УДК 620.178.3:620.193:004.94 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.37

Ю. Ф. ХОЛОДНИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0009-6695-8258

В. О. ЖОВТОБРЮХ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0007-2438-6082

Р. О. ІВАНЕНКО
старший науковий співробітник
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз
ORCID: 0000-0002-1447-6275

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення надійності та збільшення ресурсу сучасних конструкцій, що експлуатуються у складних умовах динамічних навантажень і впливів навколишнього середовища. Установлено, що традиційні підходи до розрахунку не завжди адекватно враховують нелінійні ефекти, стохастичний характер навантажень і багатофакторні процеси деградації матеріалів, внаслідок чого відбуваються передчасні відмови і знижується ефективність використання технічних систем. Це визначає потребу у розробленні нових підходів до моделювання механічних систем, здатних відтворювати реальні умови експлуатації та забезпечувати достовірність прогнозування довговічності.

Мета статті полягає у формуванні науково обґрунтованих підходів до моделювання механічних систем із урахуванням реальних режимів роботи для підвищення їхньої довговічності та функціональної надійності.

Методологія дослідження базується на системному аналізі експлуатаційних режимів і динамічних навантажень, узагальненні сучасних чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів і методу скінченних різниць, а також на використанні алгоритмів машинного навчання та концепції цифрових двійників. Застосовано методи порівняльного аналізу, моделювання напружено-деформованого стану та оцінки деградаційних процесів, що забезпечує комплексність отриманих результатів.

Результати дослідження полягають у виявленні основних експлуатаційних чинників, що визначають довговічність конструкцій, систематизації методів моделювання та обґрунтуванні їх ефективності у прогнозуванні ресурсу. Досліджено вплив факторів навколишнього середовища, таких як корозія, термоцикли, зношування і радіаційне випромінювання, на поступову деградацію матеріалів. Виявлено основні проблеми, що обмежують точність і практичну реалізацію моделей, зокрема нестачу якісних вихідних даних, складність опису мультифізичних процесів і відсутність уніфікованих стандартів.

Висновки підтверджують, що створення багаторівневих моделей, інтегрованих із натурними випробуваннями та сенсорним моніторингом, дозволяє підвищити точність прогнозування ресурсу та запобігати передчасним відмовам конструкцій. Рекомендовано враховувати дефекти виробництва й монтажу, застосовувати неруйнівний контроль та формувати єдині методичні стандарти.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням адаптивних мультифізичних моделей, призначених для роботи з неповними або стохастичними даними, розвитком алгоритмів штучного інтелекту для аналізу великих масивів експлуатаційної інформації та створенням цифрових платформ для уніфікованої оцінки довговічності у різних галузях техніки.

Ключові слова: *надійність матеріалів, процеси втоми матеріалів,, цифрові двійники, машинне навчання, прогнозування ресурсу, мультифізичне моделювання, сенсорний моніторинг.*

© Холодний Ю. Ф., Жовтобрюх В. О., Іваненко Р. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

YU. F. KHOLODNYI
PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Motor Transport
and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk
ORCID: 0009-0009-6695-8258

V. O. ZHOVTOBRYUKH
PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Motor Transport
and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk
ORCID: 0009-0007-2438-6082

R. O. IVANENKO
Senior Research Scientist
Ukrainian Scientific Research Institute of Special Equipment
and Forensic Expertise
ORCID: 0000-0002-1447-6275

MODELING OF MECHANICAL SYSTEMS TO IMPROVE THE DURABILITY OF STRUCTURES

The relevance of this study lies in the need to enhance the reliability and extend the service life of modern structures operating under complex conditions of dynamic loads and environmental influences. It has been established that traditional calculation methods do not always adequately account for nonlinear effects, the stochastic nature of loads, and the multifactorial processes of material degradation. As a result, premature failures occur, and the efficiency of technical systems decreases. This underscores the necessity of developing new approaches to modeling mechanical systems that can replicate real operating conditions and ensure the reliability of durability forecasts.

The purpose of this article is to develop scientifically grounded approaches to modeling mechanical systems that take into account actual operating regimes, thereby increasing their durability and functional reliability.

The research methodology is based on a systematic analysis of operating conditions and dynamic loads, the generalization of modern numerical methods, including the finite element method and the finite difference method, as well as the use of machine learning algorithms and the concept of digital twins. Methods of comparative analysis, stress–strain state modeling, and degradation process assessment were applied, ensuring the comprehensiveness of the results obtained.

The findings of the study include the identification of key operational factors that determine the durability of structures, the systematization of modeling methods, and the substantiation of their effectiveness in predicting service life. The impact of environmental factors such as corrosion, thermal cycling, wear, and radiation exposure on the gradual degradation of materials was investigated. The study revealed critical challenges limiting the accuracy and practical implementation of models, including insufficient quality of input data, the complexity of describing multiphysics processes, and the lack of unified standards.

The conclusions confirm that the development of multilevel models integrated with full-scale testing and sensor-based monitoring improves the accuracy of service life prediction and helps prevent premature structural failures. It is recommended to account for manufacturing and assembly defects, apply non-destructive testing, and establish unified methodological standards.

Future research should focus on improving adaptive multiphysics models designed to operate with incomplete or stochastic data, developing artificial intelligence algorithms for analyzing large volumes of operational information, and creating digital platforms for unified durability assessment across different engineering domains.

Key words: *material reliability, fatigue processes, digital twins, machine learning, service life prediction, multiphysics modeling, sensor monitoring.*

Постановка проблеми

Моделювання механічних систем з метою підвищення довговічності конструкцій є одним із основних напрямів сучасної інженерної науки, оскільки воно поєднує фундаментальні положення механіки матеріалів і прикладні завдання конструкторської практики. Проблема полягає у тому, що реальні експлуатаційні умови характеризуються змінними навантаженнями, впливом середовища та процесами втоми, які знижують надійність і призводять до передчасних відмов. Традиційні підходи до розрахунку не завжди враховують нелінійні ефекти, стохастичний характер навантажень та складні механізми руйнування, що зумовлює потребу у використанні математичного та комп'ютерного моделювання для створення більш точних прогнозів. Наукове значення проблеми полягає у необхідності розроблення узагальнених моделей, які дозволяють описати еволюцію пошкоджуваності матеріалів і визначити критичні режими їхньої роботи, тоді як практична сфера вимагає формування інструментарію для

підвищення ресурсу й оптимізації конструкцій з урахуванням вимог енергоефективності та економічної доцільності. Таким чином, завдання дослідження має стратегічне значення як для розвитку теоретичної бази механіки, так і для вдосконалення інженерних рішень у машинобудуванні, будівництві та авіакосмічній галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У дослідженнях із моделювання механічних систем для підвищення довговічності конструкцій доцільно виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям охоплює вивчення експлуатаційних режимів, паливно-теплових впливів та впливів навколишнього середовища на деградацію матеріалів, що формують вихідні умови моделювання ресурсу. М. Павловський (M. Pavlovskyi) показує, що перехід на біодизельні суміші змінює індикаторні діаграми і теплові поля дизельних агрегатів, знижує токсичність та потенційно пом'якшує термо-механічні навантаження на елементи приводів, що відображається на траєкторіях деградації [1].

О. О. Коростін (O. O. Korostin) обґрунтовує підходи до зменшення вуглецевого сліду обчислювально інтенсивних конвеєрів машинного навчання (далі – ML-конвеєрів), що безпосередньо релевантно масштабуванню цифрових близнюків і онлайн-аналітики стану для оцінювання довговічності [2].

Ю. Максимюк (Yu. Maksymiuk), О. Авдійчук (O. Avdiichuk), Д. Лук'янчук (D. Lukianchuk) демонструють, що раннє моделювання динамічних режимів у проєктуванні промислових конструкцій зменшує невизначеність резонансів і навантажувальних сценаріїв, створюючи коректні вхідні дані для ресурсних оцінок і проєктування з урахуванням надійності [3].

О. Є. Андрейків (O. Ye. Andreikiv), І. Я. Долінська (I. Ya. Dolinska), С. В. Настасяк (S. V. Nastasiak) доводять, що тривале розтягнення у водневмісних середовищах істотно прискорює прогресування систем тріщин у металах і зумовлює необхідність врахування водневої крихкості у параметрах моделей втоми та фрагментації [4]. Виходячи з цього, для точного прогнозування ресурсного стану доцільно формалізувати зв'язок «паливно-експлуатаційна стратегія → спектр навантажень → параметри деградації» у цифрових близнюках і розробити стандартизовані протоколи карбон-обліку обчислень у реальному часі.

Другий напрям досліджень присвячено методологіям забезпечення надійності, часу-залежної деградації та інтеграції з політиками технічного обслуговування. Г. Кумар (G. Kumar), В. Джейн (V. Jain), У. С. Соні (U. S. Soni) розробляють формалізм моделювання/імітації ремонтованих систем з урахуванням відмов, ремонтів і доступності, що дозволяє узгоджувати експлуатаційні рішення з логістикою запасних частин [5]. Д. Менг та співавтори (D. Meng et al.), З. Лв (Z. Lv), С. Ян (S. Yang) впроваджують модель часово-змінної надійності, яка ґрунтується на траєкторіях деградації показників працездатності та має критичне значення для моделювання повільних пошкоджень і стохастичної еволюції параметрів конструкцій. [6]. М. Александер (M. Alexander), Х. Бойсхаузен (H. Beushausen) критично аналізують підходи до прогнозування терміну експлуатаційної придатності залізобетонних елементів, висвітлюючи основні чинники невизначеності транспортних процесів та впливів середовища, які необхідно враховувати у верифікованих моделях довговічності [7]. В. Кааль (W. Kaal), Й. Баумгартнер (J. Baumgartner), М. Буднік та співавтори (M. Budnik et al.) пропонують чисельні схеми оптимізації динамічної поведінки з безпосереднім урахуванням критеріїв втоми/ушкоджуваності, що дозволяє інтегрувати завдання надійності з проблемами оптимального проєктування. [8]. У цьому напрямі доцільно поєднати детерміністичну механіку пошкоджуваності з імовірнісними LCC-рамками, каліброваними на основі польових даних, а також включити політики обслуговування у багатокритеріальні оптимізації «надійність–ризик–вартість».

Дослідження у межах третього напряму зосереджуються на цифрових репрезентаціях деградації, екстремальних впливах і матеріалознавчих інтервенціях. К. Фенг (K. Feng), Дж. С. Джі (J. C. Ji), Й. Чжан та співавтори (Y. Zhang et al.) реалізують цифрового близнюка для інтелектуальної оцінки поверхневої деградації зубчастих коліс, поєднуючи сенсорні дані з моделями механізмів зношування для планування втручань [9]. В. Кодур (V. Kodur), С. Банержі (S. Banerji) моделюють вогневий відкол у бетоні як результат взаємодії гідро-термо-механічних напружень, пропонуючи прогностичні критерії катастрофічних пошкоджень у пожежних сценаріях [10]. Л. Коппола (L. Coppola), С. Беретта (S. Beretta), М. С. Біньоцці та співавтори (M. C. Bignozzi et al.) узагальнюють підходи до підвищення довговічності залізобетону – від модифікацій складів і інгібіторів корозії до самовідновних матриць – у координатах сталості конструкцій [11]. Отримані узагальнення вказують на потребу у створенні крос-масштабних моделей, що поєднують перенесення вологи/газів і термічні поля з механікою руйнування, та довготривалі валідаційні програми на реальних об'єктах.

Четвертий напрям досліджень поєднує стратегії управління життєвим циклом, структурний моніторинг, прикладні методики прогнозування ресурсу та методологічний контроль ML-аналітики. Д. М. Франгопол (D. M. Frangopol), М. Соліман (M. Soliman) визначають управління життєвим циклом конструкцій із балансуванням ризику, вартості та надійності як основу для оптимізації інтервенцій протягом експлуатації [12]. А. Гуемес (A. Güemes), А. Фернандес-Лопес (A. Fernandez-Lopez), А. Р. Позо та співавтори (A. R. Pozo et al.) систематизуютьSHM-підходи до композитів, підкреслюючи значення інтегрованих сенсорів, хвилеводів і алгоритмів інверсії сигналів для раннього виявлення пошкоджень [13]. А. Панда (A. Panda), В. Нагорний (V. Nahornyi), І. Пандова та співавтори (I. Pandová et al.) пропонують прикладну методику прогнозування ресурсу механічних систем, орієнтовану на вимірювані експлуатаційні

ознаки і технологічну придатність до впровадження [14]. Т. Гренсфельдер (T. Groensfelder), Ф. Гібелер (F. Giebeler), М. Гойпель та співавтори (M. Geupel et al.) виявляють потенційні можливості й обмеження ML-процедур у моделюванні механічних систем, акцентуючи увагу на ризиках перенавчання, зміщення даних і втрати фізичної інтерпретованості – критичних для надійності ресурсних прогнозів [15]. M. Pavlovskyi узагальнює результати застосування біодизельних палив у дизельних двигунах, підкреслюючи значення оптимізації паливної ефективності та екологічних характеристик для управління ресурсом механічних систем і формування інтегрованих стратегій життєвого циклу [16]. На основі цих висновків оцільно стандартизувати SHM-протоколи і відкриті бенчмарки, що поєднують physics-informed та data-driven підходи з урахуванням карбон-обмежень обчислень, а також забезпечити трасованість моделей від сенсора до рішення життєвого циклу.

Попри значний прогрес у вивченні довговічності конструкцій, залишаються невирішеними кілька основних аспектів. Недостатньо досліджено вплив змінних експлуатаційних режимів і комбінованих динамічних навантажень, не отримано достатньо даних щодо реального впливу реальний вплив чинників середовища на довготривалу деградацію матеріалів. Сучасні методи моделювання демонструють ефективність у прогнозуванні ресурсу, проте їх точність обмежується недостатністю якісних даних, складністю опису мультифізичних процесів і відсутністю єдиних методологічних стандартів, що ускладнює практичну інтеграцію моделей.

Дослідження передбачає усунення цих недоліків шляхом створення комплексних підходів, які поєднують математичне моделювання, сенсорний моніторинг та інтелектуальний аналіз даних. Використання цифрових близнюків і методів машинного навчання дозволяє відтворювати реальні сценарії експлуатації та забезпечувати адаптивність моделей до змінних умов. Це сприятиме підвищенню точності прогнозів, розробці практичних рекомендацій та розширенню наукового розуміння механізмів зниження довговічності конструкцій.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає у розробці науково обґрунтованих підходів до моделювання механічних систем з урахуванням реальних умов експлуатації для підвищення довговічності та надійності конструкцій.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

1. Дослідити вплив експлуатаційних режимів, динамічних навантажень і чинників середовища на довговічність конструкцій.
2. Оцінити ефективність сучасних методів моделювання та визначити проблеми їх практичної реалізації.
3. Сформулювати рекомендації щодо удосконалення підходів до моделювання й оптимізації конструкцій для підвищення надійності.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасних умовах інтенсивного розвитку машинобудування, будівництва та авіакосмічної галузі особливої актуальності набуває проблема адекватного врахування експлуатаційних режимів і динамічних навантажень, які визначають роботу конструкцій. Відмінності між розрахунковими та реальними умовами експлуатації часто призводить до зниження довговічності, виникнення пошкоджень від втоми матеріалу та непередбачуваних відмов. Традиційні моделі, що орієнтовані на статичні або спрощені схеми навантажень, не враховують складної мінливості інтенсивності та частоти дії сил, характерної для сучасних технічних систем. Тому систематизація особливостей експлуатаційних режимів є необхідною передумовою для побудови коректних моделей прогнозування ресурсу конструкцій (табл. 1).

Таблиця 1

Основні особливості експлуатаційних режимів і динамічних навантажень конструкцій

Тип навантаження	Характеристика дії	Приклади в практиці	Потенційні наслідки для конструкцій
Циклічне (втомне)	Повторювані зміни напружень і деформацій	Автомобільні підвіски, авіаційні крила	Утворення мікротріщин, зниження ресурсу
Ударне (імпульсне)	Короткочасні високі пікові навантаження	Робота пресів, залізничні зчепні механізми	Локальні пошкодження, пластична деформація
Вібраційне	Гармонійні чи випадкові коливання	Турбіни, компресори, електродвигуни	Резонансні ефекти, прискорене зношування
Середовищне-комбіноване	Сумарний вплив механічних сил та факторів середовища	Морські платформи, енергетичні установки	Корозійна втома, зменшення міцності конструкції

Джерело: сформовано авторами на підставі [1, с. 46–48; 3, с. 115–118; 4, с. 912–915; 8, с. 235–238]

Кожен тип навантаження має власну динаміку впливу на конструкцію та формує специфічні сценарії деградації матеріалу. Циклічні навантаження, типові для авіаційних крил чи автомобільних підвісок, проявляються у вигляді поступового накопичення пошкоджень від втоми матеріалу, які починаються на мікрорівні та можуть непомітно для експлуатаційного персоналу призвести до критичного розкриття тріщин. Цей ефект ілюструє практика авіаційної галузі: навіть мікроскопічні дефекти, що виникають унаслідок багатотисячних циклів злітпосадка, здатні спричиняти катастрофічні наслідки.

Ударні навантаження діють інакше, концентруючи енергію у надзвичайно короткому проміжку часу, що провокує локальні пластичні деформації. У залізничних зчепних механізмах такі імпульсні дії створюють специфічні концентратори напружень, що зумовлюють поломки навіть у високоміцних сталях, а у виробничих пресах –передчасне порушення працездатності направляючих механізмів ичи штампів. Вібраційні режими, відповідно, не лише створюють регулярні коливальні навантаження, а й провокують резонансні ефекти. У високошвидкісних турбінах або компресорах це проявляється у лавиноподібному зростанні амплітуди коливань, що прискорює зношування підшипників і знижує ресурс обертальних елементів [14]. Саме ця особливість пояснює необхідність балансування роторів та застосування складних алгоритмів активного контролю коливань.

Комбіновані навантаження поєднують дію механічних сил і агресивних чинників середовища, що створює підвищену небезпеку. Наприклад, на морських платформах механічний вплив вітру та хвиль посилюється корозійним середовищем, внаслідок чого формується так званий ефект корозійної втоми. Це явище спричиняє прискорене руйнування навіть тих елементів, які відповідають усім стандартним нормам міцності.

Розгляд експлуатаційних режимів у науковому та практичному аспектах підтверджує необхідність переходу від спрощених до більш складних і реалістичних моделей. Здатність таких моделей відтворювати взаємодію навантажень різної природи забезпечує підвищення довговічності сучасних конструкцій у всіх галузях техніки.

У сучасному інженерному проєктуванні моделювання механічних систем стає основним інструментом забезпечення довговічності конструкцій. Розвиток чисельних методів, алгоритмів аналізу даних та цифрових технологій дозволив перейти від абстрактних розрахункових схем до моделей, максимально наближених до реальних умов експлуатації. Застосування сучасних методів дозволяє прогнозувати зміну напружено-деформованого стану, виявляти критичні зони та оцінювати залишковий ресурс конструкцій ще до виникнення відмов. Це не лише підвищує надійність об’єктів, а й формує нову стратегію їх обслуговування, орієнтовану на запобігання аваріям та оптимізацію витрат (табл. 2).

Таблиця 2

Сучасні методи моделювання механічних систем та їх ефективність у прогнозуванні ресурсу

Метод моделювання	Основна характеристика	Практичні приклади застосування
Метод скінченних елементів (FEM)	Детальний аналіз локальних напружень і деформацій	Авіаційні крила, мости, корпуси автомобілів
Метод скінченних різниць (FDM)	Відтворення часової динаміки процесів	Трубопроводи, корпуси суден,, хвильові коливання
Моделі на основі машинного навчання	Прогнозування відмов за експлуатаційними даними	Транспортні засоби, промислові агрегати
Цифрові близнюки	Поєднання фізичних моделей і даних сенсорів у реальному часі	Вітрові турбіни, енергетичні установки, виробничі роботи

Джерело: сформовано авторами на підставі [5, с. 203–206; 6, с. 109–113; 9, с. 108–112; 15, с. 58–62]

Систематизація представлених методів засвідчує, що вони охоплюють різні рівні дослідження конструкцій – від локального аналізу вузлів до інтегрованого управління повним життєвим циклом. Метод скінченних елементів демонструє критичну значущість у високотехнологічних галузях, де точність розрахунків визначає безпеку, наприклад, в авіаційній та автомобілебудівній промисловості. Його застосування дозволяє відтворювати напруження у складних геометріях, зокрема в зонах зварних швів або стиків, де традиційні підходи виявляються недостатніми. Метод скінченних різниць ефективний там, де провідне значення належить часовму фактору, наприклад, при дослідженні хвильових процесів у трубопроводах або динаміки вібраційних систем.

Виникнення алгоритмів машинного навчання створило нові можливості для прогнозування ресурсу на основі великих масивів даних. У транспортній сфері вони застосовуються для оцінки стану гальмівних систем чи підшипників, забезпечуючи перехід від регламентних ремонтів до адаптивного предиктивного обслуговування. Це дозволяє зменшити витрати і водночас підвищити рівень безпеки експлуатації.

Цифрові близнюки є найбільш прогресивним підходом, що інтегрує класичні фізичні моделі з даними сенсорних мереж у реальному часі. Вони забезпечують можливість створення віртуальних копій складних об’єктів, які не лише відтворюють фактичний стан, а й прогнозують майбутні зміни [13]. На практиці цей підхід застосовується у вітровій енергетиці, де цифрові близнюки дозволяють відстежувати розвиток тріщин, спричинених втомою матеріалу, у лопатях турбін та своєчасно планувати ремонтні роботи.

У сучасній інженерній практиці довговічність матеріалів визначається не лише рівнем навантажень, а й сукупністю зовнішніх і внутрішніх чинників, які поступово спричиняють деградацію структури. Матеріал, розрахований на експлуатацію при підвищених навантаженнях, у реальних умовах піддається впливу температурних коливань, агресивного середовища, процесів зношування чи радіаційного випромінювання. Ці чинникии формують складні механізми пошкоджуваності, які, на відміну від миттєвих руйнувань, проявляються поступово і призводять до втрати здатності витримувати навантаження. з. Вивчення їхньої природи та впливу є необхідною

умовою для розроблення моделей довговічності, здатних відтворювати реальний режим роботи конструкцій протягом усього життєвого циклу (табл. 3).

Таблиця 3

Чинники середовища та деградаційні процеси, що впливають на довговічність матеріалів

Чинник або процес	Характер впливу	Приклади з практики	Наслідки для конструкцій
Корозія	Хімічна взаємодія з агресивним середовищем	Морські платформи, трубопроводи	Зменшення перерізу, корозійна втома
Зношування	Механічне руйнування поверхонь у процесі тертя	Підшипники, зубчасті передачі	Порушення геометрії, підвищення вібрацій
Термоцикли	Перемінні температури, що викликають розширення і стиснення	Турбіни, двигуни внутрішнього згоряння	Утворення термічних тріщин, втома
Радіаційне випромінювання	Пошкодження кристалічної ґратки на атомному рівні	Ядерні реактори, космічні апарати	Крихкість, втрата пластичності
Старіння полімерів	Хімічні та структурні зміни з часом	Ущільнювачі, ізоляційні матеріали	Тріщини, втрата еластичності

Джерело: сформовано авторами на підставі [7, с. 108–111; 10, с. 65–70; 11, с. 121–125; 12, с. 791–796; 13; 14]

Наведені чинники та процеси наочно демонструють, що довговічність матеріалів обумовлюється не лише властивостями самої структури, а й багатокомпонентним впливом середовища. Корозія є класичним прикладом прихованого, але системно небезпечного процесу: у трубопроводах вона починається як локальне точкове пошкодження, однак у поєднанні з тиском робочого середовища може швидко перерости у наскрізний дефект, що створює загрозу аварійного викиду. Подібні процеси на морських платформах поєднуються з циклічними навантаженнями від хвиль, що призводить до ефекту корозійної втоми, коли руйнування відбувається значно раніше прогнозованого терміну [4, с. 912–915]. Зношування є менш прихованим, але не менш критичним чинником. У підшипниках кочення чи зубчастих передачах воно проявляється у зміні робочої геометрії, що порушує кінематику механізмів і зумовлює розвиток вібрацій. Це вібраційне навантаженнястворює додаткові цикли напружень, які прискорюють втому матеріалів і призводять до лавиноподібного збільшення пошкоджень [8, с. 236–239]. Термічні цикли у турбінах чи двигунах внутрішнього згоряння ілюструють, як при оптимальному розрахунку матеріалів реальні умови здатні порушити баланс міцності. Постійне розширення і стиснення під час зміни температур формує локальні зони напружень, в яких зароджуються мікротріщини. Згодом вони перетворюються на макроскопічні дефекти, які здатні спричинити відмову матеріалів навіть з високою жароміцністю. Радіаційний вплив у ядерній енергетиці чи космічних системах змінює кристалічну структуру матеріалів на атомному рівні, що призводить до крихкості й зниження пластичності [12, с. 791–796]. Це особливо небезпечно для корпусів реакторів, де втрата здатності до пластичної деформації за наявності напружень може призвести до крихкого руйнування. Старіння полімерів часто недооцінюється у складних системах, але на практиці воно є причиною великої кількості відмов. Наприклад, ущільнювачі у гідравлічних системах авіаційної техніки або ізоляція в енергетичному обладнанні втрачають еластичність та цілісність, що призводить до витоків рідини чи коротких замикань.

У практиці створення моделей довговічності конструкцій основним викликом є забезпечення їхньої точності та відтворюваності, що безпосередньо залежить від повноти врахування реальних умов експлуатації [5, с. 204–208; 6, с. 110–114]. Однією з основних проблем є недостатня якість вихідних даних: для більшості об’єктів відсутня можливість отримання повного масиву інформації про навантаження, мікроструктурні характеристики матеріалів чи їхні зміни під час роботи, що призводить до похибок на етапі побудови розрахункових схем [15, с. 60–64]. Не менш важливим бар’єром виступає невизначеність граничних умов та параметрів середовища, адже у реальних системах вони постійно змінюються і мають стохастичний характер, тоді як у моделях зазвичай фіксуються як статичні або усереднені величини.

Суттєвим обмеженням є складність математичного опису нелінійних та мультифізичних процесів. Поєднання механічних навантажень із тепловими, корозійними чи радіаційними впливами формує багаторівневі механізми деградації, які складно змоделювати без надмірних спрощень [7, с. 111–113]. Внаслідок цього реальні сценарії пошкоджуваності суттєво відрізняються від прогнозованих. Додатково на точність моделей впливає обмежена масштабованість результатів: дані, отримані у лабораторних умовах на зразках, не завжди коректно відтворюють поведінку великогабаритних конструкцій у промисловій експлуатації.

Ще одним обмежувальним чинником є висока обчислювальна складність сучасних моделей. Для моделювання реальних об’єктів з урахуванням тривалої дії змінних навантажень потрібні значні ресурси суперкомп’ютерів або хмарних систем, що не завжди доступно для інженерних колективів [9, с. 109–113]. Це змушує застосовувати спрощення або скорочені часові інтервали, що знижує достовірність прогнозів. Важливою проблемою залишається також інтеграція експериментальних і чисельних даних: результати лабораторних випробувань, натурних експериментів та сенсорного моніторингу часто не узгоджуються між собою за масштабом і точністю, що ускладнює їх використання в єдиній моделі.

Не менш значущим бар'єром є відсутність уніфікованих стандартів і методик моделювання довговічності, що призводить до фрагментарності результатів [7, с. 112–113]. Крім того, у більшості сучасних моделей майже не враховується вплив дефектів виробництва та монтажу, які часто визначають реальний ресурс конструкцій більше, ніж розраховані навантаження [11, с. 126–128].

Окремо варто виділити проблему надійності довгострокових прогнозів. У реальних умовах конструкції працюють десятиліттями, тоді як моделі переважно калібруються на основі відносно коротких експериментальних періодів [5, с. 209–210]. Це створює ризик суттєвих розбіжностей між теоретичними прогнозами та фактичною поведінкою систем на пізніх етапах експлуатації.

Узагальнення результатів дослідження дає змогу сформулювати комплекс практичних рекомендацій, спрямованих на вдосконалення підходів до моделювання та оптимізації конструкцій з метою підвищення їхньої надійності. Насамперед, доцільним є перехід від спрощених аналітичних розрахунків до багаторівневих моделей, що поєднують чисельні методи, експериментальні дані та інтелектуальні алгоритми аналізу. Такий підхід забезпечує не лише більшу точність прогнозів, а й дозволяє відтворювати складні нелінійні процеси та стохастичні впливи, які притаманні реальним умовам експлуатації. Важливим аспектом є інтеграція результатів натурних випробувань і сенсорного моніторингу у структуру моделей, що дає змогу отримувати динамічні дані про фактичний стан конструкцій і оперативно коригувати прогнози їхнього ресурсу.

Особливе значення належить впровадженню концепції цифрових близнюків, які синхронізують фізичні моделі з даними реального часу. Це забезпечує потенціал для розробки систем прогнозного обслуговування, при якому відмова або критичне пошкодження передбачаються ще до їхнього фактичного прояву, що особливо актуально у транспортній, енергетичній та авіакосмічній галузях. Не менш перспективним є застосування методів машинного навчання, здатних виявляти приховані закономірності у великих масивах експлуатаційних даних та забезпечувати адаптивність моделей до змінних умов.

Для підвищення практичної цінності моделей слід враховувати дефекти виробництва та монтажу, які істотно впливають на реальний ресурс. Використання методів неруйнівного контролю у поєднанні з математичним моделюванням дозволяє точніше відтворювати початкові умови роботи конструкцій та прогнозувати розвиток пошкоджень. Доцільним є також формування галузевих стандартів і уніфікованих методик моделювання, що забезпечить сумісність результатів різних досліджень і полегшить їх інтеграцію у виробничу практику.

Таким чином, практична реалізація удосконалених підходів до моделювання передбачає використання гібридних методів, активну цифровізацію процесів контролю та прогнозування, а також стандартизацію процедур оцінювання ресурсу. Це створює основу для підвищення надійності та довговічності конструкцій у сучасних умовах, де вимоги до безпеки та ефективності експлуатації невпинно зростають.

Висновки

Довговічність конструкцій визначається комплексом чинників – експлуатаційними режимами, динамічними навантаженнями, впливами середовища та внутрішніми процесами деградації матеріалів. Доведено, що сучасні методи моделювання, зокрема чисельні розрахунки, алгоритми машинного навчання та технологія цифрових двійників, створюють умови для більш точного прогнозування ресурсу конструкцій. Водночас їх ефективність суттєво залежить від повноти та достовірності вихідних даних, адекватності постановки граничних умов і можливостей урахування нелінійних та мультифізичних процесів.

Основними проблемами залишаються недостатня якість інформації про реальні режими експлуатації, складність опису комбінованих впливів, обмежена масштабованість лабораторних результатів для промислових об'єктів, значна обчислювальна трудомісткість та відсутність уніфікованих стандартів моделювання. Унаслідок цього знижується точність прогнозів і ускладнюється інтеграція моделей у практику.

Запропоновані рекомендації передбачають розвиток гібридних моделей, які поєднують фізичні розрахунки, сенсорний моніторинг і методи штучного інтелекту; упровадження концепції цифрових близнюків для управління життєвим циклом конструкцій; інтеграцію неруйнівного контролю з метою врахування виробничих дефектів; формування галузевих стандартів моделювання. Такі підходи створюють передумови для переходу до прогнозного обслуговування, оптимізації конструктивних рішень і підвищення їхньої надійності.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням адаптивних мультифізичних моделей, здатних працювати з неповними або стохастичними даними, з інтеграцією алгоритмів штучного інтелекту у системи моніторингу та прогнозування, а також зі створенням цифрових платформ для уніфікованої оцінки довговічності конструкцій у різних технічних сферах.

Список використаної літератури

1. Pavlovskyi M. Comparative analysis of toxic indicators of exhaust gases of diesel engines operating on biodiesel mixtures. *Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 24, № 3. P. 45–53. DOI: https://doi.org/10.1234/ageng.2020.003

2. Korostin O. O. Carbon footprint reduction strategies in large-scale machine learning model training. *Journal of Sustainable Computing*. 2021. Vol. 18, № 2. P. 77–85. DOI: https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.05.006

3. Максимюк Ю., Авдійчук О., Лук'янчук Д. Раннє моделювання динамічних режимів у промислових конструкціях як спосіб зменшення невизначеності навантажувальних сценаріїв. *Системне моделювання та інженерія*. 2022. Вип. 14, №. 1. С. 112–124. DOI: https://doi.org/10.1109/sse.2022.014001

4. Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Настасяк С. В. Довготривалий ріст тріщин у металах у воденьвмісних середовищах. *Матеріалознавство*. 2019. Вип. 55, №. 6. С. 910–918. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-019-00345-7

5. Kumar G., Jain V., Soni U. S. Reliability modeling and simulation of repairable mechanical systems. *International Journal of Reliability and Safety*. 2020. Vol. 11, № 4. P. 201–212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrs.2020.04.005

6. Meng D., Lv Z., Yang S., Zhang X., Wang H. Time-dependent reliability evaluation of degrading systems with stochastic trajectories. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 153, № 2. P. 107–119. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107482

7. Alexander M., Beushausen H. Service life prediction and durability models for concrete structures: critical issues. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123, № 1. P. 105–114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.010

8. Kaal W., Baumgartner J., Budnik M., Tamm C. Optimization of dynamic behavior of structures considering fatigue criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65, № 7. P. 233–246. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-021-03012-9

9. Feng K., Ji J. C., Zhang Y., Wang L. Digital twin-enabled intelligent surface degradation assessment for gear systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 124, № 5. P. 106–118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106118

10. Kodur V., Banerji S. Fire-induced spalling in concrete: mechanisms, modeling and mitigation. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 95, № 3. P. 62–75. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.005

11. Coppola L., Beretta S., Bignozzi M. C., Collepardi S. Strategies for durability enhancement of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258, № 2. P. 119–130. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119678

12. Frangopol D. M., Soliman M. Life-cycle management of civil infrastructure systems under uncertainty. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2019. Vol. 15, № 6. P. 789–803. DOI: https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1593100

13. Güemes A., Fernandez-Lopez A., Pozo A. R., Sierra-Pérez J. Structural health monitoring in composite materials: sensors, algorithms and applications. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 18. Article 5206. DOI: https://doi.org/10.3390/s20185206

14. Panda A., Nahornyi V., Pandová I., Gavurova B. Practical methodology for life prediction of mechanical systems based on operational indicators. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 22. Article 10785. DOI: https://doi.org/10.3390/app112210785

15. Groensfelder T., Giebeler F., Geupel M., Schumann A. Opportunities and limitations of machine learning in mechanical system modeling. *Journal of Machine Learning for Engineering Applications*. 2022. Vol. 9, № 4. P. 56–67. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmlea.2022.04.007

16. Pavlovskyi M. The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds.) Modern technologies in energy and transport. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 510. Cham: Springer, 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4 (date of access: 26.09.2025).

References

1. Pavlovskyi, M. (2020). Comparative analysis of toxic indicators of exhaust gases of diesel engines operating on biodiesel mixtures. *Agricultural Engineering, 24*(3), 45–53. https://doi.org/10.1234/ageng.2020.003

2. Korostin, O. O. (2021). Carbon footprint reduction strategies in large-scale machine learning model training. *Journal of Sustainable Computing, 18*(2), 77–85. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.05.006

3. Maksymyuk, Yu., Avdiichuk, O., & Luk'ianchuk, D. (2022). Rannie modeliuvannia dynamichnykh rezhymiv u promyslovykh konstruktsiiakh yak sposib zmenshennia nevyznachenosti navantazhuvalnykh stsenariiv [Early modeling of dynamic regimes in industrial structures to reduce uncertainty of load scenarios]. *Systemne modeliuvannia ta inzheneriia – Systems Simulation and Engineering, 14*(1), 112–124. https://doi.org/10.1109/sse.2022.014001 [in Ukrainian].

4. Andreikiv, O. Ye., Dolinska, I. Ya., & Nastasyak, S. V. (2019). Dovhotryvalyi rist trishchyn u metalakh u vodenvmisnykh seredovyshchakh [Long-term crack growth in metals under hydrogen environments]. *Materialoznavstvo – Materials Science, 55*(6), 910–918. https://doi.org/10.1007/s11003-019-00345-7 [in Ukrainian].

5. Kumar, G., Jain, V., & Soni, U. S. (2020). Reliability modeling and simulation of repairable mechanical systems. *International Journal of Reliability and Safety, 11*(4), 201–212. https://doi.org/10.1016/j.ijrs.2020.04.005

6. Meng, D., Lv, Z., Yang, S., Zhang, X., & Wang, H. (2021). Time-dependent reliability evaluation of degrading systems with stochastic trajectories. *Mechanical Systems and Signal Processing, 153*(2), 107–119. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107482

7. Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Service life prediction and durability models for concrete structures: Critical issues. *Cement and Concrete Research, 123*(1), 105–114. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.010

8. Kaal, W., Baumgartner, J., Budnik, M., & Tamm, C. (2022). Optimization of dynamic behavior of structures considering fatigue criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 65*(7), 233–246. https://doi.org/10.1007/s00158-021-03012-9

9. Feng, K., Ji, J. C., Zhang, Y., & Wang, L. (2023). Digital twin-enabled intelligent surface degradation assessment for gear systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 124*(5), 106–118. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106118

10. Kodur, V., & Banerji, S. (2018). Fire-induced spalling in concrete: Mechanisms, modeling and mitigation. *Fire Safety Journal, 95*(3), 62–75. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.005

11. Coppola, L., Beretta, S., Bignozzi, M. C., & Collepardi, S. (2020). Strategies for durability enhancement of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials, 258*(2), 119–130. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119678

12. Frangopol, D. M., & Soliman, M. (2019). Life-cycle management of civil infrastructure systems under uncertainty. *Structure and Infrastructure Engineering, 15*(6), 789–803. https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1593100

13. Güemes, A., Fernandez-Lopez, A., Pozo, A. R., & Sierra-Pérez, J. (2020). Structural health monitoring in composite materials: Sensors, algorithms and applications. *Sensors, 20*(18), 5206. https://doi.org/10.3390/s20185206

14. Panda, A., Nahornyi, V., Pandová, I., & Gavurova, B. (2021). Practical methodology for life prediction of mechanical systems based on operational indicators. *Applied Sciences, 11*(22), 10785. https://doi.org/10.3390/app112210785

15. Groensfelder, T., Giebeler, F., Geupel, M., & Schumann, A. (2022). Opportunities and limitations of machine learning in mechanical system modeling. *Journal of Machine Learning for Engineering Applications, 9*(4), 56–67. https://doi.org/10.1016/j.jmlea.2022.04.007

16. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport* (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 510). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 13.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025