – Aachen: Dtsch. Ausschuss Stahlbeton, 2000. –№510.– 106 s.
154. Hartt W. Critical Literature Review of High-Performance Corrosion. Reinforcements in Concrete Bridge Applications / Hartt W., Powers R., Leroux V., Lysogorski D.K. // Center for Marine Materials. – Florida Atlantic University, 2004. – 53 p.
155. HETEK 83, – Theoretical background: A System for estimation of Chloride ingress into Concrete, Report No. 83, 1997.
156. Hobbs D.W. Chloride ingress and chloride-induced corrosion in reinforced concrete members // Proc. 4 Int. Symp. On Corrosion of Reinforcement in concrete construction/ - Cambridge, 1996. — P. 124-135.
157. Inoue Y. Simple monitoring system for concrete structure / Y. Inoue, Y. Kosaka, A. Koshiba // First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. – Barcelona, 2002. – 8p.

158. General principles on reliability for structures ISO 2394. – European Committee for Standardization. Brussels.1998: – 62 p.

159. General principles on reliability for structures. ISO 2394:1998 / Geneva : International Organization for Standardization, 1998. – 73 p.

160. 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-LIASCHENKO, Kostiantyn MEDVEDIEV // 8-th international conference AMCM 2014. Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures: тези доповідей. – Wroclaw, 2014. – P. 194.

161. Lantoukh-Liachtchenko A.I. Reliability based Service Life Prediction of Concrete Bridge Superstructures Proceeding “EKO MOST 2006. Durable bridge structures in the environment”, Kielce, 16-17 May 2006/ WARSZAWA 2006. – ISBN 83-89252-85-6: p. 255-261.

162. Lay S.: Service Life Design of Reinforced Concrete Structures Exposed to Deicing Salts –A Case Study, Proceedings of “3rd International IABMAS Workshop on Life-Cycle Cost.Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems and fib WP 5.3-1, TG 5.6 The Joint.Committee on Structural Safety Workshop on Probabilistic Modeling of Deterioration.Processes in Concrete Structures”, Lausanne, 2003

163. Liddard A.G. Corrosion of Steel in chloride environment / A.G. Liddard, B.A. Whittaker // Journal of the Institute of Metals, 1961. № 89.– P. 423–428.

164. Life-365: Service Life Prediction Model. Computer program for predicting the service life and Life-cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides. Silica Fume Association, 2001.

165. Lounis, Z.Reliability-based service life prediction of deteriorating concrete structures / Lounis, Z., and Madanat, M.S. // Pros 3rd Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions, –Vol.1, 2001. – pp 965-972.

166. Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment / Maage, M.; Helland, S.; Carlsen, J.E.// Proc of RILEM international Workshop on Durability of High Performance Concrete – Wien, February 14-15 1994, ed. by H. Somme – pp. 194-207.

167. Prediction of long term chloride concentration in concrete / Mangat, P.S., Molloy B.T. // Materials and Structures. – 1994 – 27(3) – pp 338-346.
168. Survival analysis on bridges for modeling bridge replacement and evaluating bridge performance / Matsumoto T., Beng S. S. // Proceeding Japan-Taiwan international workshop on urban regeneration. Maintenance and green material. – 2005 – p. 23 – 36.
169. McGee, R. Modeling of durability performance of Tasmanian bridges. ICASP8 application of statistics and probability in civil engineering / McGee, R., Melchers R.E., Stewart M.G. – 1: 297 – 306 (1999).
170. Mejlbro, L.; The complete solution to Fick's second law of diffusion with time dependant diffusion coefficient and surface concentration. Proceeding of CEMENTA's workshop on Durability of Concrete in Saline Environments. Danderyd, Sweden
171. Melchers, R.E. Structural Reliability Analysis and Prediction/ Second Edition. John Wiley & Sons.– New York: 1999 – 437 p.
172. Miner, M. A., Cumulative damage in fatigue / Miner, M. A.// J. Applied Mech., –1945–12 (1945) – pp. 159–164.
173. New Approach to Durability Design CEB Bulletin d'Information – 1997–No.238
174. Palmgren, A. Die Lebensdauer von Kugellagern / Palmgren, A. // Zeitschrift fur Deutsche Ingenieure, – 1924–68 (1924) – pp. 339-341.
175. Petr Konecny. Reliability of Reinforced concrete bridge decks with respect to ingress of chlorides. – Ostrava.2007. – 127c.
176. Probabilistic Model Code. – 12th draft. Joint Committee on Structural Safety. PART I - BASIS OF DESIGN - JCSS-OSTI/DIA/VROC–10.11.2000, ETH Zurich, – 64 p.
177. Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment /.University of Minho. School of Engineering. Department of Civil Engineering Campus de Azurem, 4800-058. Guimaraes, Portugal. © 2004 Rui Miguel Ferreira. ISBN: 972 – 8692 – 16 – 1. Portugal. Braga 2004.

178. Purvis R.L. Life-cycle cost analysis for protection and rehabilitation of concrete bridges relative to reinforcement corrosion / Purvis R.L.; Babaei P.E.K.; Clear K.C.J Markow, M J. // Strategic Highway Research Program, National Research Council. – Washington DC, USA. Report SHRP-S-377, – pp. 79–82.
179. Report of RILEM Technical committee 130-CSL [Durability design of concrete structures]. Edited by A.Sarja and E.Vesicary. E&SPON.
180. Report of RILEM Technical committee 178. Edited by A.Sarja and E.Vesicary. E&SPON.
181. Rui Miguel Ferreira. Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment/ Rui Miguel Ferreira. – Guimaes.2004 – 339 p.
182. Sandberg, P. Critical evaluation of factors affecting chloride initiated reinforcement corrosion in concrete / Sandberg, P. // Division of Building Materials, Lund Institute of Technology – Sweden. – Report TVBM-7088 – pp. 24–25.
183. Sarja Durability design of concrete structures. / Sarja, Asko & Vesikari, Erkki (Editors). // RILEM Report of TC 130-CSL. RILEM Report Series 14. – 1996. –E&FN Spon, Chapman & Hall, – 165 pp.
184. Service-Life Prediction – State of the Art Report Reported by ACI Committee 365// ACI Manual of Concrete Practice. Part 1. – 2001.
185. Spellman D.L. Chlorides and bridge deck deterioration / D.L. Spellman, R.F. Stratfull // Highway Research Record. – 1970. – № 328. – P. 38–49.
186. Stephen, L.A. Predicting the service life of concrete marine structures: an environmental methodology / Stephen, L.A. // ACI Structural Journal – 1998 – 95 – pp 27–36.
187. Swamy R.N. Chloride penetration into concrete incorporating mineral admixtures or protected with surface coating material under chloride environments / Swamy, R.N.; Hamada, H.; Fukute, T.; Tanikawa, S.; Laiw, J.C.: // Proc of CONSEC 95, – Sapporo, Japan, E& FN Spon, London, UK.
188. Takewaka K Quality and Cover Thickness of Concrete based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments / Takewaka, K. and Mastumoto, S. // ACI SP 109–17, American Concrete Institute, – 1988 – pp. 381–400.

189. Tang, L. Chloride transport in concrete / Tang, L. // Measurement and prediction. Department Building Materials – Chalmers University of Technology.– Pub-96.6.
190. Thoft-Christensen P. Deterioration of concrete structures / P. Thoft- Christensen // Proceedings of first international conference on bridge maintenance, safety and management. – Barcelona, 2002 – 7p.
191. Tuutti, K., Corrosion of steel in concrete / CBI Research, no 4:82, Swedish Cement and Concrete Research Institute – Stockholm 1982.
192. Uji, K. Formulation of an equation for surface chloride content due to permeation of chloride / Uji, K.; Matsuoka, V.; Maruya, T. // Proceedings of the Third International symposium on "Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction". Elsevier Applied Science. – London, UK. – pp.258-267.
193. Will D.Lindquist Effect of Cracking on Chloride Content in Concrete Bridge Decks / Will D.Lindquist, David Darwin, JoAnn Browning, Gerald G.Miller // ACI Materials Journal/November-December, – 2006. – p. 467–473.
194. Yuan,C.B. Diffusivity of chloride in concrete in different stress states / Yuan,C.B. // J.Hohai University (Natural Sciences) – 2003– 31(1) –pp 50–54.

ДОДАТОК А
КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА «ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ
КАРБОНІЗАЦІЇ ЗАХИСНОГО ШАРУ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО
ЕЛЕМЕНТА»

Public Class Form1

```

Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
    C1 = TextBox1.Text
    C2 = TextBox2.Text
    Ro = TextBox3.Text
    Mm = TextBox4.Text
    If C1 <= 0 Or C1 > 1 Or C2 <= 0 Or C2 > 1 Or Ro <= 0 Or Ro > 5000 Or
Mm <= 0 Or Mm > 100 Then
        MsgBox("Ошибка ввода данных", , "Ошибка")
    End If
    x = 1000
    Dim M(x, 100) As Integer
    For i = 0 To (x - 1)
        For j = 0 To 99
            M(i, j) = 0
        Next
    Next
    Cx = 0
    st = 0
    While Cx < C2
        SM = 0
        For j = 0 To 99
            For i = 0 To x - 2
                If M(i + 1, j) = 1 And M(i, j) = 0 Then
                    Randomize()
                    Dim Move As Integer = Rnd()
                    If Move >= 0.5 Then
                        M(i, j) = 1
                        M(i + 1, j) = 0
                    End If
                End If
            Next
        Next
        SM = SM + M(0, j)
    Next
    Cx = SM / 100

```

```

    st = st + 1
    For j = 0 To 99
        M(x - 1, j) = 0
    Next
    Natom = 0
    C = 0
    While C < C1
        Randomize()
        mesto = (Rnd() * 99) \ 1
        Randomize()
        atom = Rnd()
        If atom >= 0.5 Then
            M(x - 1, mesto) = 1
            Natom = Natom + 1
        End If
        C = Natom / 100
    End While
End While
MsgBox("C1=" + Str(C1) + "  C2=" + Str(C2) + "  Ro=" + Str(Ro) + "
Mm=" + Str(Mm) + "  Step=" + Str(st))
End Sub

Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles MyBase.Load

End Sub
End Class

```

Настанови користувача до програми «Визначення часу карбонізації залізобетонних елементів мостів»

Визначення часу карбонізації

Образцом является параллелипипед фиксированной ширины и высоты 10x10 частиц и изменяемой длины

Концентрация в-ва на дневной поверхности образца 0..1	0.5
Концентрация в-ва на искомой глубине образца 0..1	0.8
Плотность материала образца в кг/м ³ 0..5000 кг/м ³	2500 кг/м ³
Глубина проникновения диффузанта в мм 0..100	50 мм

Start

Рисунок 1 – Интерфес головного вікна програми

Головне вікно програми показано на рис. 1. Складається з декількох полів для вводу даних та кнопки «Start».

В якості вхідних даних необхідно з клавіатури ввести декілька параметрів, починаючи згори: «концентрация в-ва на дневной поверхности образца» - потрібно ввести концентрацію карбонатів на денній поверхні зразка як частку від 1; «концентрация в-ва на искомой глубине образца» - потрібно ввести концентрацію карбонатів на глибині зразка, що досліджується як частку від 1; «плотность материала образца в кг/м³» - потрібно ввести щільність матеріалу з якого виготовлений зразок, що досліджується; «глубина проникновения диффузанта» - потрібно ввести глибину, на якій потрібно визначити час до повної карбонізації.

Після введення всіх даних натиснути кнопку «Start».

Процес визначення часу карбонізації перебігає в автоматичному режимі і не потребують введення додаткової інформації. Оскільки алгоритм програми базується на статистичному методі для виконання розрахунків знадобиться певний час.

Ознакою закінчення розрахунків буде поява виринаючого вікна з продубльованими вихідними даними для перевірки і часом карбонізації.

ДОДАТОК Б

КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА «ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЗГИНАНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ»

ORIGIN := 1

$N_{\text{cycle}} := 1000$ Кількість циклів ітерацій

$a_s := 0.02$ Товщина захисного шару, м

$C_0 := 0.1$ Початкова концентрація хлоридів

$C_{cr} := 2$ Критична концентрація хлоридів

$C_s := 3$ Поверхнева концентрація хлоридів

$RH_c := 0.75$ Критична вологість

$W_C := 0.3$ В/Ц водоцементне співвідношення

$D_0 := 10^{(-12.06 + 2.4W_C)} = 4.571 \times 10^{-12}$

$M := 35.453$ Згинальний момент, що діє в перерізі

$E_A := 44.6 \cdot 10^3$

$\sigma := 1.282$ Напруження в бетоні

$R_{btser} := 2.1$ Тимчасовий опір бетону розтягу

$A_c := 0.035$ Коефіцієнт, що залежить від навантажень при стисканні -0,0236, розтягу +0,0496

$m_t := 0.3$ Коефіцієнт часу

$C_C := 0.03$ Концентрація діоксиду вуглецю у повітрі

$m_C := 0.4 \cdot 0.4 \cdot 0.6 \cdot 0.6 = 0.058$ Коефіцієнт реакційної здатності бетону

$D_C := 0.0028 \cdot W_C^3 - 0.0019 \cdot W_C^2 + 0.0006 \cdot W_C - 9 \cdot 10^{-5} = -5.4 \times 10^{-6}$ Інтерполяція сплайном для коеф. диф. вуглекислого газу в бетоні

$q := -75000 \cdot W_C^3 + 68571 \cdot W_C^2 - 22607 \cdot W_C + 8940 = 6.304 \times 10^3$ Інтерполяція сплайном для енергії активації дифузії

$b := 1\text{m}$ $h_p := 0.25\text{m}$ Характеристики перерізу (ширина, висота)

$R_s := 350\text{MPa}$ $R_b := 11.5\text{MPa}$

$R_{sn} := 390\text{MPa}$ $R_{bn} := 25.5\text{MPa}$

$d := 0.01\text{m}$ Діаметр робочої арматури

$n := \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Кількість прутків в кожному ряді армування, починаючи від грані балки

$k := \text{rows}(n) = 3$

$\Delta h_{\text{ряд}} := 0.01\text{m}$ Відстань між рядами армування, починаючи від грані балки

$M_{\text{max}} := 259\text{kN}\cdot\text{m}$ Максимальний розрахунковий згинальний момент

$M_{n,\text{max}} := 2600\text{kN}\cdot\text{m}$ Максимальний характеристичний згинальний момент

Середньомісячна
температура повітря

$T := \begin{bmatrix} -5.6 + (294 - 21) \\ 4.2 + (294 - 21) \\ 0.7 + (294 - 21) \\ 8.7 + (294 - 21) \\ 15.1 + (294 - 21) \\ 18.2 + (294 - 21) \\ 19.3 + (294 - 21) \\ 18.6 + (294 - 21) \\ 13.9 + (294 - 21) \\ 8.1 + (294 - 21) \\ 2.1 + (294 - 21) \\ -2.3 + (294 - 21) \end{bmatrix}$

Середньомісячна
відносна
вологість повітря

$RH := \begin{pmatrix} 0.83 \\ 0.81 \\ 0.77 \\ 0.67 \\ 0.64 \\ 0.68 \\ 0.71 \\ 0.70 \\ 0.74 \\ 0.78 \\ 0.85 \\ 0.86 \end{pmatrix}$

$$V_{korC} := 0.005 \cdot 10^{-3} \frac{m}{yr} \quad \text{Скорость коррозии XC4}$$

$$V_{korCL} := 0.030 \cdot 10^{-3} \frac{m}{yr} \quad \text{Скорость коррозии XD3}$$

$$\beta := 1.7 \quad \text{Характеристика безпеки, що відповідає ресурсу до настання шуканого стану}$$

IMPORTfile :=

	1	2	3
1	зусилля, кН•м ²	аріації Vx ²	
2	а), кН•м ²	3	0.033
3	в), кН•м ²	1.16	0.17
4	ю, кН•м ²	23.96	0.17
5	АК, кН•м ²	3.09	0.24
6	тн, МПа ²	20	0.111
7	тн, МПа ²	390	0.07
8	вництва ²	"Київ"	NaN
9	етону Cs ²	0.02	0.2
10	ицтва CO ²	6·10 ⁻³	0.2
11	увань N ²	1·10 ⁴	"."

$$P_1 := \text{IMPORTfile}_{2,2} \cdot 10^3 = 3 \times 10^3 \quad V_{r1} := \text{IMPORTfile}_{2,3} = 0.033$$

$$P_2 := \text{IMPORTfile}_{3,2} \cdot 10^3 = 1.16 \times 10^3 \quad V_{r2} := \text{IMPORTfile}_{3,3} = 0.17$$

$$P_3 := \text{IMPORTfile}_{4,2} \cdot 10^3 = 2.396 \times 10^4 \quad V_{r3} := \text{IMPORTfile}_{4,3} = 0.17$$

$$P_4 := \text{IMPORTfile}_{5,2} \cdot 10^3 = 3.09 \times 10^3 \quad V_{r4} := \text{IMPORTfile}_{5,3} = 0.24$$

$$R_{r5} := \text{IMPORTfile}_{6,2} \cdot 10^6 = 2 \times 10^7 \quad V_{r5} := \text{IMPORTfile}_{6,3} = 0.111$$

$$R_{r6} := \text{IMPORTfile}_{7,2} \cdot 10^6 = 3.9 \times 10^8 \quad V_{r6} := \text{IMPORTfile}_{7,3} = 0.07$$

$$V_{r7} := 0.0229 \quad \text{Коеф вар площі поперечного перерізу арматури}$$

$$V_{r8} := 0.0237 \quad \text{Коеф вар робочої висоти}$$

$$i := 1..12$$

```

Prog := τ ← 0
j ← 1
Nx ← 1
while Nx < Ncicle
  i ← 1
  XCLj ← 0
  while XCLj < as
    TR ←  $\left( T - \text{trunc} \left( \frac{i-1}{12} \right) \cdot 12 - 5 \right) + \text{md}(10)$ 
    RHR ←  $\left( RH - \text{trunc} \left( \frac{i-1}{12} \right) \cdot 12 - 0.1 \right) + \text{md}(0.2)$ 
    mmt ← |morm(1, mt, 0.05)|
    σi ← |morm(1, σ, 0.5)|
    Rbt ← |rnorm(1, Rbtser, 0.5)|
    A ← |morm(1, Ac, 0.01)|
    Kef ←  $\left[ 1 + A_c \cdot \left( \frac{\sigma_i}{R_{bt}} \right)^2 \right]^2 \cdot \frac{\left[ (i) \cdot \frac{365-86400}{12} \right]^{-m_{mt}} \cdot q \cdot \left( \frac{1}{294} \frac{1}{TR} \right)}{\left[ 1 + \frac{(1-RHR)^4}{(1-RH_c)^4} \right]}$ 
    x ←  $1 - \frac{C_{cr} - C_0}{C_s - C_0}$ 
    ERFInv ←  $\text{signum}(x) \cdot \sqrt{\left[ \frac{2}{\pi \cdot 0.147} + \frac{\ln[1 - (x)^2]}{2} \right]^2 - \frac{\ln[1 - (x)^2]}{0.147} - \left[ \frac{2}{\pi \cdot 0.147} + \frac{\ln[1 - (x)^2]}{2} \right]}$ 
    X ←  $2 \text{ERFInv} \cdot \sqrt{\left( D_0 \cdot K_{ef} \right) \cdot \frac{365-86400}{12}}$ 
    XCLj ← XCLj + X
  i ← i + 1
  Nx ← Nx + 1
  τj ← i
  j ← j + 1
 $\begin{pmatrix} Nx \\ \tau \\ X_{CL} \end{pmatrix}$ 

```

$T_{CL} := \text{mean}(\text{Prog}_2) = 348.436$

Математичне очікування хлоридизації, місяці

$\sigma_{CL} := \text{stdev}(\text{Prog}_2) = 12.732$

Стандарт хлоридизації, місяці

$P_{CL} := \text{dnorm}(T_{CL}, T_{CL}, \sigma_{CL}) = 0.031$

Імовірність математичного очікування хлоридизації

$$T := \text{histogram}(50, \text{Prog}_2) \quad \text{Prog} = \begin{pmatrix} 1 \times 10^3 \\ \{999, 1\} \\ \{999, 1\} \end{pmatrix}$$

$$X := \text{histogram}(50, \text{Prog}_3)$$

```

ProgC :=
  τ ← 0
  j ← 1
  Nx ← 1
  while Nx < Ncicle
    i ← 1
    XCj ← 0
    asCj ← as
    Dc ←  $\left| \frac{\text{rlnorm}(1, 10000 \cdot D_C, 0.5)}{10000} \right|$ 
    mc ←  $\left| \text{rlnorm}(1, m_C, 0.5) \right|$ 
    while XCj < as
      Cc ←  $\left| \text{rlnorm}(1, C_C, 0.5) \right|$ 
      X ←  $\sqrt{0.0002 \cdot \frac{D_c \cdot C_c \cdot \frac{365 \cdot 86400}{12}}{10^6 \cdot m_c}}$ 
      XCj ← XCj + X
      i ← i + 1
    Nx ← Nx + 1
    τj ← i
    j ← j + 1
   $\begin{pmatrix} Nx \\ \tau \\ X_C \end{pmatrix}$ 

```

$$T_C := \text{hmean}(\text{ProgC}_2) = 84.569 \quad \text{Математичне очікування карбонізації, місяці}$$

$$\sigma_C := \text{stdev}(\text{ProgC}_2) = 35.7 \quad \text{Стандарт карбонізації, місяці}$$

$$P_C := \text{dlnorm}(T_C, T_C, \sigma_C) = 1.064 \times 10^{-5} \quad \text{Імовірність математичного очікування карбонізації}$$

$$T := \text{histogram}(50, \text{ProgC}_2) \quad \text{ProgC} = \begin{pmatrix} 1 \times 10^3 \\ \{999, 1\} \\ \{999, 1\} \end{pmatrix}$$

$$X := \text{histogram}(50, \text{ProgC}_3)$$

АРМАТУРА!!!!!!

Перевірка несної здатності

$$S := \sum_{i=1}^k \left[n_i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot [s_s \cdot m + (i-1) \Delta h_{\text{ряд}}] \right] = 9,425 \cdot \text{cm}^3$$

$$A_{s0} := \sum_{i=1}^k \left(n_i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) = 4,712 \cdot \text{cm}^2$$

$$A_{s1} := \frac{n_1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 = 4,712 \times 10^{-4} \cdot \text{m}^2$$

$$X := \frac{S}{A_{s0}} = 0,02 \cdot \text{m}$$

$$x_1 := \frac{R_s \cdot A_{s1}}{R_b \cdot b} = 0,014 \cdot \text{m}$$

$$x_0 := \frac{R_s \cdot A_{s0}}{R_b \cdot b} = 0,014 \cdot \text{m}$$

$$x_{0n} := \frac{R_{sn} \cdot A_{s0}}{R_{bn} \cdot b} = 7,207 \times 10^{-3} \cdot \text{m}$$

$$h_0 := h_p - X = 0,23 \cdot \text{m}$$

$$M_{u0} := R_s \cdot A_{s0} \cdot \left(h_0 - \frac{x_0}{2} \right) = 36,752 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{u,n0} := R_{sn} \cdot A_{s0} \cdot \left(h_0 - \frac{x_{0n}}{2} \right) = 41,608 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\mu_{Q1} := \frac{P_1}{(1 + 1,64 V_{r1})} = 2,846 \times 10^3$$

$$\mu_{Q2} := \frac{P_2}{(1 + 1,64 V_{r2})} = 907,1$$

$$\mu_{Q3} := \frac{P_3}{(1 + 1,64 V_{r3})} = 1,874 \times 10^4$$

$$\mu_{Q4} := \frac{P_4}{(1 + 1,64 V_{r4})} = 2,217 \times 10^3$$

$$\mu_{R5} := \frac{R_{r5}}{(1 - 1,64 V_{r5})} = 2,445 \times 10^7$$

$$\mu_{R6} := \frac{R_{r6}}{(1 - 1,64 V_{r6})} = 4,406 \times 10^8$$

$$\mu_{R_7} := \frac{A_{s0} \cdot \frac{1}{m}}{(1 - 1.64 V_{r_7})} = 4.896 \times 10^{-4}$$

$$\mu_{R_8} := \frac{h_0 \cdot \frac{1}{m}}{(1 - 1.64 V_{r_8})} = 0.239$$

$$\begin{aligned} i_q &:= 1..4 & i_r &:= 5..8 \\ \sigma_{Q_{iq}} &:= V_{r_{iq}} \cdot \mu_{Q_{iq}} & \sigma_{R_{ir}} &:= V_{r_{ir}} \cdot \mu_{R_{ir}} \end{aligned}$$

$$V_Q := \sqrt{\sum_{i=1}^4 (V_{r_i})^2}$$

$$V_Q = 0.341$$

$$V_R := \sqrt{\sum_{i=5}^8 (V_{r_i})^2}$$

$$V_R = 0.135$$

$$\mu_{R,0} := \frac{M_{u,0}}{(1 - 1.64 V_R)} = 53.474 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\mu_{Q,0} := \frac{\sum_{i=1}^4 (P_i \cdot \text{N}\cdot\text{m})}{(1 + 1.64 V_Q)} = 20.01 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$\beta_0 := \frac{\frac{\mu_{R,0}}{\mu_{Q,0}} - 1}{\sqrt{V_Q^2 + \left(\frac{\mu_{R,0}}{\mu_{Q,0}}\right)^2 \cdot V_R^2}} = 3.363$$

$$M_{\beta,0} := \mu_{R,0} \cdot (1 - 1.64 V_R) \cdot \frac{1}{\text{N}\cdot\text{m}} = 4.161 \times 10^4 \quad M_{Q,0} := \mu_{Q,0} \cdot (1 + 1.64 V_Q) \cdot \frac{1}{\text{N}\cdot\text{m}} = 3.121 \times 10^4$$

$$\mu_{R\beta} := \mu_{Q,0} \cdot \left[\frac{-2 - \sqrt{2^2 - 4 \cdot (V_R^2 \cdot \beta^2 - 1) \cdot (V_Q^2 \cdot \beta^2 - 1)}}{2(V_R^2 \cdot \beta^2 - 1)} \right] = 34.009 \cdot \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{\beta} := \mu_{R\beta} \cdot (1 - 1.64 V_R) \cdot \frac{1}{\text{N}\cdot\text{m}} = 2.646 \times 10^4$$

```

ProgARM :-  $\tau \leftarrow 0$ 
            $j \leftarrow 1$ 
            $Nx \leftarrow 1$ 
           while  $Nx < N_{cicle}$ 
              $i \leftarrow 1$ 
              $Q_1 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{Q_1}, \sigma_{Q_1}\right) \right|$ 
              $Q_2 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{Q_2}, \sigma_{Q_2}\right) \right|$ 
              $S_5 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{R_5}, \sigma_{R_5}\right) \right|$ 
              $S_6 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{R_6}, \sigma_{R_6}\right) \right|$ 
              $S_7 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{R_7}, \sigma_{R_7}\right) \right|$ 
              $S_8 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{R_8}, \sigma_{R_8}\right) \right|$ 
              $\sigma r \leftarrow 1$ 
              $t_1 \leftarrow T_C$ 
              $t_2 \leftarrow T_{CL}$ 
              $Mmax \leftarrow 0$ 
              $Mukor \leftarrow 1$ 
              $\Delta A_{s.kor} \leftarrow 0$ 
              $\Delta d \leftarrow 0$ 
             while  $Mmax < Mukor$ 
                $Q_3 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{Q_3}, \sigma_{Q_3}\right) \right|$ 
                $Q_4 \leftarrow \left| \text{morm}\left(1, \mu_{Q_4}, \sigma_{Q_4}\right) \right|$ 
               
$$Mmax \leftarrow \sum_{k=1}^4 Q_k$$

               
$$\sigma r \leftarrow \frac{S_5 \cdot \frac{b}{m} \cdot S_8}{S_7 - \Delta A_{s.kor}} \left[ 1 - \sqrt{1 - 2 \frac{Mmax}{S_5 \cdot \frac{b}{m} \cdot (S_8)^2}} \right]$$

               
$$x \leftarrow \frac{\sigma r (S_7 - \Delta A_{s.kor})}{S_5 \cdot \frac{b}{m}}$$

               
$$V_{kor0} \leftarrow \begin{cases} \frac{V_{korC}}{12 \cdot \frac{m}{yr}} & \text{if } i \leq t_2 - t_1 \\ \frac{V_{korCL}}{12 \cdot \frac{m}{yr}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

               
$$V_{kor} \leftarrow V_{kor0} \cdot \left( 1 + e^{\frac{\sigma r}{S_6}} \right)$$

                $\Delta d \leftarrow \Delta d + 2 \cdot V_{kor}$ 
               
$$\Delta A_{s.kor} \leftarrow S_7 - n_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d}{m} - \Delta d \right)^2$$

               
$$Mu_j \leftarrow S_6 \cdot (S_7 - \Delta A_{s.kor}) \cdot \left( S_8 - \frac{x}{2} \right)$$


```

```

      Mukor ← Muj
      Mnagrj ← Mmax
      AsResj ← S7 - ΔAs.kor
      i ← i + 1
      Nx ← Nx + 1
      τj ← i
      j ← j + 1
      ( Nx
        τ
        Mu
        Mnagr
        AsRes )

```

$$\text{ProgARM} = \begin{pmatrix} 1 \times 10^3 \\ \{999,1\} \\ \{999,1\} \\ \{999,1\} \\ \{999,1\} \end{pmatrix}$$

$$T_{\text{ARM}} := \text{mean}(\text{ProgARM}_2) = 370.188 \quad \text{Математичне очікування хлоридизації, місяці}$$

$$\sigma_{\text{ARM}} := \text{stdev}(\text{ProgARM}_2) = 27.206 \quad \text{Стандарт хлоридизації, місяці}$$

$$P_{\text{ARM}} := \text{dnorm}(T_{\text{ARM}}, T_{\text{ARM}}, \sigma_{\text{ARM}}) = 0.015 \quad \text{Імовірність математичного очікування хлоридизації}$$

$$T_{\text{w}} := \text{histogram}(50, \text{ProgARM}_2)$$

$$S_{\text{ARM}} := \text{mean}(\text{ProgARM}_3) = 2.989 \times 10^{-4} \quad \text{Математичне очікування Mu.kor на момент переходу в шуканий стан, кН*м}$$

$$\sigma_{\text{Sarm}} := \text{stdev}(\text{ProgARM}_3) = 1.641 \times 10^{-3} \quad \text{Стандарт Mu.kor, місяці}$$

$$P_{\text{Sarm}} := \text{pnorm}(S_{\text{ARM}}, S_{\text{ARM}}, \sigma_{\text{Sarm}}) = 0.5 \quad \text{Імовірність математичного очікування Mu.kor}$$

$$As_{\text{ARM}} := \text{mean}(\text{ProgARM}_5) = 2.888 \times 10^{-4} \quad \text{Математичне очікування As на момент переходу в шуканий стан, м^2}$$

$$\sigma_{\text{As.arm}} := \text{stdev}(\text{ProgARM}_5) = 2.803 \times 10^{-5} \quad \text{Стандарт As}$$

$$P_{\text{Asarm}} := \text{pnorm}(As_{\text{ARM}}, As_{\text{ARM}}, \sigma_{\text{As.arm}}) = 0.5 \quad \text{Імовірність математичного очікування As}$$

$$Q_{\text{nagr}} := \text{mean}(\text{ProgARM}_4) = 3.131 \times 10^4 \quad \text{Математичне очікування Mmax на момент переходу в шуканий стан, кН*м}$$

$$\sigma_{\text{Q.nagr}} := \text{stdev}(\text{ProgARM}_4) = 1.867 \times 10^3 \quad \text{Стандарт Mmax}$$

$$P_{\text{Q.nagr}} := \text{pnorm}(Q_{\text{nagr}}, Q_{\text{nagr}}, \sigma_{\text{Q.nagr}}) = 0.5 \quad \text{Імовірність математичного очікування Mmax}$$

$$S_{\text{w}} := \text{histogram}(50, \text{ProgARM}_3) \quad Q := \text{histogram}(50, \text{ProgARM}_4)$$

$$T_{\text{full}} := \frac{T_{\text{CL}} - T_{\text{C}} + T_{\text{ARM}}}{12} = 52.838 \quad \text{Довговечність, лет}$$

ДОДАТОК В

АВТОРСЬКІ СВІДОЦТВА



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 36516

Комп'ютерна програма "Визначення часу карбонізації залізобетонних елементів мостів"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Ляшенко Альберт Іванович, Янко Федір Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Ляшенко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Янко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації

13.01.2011

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М.В.Паладій

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54815

Літературний письмовий твір практичного характеру "Посібник до ДСТУ-Н Б.В.2.3-23 з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Проект"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Безпалов Леонід Миколайович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Безпалов Леонід Миколайович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковія



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54818

Літературний письмовий твір наукового характеру "Чутливість моделі оцінки ресурсу залізобетонних прогонових будов на стадії проектування"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Лантух-Лященко Альберт Іванович, Янчук Леонід Леонідович, Янко Федір Володимирович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Янчук Леонід Леонідович, вул. Суворова, 1, м. Київ; Янко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковія

Ковія

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54819

Літературний письмовий твір наукового характеру "Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів за допомогою методу Монте-Карло"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Янчук Леонід Леонідович, Яцко Федір Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Янчук Леонід Леонідович, вул. Суворова, 1, м. Київ; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА · ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ ·

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54820

Літературний письмовий твір наукового характеру "Аналіз чутливості моделі деградації залізобетонних елементів мостів"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Янчук Леонід Леонідович, Янко Федір Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Янчук Леонід Леонідович, вул. Суворова, 1, м. Київ; Янко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації

Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковнія



M. V. Koviya

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54826

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. Настанова. EN 1994-2 Єврокод 4: Проектування сталезалізобетонних елементів. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів ДСТУ-Н Б 1994-2:20XX. Проект" ("ДСТУ-Н Б 1994-2:20XX")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації

Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня





УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54833

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 2. Сталеві мости (EN 1993-2:2006, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1993-2:20XX. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1993-2:20XX")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковія

M. V. Koviya

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54835

Літературний письмовий твір практичного характеру "Стандарт організацій України. Мости та труби. Варіантне проектування мостів СОУ 42.1-37641918-093:201X. Проект" ("СОУ 42.1-37641918-093:201X")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Безпалов Леонід Миколайович, Медведєв Костянтин Володимирович, Рубльов Андрій Валерійович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Безпалов Леонід Миколайович, вул. Суворова, 1, м. Київ; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Рубльов Андрій Валерійович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації





**Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковня**

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 54854

Літературний письмовий твір практичного характеру "Галузеві будівельні норми України. Споруди транспорту. Мости та труби. Сталезалізобетонні конструкції ГБН В.2.3-37641918-553:20XX. Проект" ("ГБН В.2.3-37641918-553:20XX")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Лантух-Ляшенко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Рубльов Андрій Валерійович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Лантух-Ляшенко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Рубльов Андрій Валерійович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

16.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковіня

M. V. Kovinya

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55045

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. EN1990:2002 Єврокод. Основи проектування конструкцій. ДСТУ-Н Б EN1990:2008. Зміни. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Зміни")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович, Располов Олександр Сергійович, Артемов Віталій Євгеніович, Корнієв Михайло Михайлович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Располов Олександр Сергійович, ву. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Артемов Віталій Євгеніович, ву. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Корнієв Михайло Михайлович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації





**Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня**

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55046

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. EN 1991-2:2003 Єврокод 1. Дії на конструкції. Рухомі навантаження на мости. ДСТУ-Н Б EN 1991-2:2010. Зміни. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1991-2:2010. Зміни")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Янко Федір Володимирович, Располов Олександр Сергійович, Артемов Віталій Євгеніович, Корнієв Михайло Михайлович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Янко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Располов Олександр Сергійович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Артемов Віталій Євгеніович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Корнієв Михайло Михайлович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55047

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. EN 1994-2:2005 Єврокод 4. Проектування сталезалізобетонних конструкцій. Частина 2. Загальні правила і правила для мостів. ДСТУ-Н Б EN 1994-2:2012. Зміни. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1994-2:2012. Зміни")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцько Федір Володимирович, Корнієв Михайло Михайлович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцько Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Корнієв Михайло Михайлович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковіня



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55048

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. EN 1995-2:2005 Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 2. Мости. ДСТУ-Н Б EN 1995-2:2012. Зміни. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1995-2:2012. Зміни")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович, Корнієв Михайло Михайлович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Корнієв Михайло Михайлович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

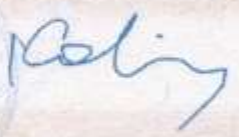
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби інтелектуальної власності України
М.В. Ковіня



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55049

Літературний письмовий твір практично характеру "Рекомендації із застосування композитної перильної огорожі на мостах Р.В.2.7-02070915/31911658-805:2012. Проект" ("Р.В.2.7-02070915/31911658-805:2012")
(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Медведєв Костянтин Володимирович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович**
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня



УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55050

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. EN 1992-2:2005 Єврокод 3. Залізобетонні мости. Правила проектування. ДСТУ-Н Б EN 1992-2:2012. Зміни. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1992-2:2012. Зміни")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яцко Федір Володимирович, Корніс Михайло Михайлович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яцко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Корніс Михайло Михайлович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня

Kolyn

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА **ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 55051

Літературний письмовий твір практичного характеру "Національний стандарт України. EN 1993-2:2006 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 2. Сталеві мости. ДСТУ-Н Б EN 1993-2:2012. Зміни. Проект" ("ДСТУ-Н Б EN 1993-2:2012. Зміни")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Лантух-Лященко Альберт Іванович, Медведєв Костянтин Володимирович, Снитко Валерій Пилипович, Святишенко Ірина Іванівна, Яшко Федір Володимирович, Корнієв Михайло Михайлович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Лантух-Лященко Альберт Іванович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Медведєв Костянтин Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Снитко Валерій Пилипович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Святишенко Ірина Іванівна, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Яшко Федір Володимирович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Корнієв Михайло Михайлович, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010; Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, м. Київ, 01010

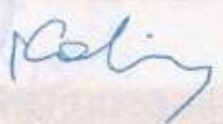
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

29.05.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
М.В. Ковіня



ДОДАТОК Г

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ПАТ „КИЇВСОЮЗШЛЯХПРОЕКТ”  **ПАО „КИЕВСОЮЗДОРПРОЕКТ”**

№ 29 від 17.02.2015р.
на № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Голови Правління

ПАТ „Київсоюзшляхпроект”

Войтович І.І.

«17» лютого 2015р.

А К Т

про використання моделі прогнозу довговічності залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах

Комісія у складі:

Голова комісії – головний інженер Фаль Андрій Євгенійович

Члени комісії – начальник технічного відділу Рожко Сергій Вікторович.

– головний інженер проектів Ятченко Володимир Васильович

Комісія констатує, що у ПАТ «Київсоюзшляхпроект» використання моделі прогнозу довговічності залізобетонних елементів автодорожніх мостів на етапі проектування, яка є результатом досліджень дисертаційної роботи Ф.В. Яцко, що дозволило внести корективи в проектні рішення і запроектувати монолітну залізобетонну плиту проїзної частини з заданим розрахунковим терміном служби відповідно до вимог нормативних документів. Модель застосовуються в техніко-економічних порівняннях варіантів проектів мостів на автомобільних дорогах. Очікується значний соціально-економічний ефект від впровадження в проектування.

Цей акт складено для пред'явлення у спеціалізовану Вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Голова комісії

Члени комісії



А.Є. Фаль

С. В. Рожко

В. В. Ятченко



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

Державне підприємство
«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
ДП «ДерждорНДІ»

03113, м. Київ,
проспект Перемоги, 57
код ЄДРПОУ 03450778

тел/факс 456-34-15
e-mail: dorndi@post.com.ua
www.dorndi.org.ua

24.02.2015 № 22.2-16/-1645

на № _____ від _____ **ДОВІДКА**

про впровадження наукових розробок аспіранта Національного
транспортного університету Яцко Федора Володимировича

Головні результати дисертаційної роботи Яцко Ф.В. полягають у створенні методики прогнозу ресурсу залізобетонних елементів автодорожніх мостів. В Аналітичній експертній системі управління мостами ДерждорНДІ використовується методика «Прогнозування довговічності згинаних залізобетонних елементів мостів», яка є результатом досліджень дисертаційної роботи. Ці програмні засоби застосовуються в техніко-економічних порівняннях варіантів проектів мостів на автомобільних дорогах для оцінки ресурсу залізобетонних прогонових будов. Від впровадження вказаних програм в проектування очікується підвищення ефективності стратегічного довгострокового планування витрат при обранні оптимальних проектних рішень, які приведуть до зменшення видатків на будівництво і експлуатацію залізобетонних транспортних споруд.

Згадані вище розробки мають наукову та практичну цінність і дають належні підстави для позитивної оцінки результатів дисертаційної роботи.

Довідку складено для подання в спеціалізовану вчену раду по захисту дисертаційних робіт.

Перший заступник директора
з наукової роботи



В.К.Вирожемський

003656

456-26-48
Повнова Р.І.