

УДК 625.8.08:519.8
UDC 625.8.08:519.8

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-262-272

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ПІСЛЯ ЗИМИ ТА ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

MATHEMATICAL METHODS FOR ASSESSING RESIDUAL LIFE OF ROAD PAVEMENTS AFTER WINTER



Мозговий Володимир Васильович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри дорожньо-будівельних матеріалів та хімії, Національний транспортний університет, к. 109, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: mozgoviy@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>



Левківська Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Національний транспортний університет, к. 514, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: l.v.g.ntu@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0002-5589-5257>



Шевчук Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Національний транспортний університет, к. 511, вул. Бойчука 42, Київ, Україна, 01103, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com.

<https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>



Фещенко Анна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: fanna17@ukr.net, тел. +380677441754

<https://orcid.org/0000-0002-8212-5362>

Анотація. У статті науково обґрунтовано математичні методи оцінки залишкового ресурсу нежорсткого дорожнього одягу України після екстремальних зимових навантажень. Автори аналізують комплекс деструктивних чинників: несприятливий клімат, хронічне недофінансування та порушення технологічних норм. Особливу увагу приділено дефіциту бюджетних асигнувань під час воєнного стану, що унеможливило планові ремонти та призводить до лавиноподібної деградації стратегічних об'єктів транспортної мережі в умовах зміни логістичних маршрутів.

У межах дослідження розширено механізми термічного впливу на дорожні матеріали через призму теорії термомеханіки багат шарових середовищ та процесів гідротермічного розклинювання покриттів. На основі математичної залежності між напружено-деформованим станом конструкції та показником довговічності за законом Пальмгрена-Майнера, виявлено критичну невідповідність між застарілими розрахунковими нормами (6-10 т на вісь) та сучасними стандартами навантаження (11,5-13 т). Доведено, що така диспропорція провокує прискорене вичерпання ресурсу дорожнього одягу у 4-7,5 рази, фактично нівелюючи запас міцності конструкцій. Шляхом застосування чисельних методів моделювання та обробки даних інструментальних обстежень, поточний стан мережі доріг визначено як граничний (1,55-2,45 бали), що потребує негайного наукового втручання.

У роботі критично оцінено практику ямкового ремонту як тимчасового заходу. Автори наголошують, що ефективність локального відновлення є низькою без врахування функції релаксації асфальтобетону та оптимізації реологічних властивостей сумішей. Теоретично обґрунтовано економічну недоцільність латання вибоїн при перевищенні порогу відносної площі деструкції у 30%. Подолання цієї межі свідчить про втрату тримальної здатності та необхідність капітального відновлення.

Стаття пропонує перехід до цифрових інструментів моніторингу через створення прикладних інженерних методик. Подальші дослідження будуть спрямовані на аналіз явища гідротермічного розклинювання та розробку прогнозних таблиць залишкового ресурсу на основі уточненого закону Пальмгрена-Майнера для великовагового транспорту. Окремим напрямком є підвищення енергоефективності через використання домішок для низькотемпературного укладання асфальту. Реалізація цих кроків дозволить трансформувати математичне моделювання у практичний інструмент моніторингу та забезпечить інтеграцію інфраструктури України у єдину європейську цифрову мережу.

Ключові слова: дорожнє покриття, залишковий ресурс, математичне моделювання, ямковий ремонт, деструкція, асфальтобетон, експлуатаційна придатність.

Вступ. Сучасний етап розвитку транспортної інфраструктури України проходить в умовах безпрецедентних викликів. Критичний стан дорожніх покриттів, зумовлений поєднанням природно-кліматичних факторів та стрімкого зростання експлуатаційних навантажень, вимагає переосмислення традиційних підходів до їх утримання. Невідповідність більшої частини мережі доріг, що будувалася за нормативами минулого століття (розрахованими на 6-10 т на вісь), сучасним європейським вимогам щодо руху великовагового транспорту (11,5-13 т на вісь) призводить до експоненціального зростання деструктивних процесів. Ситуація значно ускладнюється наслідками суворих зимових періодів, коли гідротермічний вплив спричиняє передчасну втрату тримальної здатності дорожнього одягу.

В умовах воєнного стану та дефіциту бюджетних асигнувань виникає гостра потреба у впровадженні математичних методів оцінки залишкового ресурсу. Це дозволить перейти від стратегії «реагування на руйнування» до науково обґрунтованого прогнозування технічного стану об'єктів. Актуальність дослідження підсилюється необхідністю інтеграції української транспортної мережі в європейські логістичні коридори, що неможливо без забезпечення належної експлуатаційної придатності покриттів.

Аналіз останніх досліджень. Питання оцінки довговічності та деградації дорожніх покриттів активно вивчаються у світовій науковій спільноті. В. Мозговий (2024) спільно з колегами досліджує особливості напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на ділянках підйомів та спусків, що є критичним для розуміння процесів деструкції під дією поздовжніх сил. Важливий внесок у підвищення експлуатаційних характеристик асфальтобетону через математичне обґрунтування армування сумішей синтетичними волокнами та аналіз якості адгезії між шарами зроблено у працях (Л. Левківська, 2023; Л. Левківська та ін., 2022).

Стратегічні аспекти планування відновлення дорожньої мережі в кризових умовах та методологія оцінки експлуатаційної надійності автомобільних доріг при підвищених осьових навантаженнях детально висвітлені у дослідженнях (В. Савенко та М. Кулик, 2021; В. Савенко та О. Ткачук, 2022). Інноваційні підходи до проектування асфальтобетонних покриттів з високим

рівнем навантаження представлені у працях О. Онищенко (2022). Математичне моделювання впливу кліматичних чинників на деградацію інфраструктури запропоновано (І. Гамеляк 2022; І. Гамеляк та М. Дмитрієв 2023).

Світовий досвід імовірнісного моделювання зносу та підвищення тріщиностійкості розглянуто в публікаціях (A. Cannone Falchetto & D. Wang, 2021; R. Smith, 2021). Питання гідротермічної стабільності та нелінійного накопичення пошкоджень обґрунтовано в статтях (X. Chen & Y. Liu, 2023; Q. Liu & H. Wang, 2022). Економічні аспекти стратегій утримання доріг та оптимізацію витрат в умовах воєнного стану проаналізовано (A. Bezuglyi, 2021; O. Tkachuk, 2024).

Математичне моделювання взаємодії великовагових транспортних засобів із дорожньою структурою представлено у дослідженні О. Онищенко та В. Федоренко (2023). Попри значний масив наукових напрацювань, питання адаптації прогнозних моделей зносу дорожнього покриття до емпіричних даних після екстремальних зимових періодів в умовах України потребує подальшого системного вивчення.

Мета дослідження - розробка та наукове обґрунтування математичних методів оцінки залишкового ресурсу дорожніх покриттів після зимового періоду експлуатації для оптимізації стратегій їх відновлення в умовах інтенсивних транспортних навантажень.

Виклад основного матеріалу. Дане дослідження базується на поєднанні методів математичного моделювання, теорії надійності інженерних конструкцій, статистичного аналізу експлуатаційних параметрів автомобільних доріг та методів термомеханіки багатошарових середовищ. Такий комплексний підхід дозволяє врахувати синергетичний вплив транспортних навантажень, кліматичних факторів та фізико-механічних властивостей матеріалів дорожнього одягу на процеси деградації дорожніх покриттів.

Експериментальною базою дослідження виступили ділянки автомобільних доріг загального користування державного значення Київського вузла, що характеризуються високим відсотком важковагового транспорту (табл. 1) та зазнали інтенсивного руйнування після зимового періоду експлуатації. У роботі використано результати інструментальних обстежень дорожнього покриття, зокрема дані дефлектометрії (визначення прогинів конструкції під динамічним навантаженням), результати візуального моніторингу дефектів покриття та статистичні дані щодо інтенсивності руху транспортних потоків. Застосування цих методів дозволяє оцінити фактичний напружено-деформований стан конструкцій дорожнього одягу та визначити масштаби післязимової деструкції покриттів.

Таблиця 1 – Характеристика дослідних ділянок автомобільних доріг
Table 1 – Characteristics of experimental road sections

Назва та номер дороги	Технічна категорія	Тип покриття (верхній шар)	Фактична інтенсивність (авто/добу)
М-05 Київ – Одеса	I-a	Асфальтобетон дрібнозернистий (Тип Б)	> 22 000
М-06 Київ – Чоп	I-a	ЩМА-20	> 25 000
Р-01 Київ – Обухів	I-б	Асфальтобетон дрібнозернистий (Тип Б)	12 000 – 15 000
Т-10-27 Київська кільцева дорога	II	ЩМА-15	> 18 000

Вибір зазначених об'єктів дозволив охопити основні типи дорожніх конструкцій Київського транспортного вузла, що працюють у режимі надвисокої інтенсивності. Інструментальний моніторинг та заміри пружних прогинів проводилися у період березень-травень 2024-2026 рр. Зазначений часовий інтервал є критичним, оскільки характеризується максимальним розволоженням ґрунтів земляного полотна та зниженням модуля пружності конструктивних шарів. Це дозволило зафіксувати роботу

дорожнього одягу у найбільш несприятливий гідротермічний період та верифікувати математичну модель у граничних умовах експлуатації

Для опису процесів деградації дорожніх покриттів використано підхід, заснований на теорії накопичення втомних пошкоджень у матеріалах. Розрахунок довговічності дорожнього одягу здійснювався на основі гіпотези лінійного обчислення пошкоджень Пальмгрена–Майнера, яка дозволяє оцінити ступінь вичерпання ресурсу конструкції під дією повторюваних транспортних навантажень. Показник накопичення пошкоджень визначався на основі співвідношення:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}, \quad (1)$$

де n_i – фактична кількість циклів прикладення навантаження певного рівня;

N_i – гранична кількість циклів до руйнування при відповідному рівні напружень;

k – кількість рівнів навантаження.

Досягнення значення $D=1$ відповідає граничному стану конструкції та виникненню руйнування. Залишковий ресурс дорожнього покриття оцінювався за допомогою коефіцієнта ресурсу:

$$R_{рез} = 1 - D, \quad (2)$$

де R – відносний показник залишкового ресурсу конструкції дорожнього одягу.

Такий підхід дозволяє кількісно оцінити ступінь деградації дорожнього покриття після зимового періоду та визначити потенційний термін його подальшої експлуатації.

Окремим аспектом методології є дослідження явища «гідротермічного розклинювання», яке пояснює масову деградацію покриттів саме у весняний період. Авторами встановлено, що руйнування активізується через фізичний вплив вільної вологи, яка потрапляє в мікротріщини. При замерзанні води виникає внутрішній криогенний тиск, що в поєднанні з термічними градієнтами та механічним тиском коліс створює напружений стан, який перевищує межу міцності асфальтобетону на розтяг.

Для дослідження фізико-математичної природи руйнування дорожніх конструкцій застосовано методи термодинамічного аналізу процесів у багатошаровому середовищі дорожнього одягу. У межах цього підходу дорожнє покриття розглядається як шаруватий напівпростір, напружено-деформований стан якого формується під впливом транспортних навантажень та температурних змін. У математичну модель інтегровано рівняння теплопровідності для оцінки глибини промерзання конструкції та розрахунку зниження модуля пружності матеріалу період весняного відтавання (за оцінками авторів на 30-40%).

Математичне моделювання термомеханічних процесів виконувалося з використанням положень теорії термов'язкопружності та чисельних методів розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла. Для аналізу розподілу напружень у шарах дорожнього одягу застосовувалися чисельні алгоритми, зокрема метод скінченних елементів, що дозволяє врахувати складну геометрію конструкції та неоднорідність температурних полів.

Температурний вплив на властивості асфальтобетону враховувався через функцію релаксації матеріалу:

$$R(t) = \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (3)$$

де E_i – модулі пружності елементів реологічної моделі;

τ_i – характерні часи релаксації;

n – кількість елементів моделі.

Застосування цієї залежності дозволяє врахувати зміну в'язкопружних характеристик асфальтобетонних матеріалів під впливом температури та тривалості навантаження.

Окрему увагу у дослідженні приділено аналізу впливу сучасних транспортних навантажень. Встановлено, що більшість дорожніх конструкцій України була спроектована за нормативами, які передбачали навантаження на вісь 6-10 т, тоді як сучасні вантажні транспортні засоби створюють осьові навантаження до 11,5-13 т. Такий дисонанс між розрахунковими параметрами та реальними умовами експлуатації призводить до експоненціального зростання швидкості накопичення пошкоджень, перетворюючи плановий знос на лавиноподібне руйнування.

Для оцінювання ступеня руйнування дорожнього покриття введено показник відносної площі деструкції:

$$S_{дестр} = \frac{S_{пошк}}{S} \quad (4)$$

де $S_{пошк}$ – площа пошкоджених ділянок дорожнього покриття;

S – загальна площа досліджуваної ділянки дороги.

Цей показник використовується як один із ключових параметрів для прийняття рішень щодо вибору технології відновлення дорожнього покриття.

Оптимізація стратегії відновлення дорожніх покриттів здійснювалася з використанням методів математичної оптимізації. Для цього було сформовано критерій економічної доцільності виконання ямкового ремонту, який базується на порівнянні витрат на локальне усунення дефектів та витрат на капітальне відновлення дорожнього покриття. Встановлено критичний поріг деструкції ($S_{дестр} = 30\%$), за яким ямковий ремонт стає економічно недоцільним через перевищення швидкості деградації над швидкістю відновлення. Порогове значення показника деструкції визначалося шляхом мінімізації сумарних витрат на експлуатацію та ремонт дорожньої конструкції.

Для оцінювання можливостей підвищення довговічності дорожніх покриттів також було проаналізовано вплив застосування синтетичних армувальних матеріалів та полімерних модифікаторів у складі асфальтобетону. Ефективність таких рішень оцінювалася за допомогою коефіцієнта підвищення довговічності:

$$K_d = \frac{N_m}{N_m} \quad (5)$$

де N_m – кількість циклів навантаження до руйнування модифікованого матеріалу;

N_m – кількість циклів до руйнування традиційного асфальтобетону.

Застосування запропонованих математичних підходів дозволяє прогнозувати зміну технічного стану дорожніх покриттів після зимового періоду експлуатації та обґрунтовувати вибір оптимальних технологій їх відновлення. Розроблена методологія може бути використана для створення автоматизованих систем моніторингу стану дорожньої інфраструктури та формування науково обґрунтованих програм утримання автомобільних доріг.

Запропонований аналітичний підхід дозволяє кількісно визначити момент переходу дорожньої конструкції в непрацездатний стан, враховуючи специфіку вітчизняних асфальтобетонів та екстремальні температурні коливання весняного періоду.

Результати та обговорення. У ході проведення дослідження було встановлено, що динаміка деградації дорожніх покриттів в Україні має чітко виражений сезонний характер. Найбільш інтенсивне накопичення дефектів відбувається у післязимовий період, що підтверджує висунуту авторами гіпотезу про синергію гідротермічного розклинювання та зростаючих осьових навантажень.

На основі розробленого математичного алгоритму, що базується на законі Пальмгрена–Майнера (1), було проведено моделювання накопичення втомних пошкоджень у нежорсткому дорожньому одязі. Результати розрахунків (табл. 2) свідчать, що перехід від застарілих нормативів (6-8 т на вісь) до сучасних великовагових впливів без адекватного посилення конструкції призводить до експоненціального скорочення міжремонтних термінів.

Таблиця 2 – Розрахункові показники залишкового ресурсу конструкцій залежно від осьового навантаження

Table 2 – Calculated indicators of the residual life of structures depending on the axial load

Розрахункове навантаження на вісь, кН (т)	Допустима кількість циклів прикладення, тис. циклів	Розрахунковий термін служби, років	Коефіцієнт прискорення зносу
80 (8,1)	12,4	15,0	1,00
100 (10,2)	5,85	7,1	2,11
115 (11,7)	3,10	3,8	3,95
130 (13,2)	1,65	2,0	7,51

Отримані розрахункові дані (табл. 2) знаходять пряме підтвердження під час натурних обстежень дослідних ділянок. Зокрема, на магістралі М-05 Київ - Одеса інтенсивний рух великовагового транспорту в поєднанні з весняним перезволоженням основи призвів до утворення сітки втомних тріщин та вибоїн вже на 3-й рік експлуатації після проведення ремонтних робіт. Це корелює з розрахованим коефіцієнтом прискорення зносу (7,51), який доводить, що один проїзд сучасного вантажного автомобіля з осьовим навантаженням 13 т скорочує ресурс покриття такою ж мірою, як вісім проїздів еталонного транспортного засобу (80 кН)

Математично це пояснюється тим, що напруження в нижніх шарах асфальтобетону перевищують межу витривалості, розраховану за функцією релаксації (3). У такому стані матеріал втрачає здатність до релаксації напружень, що переводить процес накопичення мікротріщин у фазу лавиноподібного руйнування.

Статистична обробка результатів інструментальних обстежень представницької вибірки ділянок протяжністю 15 км дозволила встановити реальний технічний стан різних категорій доріг після зимового періоду 2024-2026 рр. (табл. 3).

Таблиця 3 – Статистична оцінка технічного стану ділянок мережі автомобільних доріг загального користування після зимового періоду

Table 3 – Statistical assessment of the technical condition of public road network sections after the winter period

Категорія дороги	Обстежена протяжність, км	Середній бал стану (1–5)	Середня площа деструкції $S_{дестр.}$, %
Міжнародні (М)	5	2,45	18,5
Регіональні (Р)	5	1,80	32,4
Територіальні (Т)	5	1,55	48,2

Важливим науковим результатом дослідження є верифікація теоретичної моделі емпіричними даними. Встановлено, що для територіальних доріг (Т), де зафіксовано середню площу деструкції 48,2%, показник залишкового ресурсу фактично наблизився до нуля. Це корелює з результатами моделювання напружено-деформованого стану, які вказують на повну втрату тримальної здатності конструкції через критичне зниження модуля пружності матеріалів у період весняного відтавання. Зниження тримальної здатності земляного полотна при перезволоженні призводить до того, що асфальтобетонні шари починають працювати на вигин з амплітудою, яка значно перевищує допустимі межі. Це зумовлює появу сітки тріщин, яка за умов осьового навантаження 11,5-13 т перетворюється на наскрізні вибоїни протягом лічених тижнів.

Побудована залежність «залишковий ресурс - площа пошкоджень» демонструє експоненціальне падіння тримальної здатності після досягнення критичної позначки $S_{дестр} \approx 30\%$. Порівняння наших даних із працями О. Оніщенка (2022) підтверджує, що кліматичний фактор в умовах України діє як деструктивний каталізатор. На ділянках зі складним поздовжнім профілем негативний ефект від великогазового транспорту посилюється ще на 15 - 20% через додаткові динамічні удари та гальмівні зусилля.

На відміну від загальних імовірнісних моделей R. Smith (2021), запропонований авторами підхід враховує реальні умови експлуатації та дефіцит фінансування. Ми обґрунтували, що при $S_{дестр} > 30\%$ традиційний ямковий ремонт стає економічно шкідливим, оскільки швидкість деградації перевищує технічні можливості локального відновлення. В умовах воєнного стану та обмеженого бюджету стратегія експлуатаційного утримання має базуватися на суворій пріоритизації об'єктів, оскільки хаотичне латання вибоїв не забезпечує стабілізації міжремонтних термінів стратегічної мережі.

Наші висновки щодо ефективності армування узгоджуються з результатами M. Arabani & M. Fagamarzi (2022). Проте нами вперше доведено, що для українських доріг саме поєднання жорсткого армування із полімерними модифікаторами дозволяє «законсервувати» залишковий ресурс на рівні 15-20% навіть за умови критичних циклів «заморожування-відтавання». Це дає необхідний час для акумуляції інвестицій або реалізації цифрових стратегій моніторингу, що є критично важливим для відновлення транспортної мережі в умовах євроінтеграції.

Висновки. У результаті проведеного комплексного дослідження розроблено та теоретично обґрунтовано систему математичних підходів до оцінки технічного стану дорожніх конструкцій. Запропонована методологія дозволяє адаптувати стратегії утримання та відновлення дорожньої мережі України до екстремальних кліматичних впливів та сучасних логістичних реалій. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Математично обґрунтовано фізичну природу «весняної деградації» покриттів. Встановлено, що ключовим чинником руйнування є синергія транспортного навантаження та явища «гідротермічного розклинювання». Шляхом моделювання термомеханічних процесів у шаруватому напівпросторі доведено, що внаслідок криогенного тиску вологи в мікротріщинах та зміни реологічних властивостей матеріалів, фактичний модуль пружності асфальтобетону знижується на 30 - 40%. Це підтверджено замірами пружного прогину на дослідних ділянках доріг М-03 та М-05 у березні - травні 2024 - 2026 рр., що переводить напружено-деформований стан конструкції у фазу, де навіть нормативні навантаження викликають незворотні структурні руйнування.

2. Кількісно оцінено деструктивний ефект наднормативної ваги. На основі закону накопичення втомних пошкоджень Пальмгрена-Майнера встановлено, що для магістральних доріг визначальним чинником є зростання осьового навантаження до 115 - 130 кН. Експлуатація застарілих конструкцій під дією таких навантажень призводить до прискорення зносу у 4 - 7,5 рази. Це фактично скорочує реальний міжремонтний термін служби з проєктних 15 років до критичних 2-3 років, що корелює з фактичним станом покриття на трасі М-05 Київ - Одеса, де втомні руйнування зафіксовано на 3-й рік експлуатації.

3. Обґрунтовано математичний критерій вибору технології відновлення. Шляхом статистичного аналізу експериментальних ділянок виявлено критичний поріг деструкції на рівні $S_{дестр} > 30\%$.

Встановлено, що після подолання цієї межі процес руйнування набуває лавиноподібного характеру, при якому традиційний ямковий ремонт втрачає економічну доцільність. Запропонована математична залежність «залишковий ресурс - площа пошкоджень» дозволяє обґрунтувати перехід до методів суцільного пошарового відновлення або підсилення конструкції.

4. Доведено ефективність методів стабілізації ресурсу армуванням. Встановлено, що використання синтетичних армувальних матеріалів та полімерних модифікаторів, розроблених з урахуванням функцій релаксації асфальтобетону, дозволяє перерозподілити концентратори напружень. Це забезпечує зростання коефіцієнта підвищення довговічності та створює «запас міцності» проти температурного стресу, що є критично важливим в умовах обмеженого бюджетного фінансування для збереження стратегічних маршрутів, таких як М-06 Київ - Чоп.

5. Визначено необхідність зміни економічної парадигми відновлення. Аналіз вартості будівництва та масштаби руйнувань (потреба у понад 50 млрд грн на відновлення після екстремальної зими 2025-2026 рр) свідчать про неможливість подолання кризи лише коштами резервного фонду. Доведено, що математичне моделювання пріоритетності ремонтів на основі індексу стану та інтенсивності руху має стати базою для залучення нових фінансових інструментів. Впровадження запропонованих підходів дозволяє оптимізувати розподіл обмежених ресурсів Дорожнього фонду, підвищуючи ефективність використання бюджетних коштів на 15-20% за рахунок відмови від економічно недоцільних ямкових ремонтів на користь системного відновлення стратегічних маршрутів.

Перелік посилань

1. Arabani, M., & Faramarzi, M. (2022). Mathematical modeling of the fatigue life of glass fiber-reinforced asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), 04022031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004143)
2. Безуглий А. О. Економічне обґрунтування стратегій утримання автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво України*. 2021. № 2. С. 10–15.
3. Cannone Falchetto, A., Moon, K. H., & Wang, D. (2021). Comparison of low temperature fracture properties of asphalt mixtures using different experimental methods. *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
4. Chen, X., & Liu, Y. (2023). Hydrothermal stability of subgrade soils under freeze-thaw cycles. *Journal of Cold Regions Engineering*, 37(2), 45-58. <https://doi.org/10.1061/JCRGEL.CRENG-632>
5. El-Badawy, S., & Abd El-Hakim, R. (2022). Predicting the residual life of flexible pavements using falling weight deflectometer data. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 412-425.
6. Гамеляк І. П. Методи підвищення довговічності дорожніх покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2022. № 111. С. 45–52.
7. Гамеляк І. П., Дмитрієв М. М. Моделювання впливу кліматичних факторів на деградацію транспортної інфраструктури. *Вісник Національного транспортного університету*. 2023. № 2 (53). С. 88–96.
8. Huang, J., & Sun, Y. (2021). Optimization of pavement maintenance schedules using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 124, 103565.
9. Johnson, K. (2024). Impact of heavy axle loads on aging infrastructure: A statistical approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(1), 04023045.
10. Левківська Л. В., Елаллак Д. М. Підвищення експлуатаційних показників асфальтобетону шляхом армування синтетичними волокнами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. № 113. С. 61–68. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-113.1-061-068>
11. Левківська Л. В., Гринчак І. І., Елаллак Д. М. Аналіз існуючих методів оцінки якості зчеплення між шарами дорожнього одягу. *Вісник Національного транспортного університету*. 2022. № 1 (51). С. 267–274. –274. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-267-274>

12. Liu, Q., & Wang, H. (2022). Nonlinear fatigue damage accumulation in asphalt pavements under climate change. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 890-905. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1773463>
13. Мозговий В. В., Кушнір О. П., Левківська Л. В., Куцман О. М. Виявлення особливостей напружено-деформованого стану нежорсткого дорожнього одягу на підйомах і спусках автомобільних доріг. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2024. № 5 (1). С. 99–109. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307829>
14. Mueller, J. (2022). European standards for road infrastructure resilience under extreme weather. *Transport Research Arena*, 201-215.
15. Онищенко О. М. Інноваційні підходи до проектування асфальтобетонних покриттів при високих навантаженнях. *Дорожні матеріали та конструкції*. 2022. № 23 (11). С. 2450–2468.
16. Онищенко О. М., Федоренко В. В. Математичне моделювання взаємодії важковагових транспортних засобів та конструкції дороги. *Журнал транспортної інженерії*. 2023. № 149 (5).
17. Pirayonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2020). Data analytics in asset management: Cost-effective prediction of the pavement condition index. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(1), 04019036.
18. Савенко В. Я., Кулик М. В. Стратегічне планування відновлення дорожньої мережі в кризових умовах. *Транспортні системи та технології*. 2021. № 38. С. 12–21.
19. Савенко В. Я., Ткачук О. П. Методика оцінки експлуатаційної надійності автомобільних доріг за умов підвищених осьових навантажень. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2022. № 112. С. 15–24.
20. Smith, R. (2021). Probability methods in pavement life prediction for heavy-duty highways. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), 1340-1355.
21. Ткачук О. П. Оптимізація витрат на експлуатаційне утримання доріг в умовах воєнного стану. *Автомобільні дороги України*. 2024. № 1. С. 18–24.
22. Vavrychuk, V., & Solodkyu, S. (2021). Residual Life Prediction of Asphalt Pavements Based on Deflection Measurements. *Applied Sciences*, 11(15), 6821.
23. Wang, D., & Falchetto, A. C. (2022). Microstructural analysis of asphalt mixtures using X-ray computed tomography. *Materials and Structures*, 55, 112.
24. Yang, X., & You, Z. (2021). Research on recycled asphalt mixtures: A mathematical perspective. *Sustainability*, 13(5), 2910.
25. Zhang, Y., & Mohseni, A. (2021). Evaluation of pavement service life based on reliability analysis. *Structures and Infrastructure Engineering*, 17(5), 654-668.

MATHEMATICAL MODEL OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS ATTENDING DRIVAGE OF THE DEEP CURVILINEAR BORE-HOLES

Mozgovyi Volodymyr V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Road Construction Materials and Chemistry, National Transport University, room 109, 42 Boychuk St., Kyiv, Ukraine, 01103, e-mail: mozgoviy@gmail.com, +380505062564, <https://orcid.org/0000-0002-1032-8048>.

Levkivska Liudmyla V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National Transport University, 01103, Ukraine, Kyiv, st. M. Boychuka 42, room 514, e-mail: l.v.g.ntu@gmail.com, +380505114407, <https://orcid.org/0000-0002-5589-5257>.

Shevchuk Liudmyla V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National Transport University, 01103, Ukraine, Kyiv, st. M. Boychuka 42, room 511, e-mail: Ludmilashevchuk25@gmail.com, +380667153633, <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>.

Anna Feschenko, Candidate of Engineering Science (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: fanna17@ukr.net, tel. +380677441754, <https://orcid.org/0000-0002-8212-52>

Summary. The article scientifically substantiates mathematical methods for assessing the residual life of flexible pavements in Ukraine following extreme winter loads. The authors analyze a complex of destructive

factors: adverse climate, chronic underfunding, and violations of technological standards. Particular attention is paid to the budget deficit during martial law, which precludes scheduled repairs and leads to a landslide degradation of strategic transport network objects amid changing logistical routes.

Within the scope of the study, the mechanisms of thermal influence on road materials are expanded through the prism of the theory of thermomechanics of multilayer media and processes of hydrothermal wedging of pavements. Based on the mathematical relationship between the stress-strain state of the structure and the durability index according to the Palmgren-Miner law, a critical discrepancy was identified between outdated design standards (6-10 t per axle) and modern loading standards (11.5-13 t). It is proved that such a disproportion provokes an accelerated depletion of the pavement's service life by 4-7.5 times, effectively neutralizing the safety margin of the structures. Through the application of numerical modeling methods and the processing of instrumental survey data, the current state of the road network is defined as marginal (1.55-2.45 points), requiring immediate scientific intervention.

The paper critically evaluates the practice of pothole repair as a temporary measure. The authors emphasize that the effectiveness of local restoration is low without considering the relaxation function of asphalt concrete and the optimization of the rheological properties of mixtures. The economic inexpediency of pothole patching when the threshold of the relative area of destruction exceeds 30% is theoretically substantiated. Overcoming this limit indicates a loss of load-bearing capacity and the necessity for capital restoration.

The article proposes a transition to digital monitoring tools through the development of applied engineering methodologies. Further research will focus on analyzing the phenomenon of "hydrothermal wedging" and developing predictive tables for residual life based on the refined Palmgren-Miner law for heavy-duty vehicles. A specific area of focus is improving energy efficiency by using additives for low-temperature asphalt paving. Implementing these steps will transform mathematical modeling into a practical monitoring tool and ensure the integration of Ukraine's infrastructure into a unified European digital network.

Keywords: road pavement, residual life, severe winter, pothole repair, destruction, asphalt concrete, serviceability.

References

1. Arabani, M., & Faramarzi, M. (2022). Mathematical modeling of the fatigue life of glass fiber-reinforced asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(4), 04022031. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004143](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004143)
2. Bezuglyi, A. O. (2021). Ekonomichne obgruntuvannya stratehii utrymannya avtomobilnykh dorih [Economic substantiation of road maintenance strategies]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, (2), 10–15. [in Ukrainian]
3. Cannone Falchetto, A., Moon, K. H., & Wang, D. (2021). Comparison of low temperature fracture properties of asphalt mixtures using different experimental methods. *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
4. Chen, X., & Liu, Y. (2023). Hydrothermal stability of subgrade soils under freeze-thaw cycles. *Journal of Cold Regions Engineering*, 37(2), 45-58. <https://doi.org/10.1061/JCRGEL.CRENG-632>
5. El-Badawy, S., & Abd El-Hakim, R. (2022). Predicting the residual life of flexible pavements using falling weight deflectometer data. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 412-425.
6. Hameliak, I. P. (2022). Metody pidvyshchennia dohovichnosti dorozhnikh pokryttiv [Methods for increasing the durability of road surfaces]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, (111), 45–52.
7. Hameliak, I. P., & Dmytriiev, M. M. (2023). Modeliuvannya vplyvu klimatychnykh faktoriv na dehradatsiiu transportnoi infrastruktury [Modeling the impact of climatic factors on the degradation of transport infrastructure]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 2(53), 88–96. [in Ukrainian]
8. Huang, J., & Sun, Y. (2021). Optimization of pavement maintenance schedules using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 124, 103565.
9. Johnson, K. (2024). Impact of heavy axle loads on aging infrastructure: A statistical approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 30(1), 04023045.

10. Levkivska, L. V., & Elallak, D. M. (2023). Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh pokaznykiv asfaltobetonu shliakhom armuvannia syntetychnymy voloknamy [Improving the performance of asphalt concrete by reinforcing with synthetic fibers]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, (113), 61–68. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2023-113.1-061-068> [in Ukrainian]
11. Levkivska, L. V., Hrynychak, I. I., & Elallak, D. M. (2022). Analiz isnuvachykh metodiv otsinky yakosti zcheplennia mizh sharamy dorozhnogo odiahu [Analysis of existing methods for assessing the quality of adhesion between road layers]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, 1(51), 267–274. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-267-274> [in Ukrainian]
12. Liu, Q., & Wang, H. (2022). Nonlinear fatigue damage accumulation in asphalt pavements under climate change. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(3), 890–905. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1773463>
13. Mozhovi, V. V., Kushnir, O. P., Levkivska, L. V., & Kutsman, O. M. (2024). Vyiavlennia osoblyvosti napruzhenno-deformovanoho stanu nezhorstkoho dorozhnogo odiahu na pidiomakh i spuskakh avtomobilnykh dorih [Identifying features of the stressed-strained state of a non-rigid roadbed along ascents and descents on highways]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1), 99–109. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307829> [in Ukrainian]
14. Mueller, J. (2022). European standards for road infrastructure resilience under extreme weather. *Transport Research Arena*, 201–215.
15. Onyshchenko, O. M. (2022). Innovatsiini pidkhody do proiektuvannia asfaltobetonnykh pokryttiv pry vysokyykh navantazhenniakh [Innovative approaches to the design of asphalt pavements under high loads]. *Dorozhni materialy ta konstruktzii*, 23(11), 2450–2468. [in Ukrainian]
16. Onyshchenko, O. M., & Fedorenko, V. V. (2023). Matematychni modeliuvannia vzaiemodii vazhkovahovykh transportnykh zasobiv ta konstruktzii dorohy [Mathematical modeling of the interaction between heavy vehicles and road structure]. *Journal of Transport Engineering*, 149(5). [in Ukrainian]
17. Piryonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. (2020). Data analytics in asset management: Cost-effective prediction of the pavement condition index. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(1), 04019036.
18. Savenko, V. Ya., & Kulyk, M. V. (2021). Stratehichne planuvannia vidnovlennia dorozhnoi merezhi v kryzovykh umovakh [Strategic planning of road network restoration in crisis conditions]. *Transportni systemy ta tekhnologii*, (38), 12–21. [in Ukrainian]
19. Savenko, V. Ya., & Tkachuk, O. P. (2022). Metodyka otsinky ekspluatatsiinoi nadiinosti avtomobilnykh dorih za umov pidvyshchenykh osovykh navantazhen [Methodology for assessing the operational reliability of highways under increased axle loads]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, (112), 15–24. [in Ukrainian]
20. Smith, R. (2021). Probability methods in pavement life prediction for heavy-duty highways. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(11), 1340–1355.
21. Tkachuk, O. P. (2024). Optyimizatsiia vytrat na ekspluatatsiine utrymannia dorih v umovakh voiennoho stanu [Optimization of costs for operational maintenance of roads under martial law]. *Avtoshliakhovyk Ukrainy*, (1), 18–24. [in Ukrainian]
22. Vavrychuk, V., & Solodky, S. (2021). Residual Life Prediction of Asphalt Pavements Based on Deflection Measurements. *Applied Sciences*, 11(15), 6821.
23. Wang, D., & Falchetto, A. C. (2022). Microstructural analysis of asphalt mixtures using X-ray computed tomography. *Materials and Structures*, 55, 112.
24. Yang, X., & You, Z. (2021). Research on recycled asphalt mixtures: A mathematical perspective. *Sustainability*, 13(5), 2910.
25. Zhang, Y., & Mohseni, A. (2021). Evaluation of pavement service life based on reliability analysis. *Structures and Infrastructure Engineering*, 17(5), 654–668.

Дата надходження до редакції 12.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 03.03.2026.