



Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет
Служба відновлення та розвитку інфраструктури у
Харківській області
ДП «Національний інститут розвитку
інфраструктури»
Національний транспортний університет
ДП «Дороги Харківщини»
ТОВ «ГРУПА КОМПАНІЙ "АВТОСТРАДА»
Національний науковий центр «Інститут судових
експертиз ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса»

**Всеукраїнська науково-практична конференція
ВІДНОВЛЕННЯ І РОЗВИТОК
ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ
УКРАЇНИ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД**

Збірник наукових праць



Харків 2026

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Служба відновлення та розвитку інфраструктури у Харківській області
ДП «Національний інститут розвитку інфраструктури»
Національний транспортний університет
ДП «Дороги Харківщини»
ТОВ «ГРУПА КОМПАНІЙ "АВТОСТРАДА»
Національний науковий центр «Інститут судових експертиз
ім. Засл. проф. М.С. Бокаріуса»

Всеукраїнська науково-практична конференція
ВІДНОВЛЕННЯ І РОЗВИТОК
ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ
УКРАЇНИ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД

16-17 квітня 2026 року
Збірник наукових праць

Харків 2026

УДК 625.7/8

Всеукраїнська науково-практична конференція «Відновлення і розвиток дорожньої інфраструктури України у повоєнний період». Збірник наукових праць (16-17 квітня 2026 року)/ ХНАДУ. Харків, 2026. – 177 с.

Матеріали конференції присвячені питанням вирішення проблем відновлення та розвитку інфраструктури та дорожнього господарства у повоєнний період, застосування сучасних технологій, матеріалів та методів при проектуванні, будівництві та експлуатації автомобільних доріг, а також питанням екологічної безпеки дорожньої мережі України.

За зміст і достовірність опублікованих в збірнику статей відповідальність несуть автори представлених матеріалів.

УДК: 625.7/8
©Колектив авторів, 2026
©ХНАДУ, 2026

ЗМІСТ

Проектування, будівництво та експлуатація дорожньої інфраструктури

<i>Анахіна І., Смолянук Р.</i> Прогнозування стану доріг в умовах недофінансування робіт з експлуатації.....	8
<i>Аринушкіна Н., Костюк І.</i> Технологічні аспекти застосування спінених бітумів у дорожньому будівництві.....	17
<i>Аринушкіна О.</i> Дослідження впливу довжини поліпропіленових фіброволокон на властивості щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом.....	20
<i>Білик М.</i> Експериментальне дослідження деформативності відсіву з відходів руйнувань в умовах циклічного навантаження.....	23
<i>Воловик О.</i> Щодо питання перерозподілу транспортних потоків при обґрунтуванні заходів з відновлення та розвитку інфраструктури дорожнього господарства.....	25
<i>Догадайло О., Догадайло Я., Середа С.</i> Ефективне виконання функцій замовника під час зимового утримання доріг.....	31
<i>Dohadailo Yana, Dohadailo Olexandr, Oliinyk Daria.</i> Implementation of the integrated public-private partnership model as a key instrument for Ukraine's road infrastructure transformation: sustainable development perspective.....	35
<i>Дорожко Є., Саркісян Г., Захарова Е.</i> Інноваційні підходи до цифрового проектування лінійних об'єктів у torosad: функціонал, методи та практичне застосування.....	39
<i>Єфремов С.</i> Дослідження можливих напрямків вирішення проблеми дефіциту органічних в'язучих завдяки використанню ароматичних вуглеводнів.....	41
<i>Поліщук О., Зятюк Ю.</i> Підвищення довговічності фібробетонів для дорожніх покриттів та аеродромів.....	44
<i>Сєдов А.</i> Дослідження шлаків для будівництва укріплених конструкцій дорожнього одягу.....	47
<i>Сипченко В., Костін Д.</i> Порівняльний аналіз методу розрахунку нежорсткого дорожнього одягу за гбн в.2.3-37641918-559:2019 та в'язко-пружної 3d-моделі.....	50
<i>Смолянук Р., Мачула В.</i> Забезпечення нормативної рівності покриттів доріг під час виконання ремонтних робіт	52
<i>Смолянук Р., Онуфрієв В.</i> Концепція застосування сурогатного нейромережевого моделювання у розробці віртуальних лабораторій.....	56
<i>Тетера В., Жданюк В.</i> Порівняльні дослідження адгезійної ефективності енергоощадних добавок до бітуму.....	59
<i>Фоменко О.</i> Розробка ґрунтів при від'ємних температурах повітря	62
<i>Цибульський В.</i> Роль сучасного лабораторного обладнання при підготовці фахівців технічних спеціальностей в закладах вищої освіти.....	64

<i>Ярещенко Н.</i> Дослідження заходів по забезпеченню пасивної безпеки автомобільної дороги.....	67
<i>Відновлення і розвиток мостів та транспортних тунелів</i>	
<i>Бариш О.</i> Капітальний ремонт мосту через річку Балаклійка на автомобільній дорозі О-210103 Балаклія – Яковенкове км 3+155.....	71
<i>Безбабічева О.</i> Системні проблеми забезпечення надійності гідроізоляції мостів: інженерні та нормативні аспекти	73
<i>Бугаєвський С., Алексєєв А.</i> Тимчасові мости компанії Janson Bridging (США).....	75
<i>Бугаєвський С., Гапонова-Коняєва О.</i> Дослідження конструктивно-анізотропних конструкцій.....	78
<i>Вербицький К.</i> Інтеграція Вім-підходів до проектування мостових споруд в контексті Вім-менеджменту та національної стандартизації.....	81
<i>Динник О.</i> Аналіз технічного стану та обґрунтування капітального ремонту залізобетонного мосту через р. В. Бурлук	84
<i>Забіяка О.</i> Стан мосту через р. Балаклійка на автомобільній дорозі Балаклія-Яковенкове після руйнування та його відновлення на старій осі.....	86
<i>Задорожний Д. А., Овчаренко О. А.</i> Використання інтелектуальних систем в життєвому циклі мостових споруд.....	88
<i>Краснов С.</i> Використання дерев'яних елементів при будівництві пішохідних мостів...	91
<i>Лукін Д.</i> Теоретичне моделювання температурних перепадів у перерізі прогонових будов мостів під дією кліматичних факторів.....	93
<i>Лукін О., Біндюг С., Голеско О.</i> Експлуатаційне утримання мостів і подовження їх ресурсу.....	97
<i>Махонько Д.С.</i> Застосування надлегких матеріалів для улаштування насипу підходів до мостів.....	101
<i>Ненастіна Т., Бережна Б.</i> Захист сталевих конструкцій мостів: сучасні технологічні підходи та експериментальне обґрунтування.....	104
<i>Синьковська О.</i> Захист металевих елементів мостів від корозії.....	107
<i>Смагло Я.</i> Порівняльний аналіз вимог та рекомендацій нормативних документів України, що висуваються до постійних та тимчасових мостів.....	110
<i>Смолянук Н.</i> Врахування ризиків під час будівництва підземних споруд: світовий досвід та реалії України.....	113
<i>Тарасенко Т.</i> Технологія відновлення експлуатаційної придатності мосту через р. В. Бурлук із застосуванням температурно-нерозрізної схеми.....	116
<i>Фітаров В.</i> Критерії вибору та оцінка ефективності сучасного програмного забезпечення для моделювання роботи фундаментів мостів.....	118
<i>Юдін В.</i> Особливості роботи армованих насипів при реконструкції штучних споруд із металевих гофрованих конструкцій.....	121

Комп'ютерне моделювання будівельних споруд та промислового дизайну

- Архіпов О., Поторянський В.* Засоби параметризації програми Autodesk Inventor та їх застосування в промисловому дизайні..... **124**
- Гапонова Л., Назаренко М.* Термомодернізація будівельної інфраструктури у повосенний період..... **128**
- Іванов Є.* Підвищення ефективності дистанційного навчання в професійній підготовці фахівців будівельної галузі..... **132**

Зелена відбудова дорожньої мережі України

- Анісімова С.* Основні фактори забруднення придорожніх екосистем..... **136**
- Брум Д., Калюжна Ю.* Щодо впливу мікроклімату мегаполісу на екологічний стан примагістральних територій..... **138**
- Вальтер Г.* Щодо ролі зелених насаджень великих міст в підтримці здоров'я мешканців..... **140**
- Внукова Н. Ричак Н.* Еколого-ландшафтний підхід до відновлення дорожньої інфраструктури в басейнових геосистемах..... **142**
- Душкін С.* Впровадження проникних дорожніх покриттів для управління дощовими стоками..... **144**
- Душкін С. Кудлач А.,* Використання баромембранних технологій для очищення стічних вод на об'єктах автотранспортної галузі..... **147**
- Журавський В.* Біоінженерні споруди в системі покращення екологічного стану поверхневих вод..... **150**
- Журавський В., Прокопенко Н.* Вдосконалення системи оцінки екологічного стану водних екосистем..... **153**
- Маслов І., Внукова Н.* Особливості модернізації системи екологічної безпеки..... **156**
- Перепелиця М., Прокопенко Н.* Підвищення екологічної безпеки міських пасажирських перевезень..... **159**
- Приходько К.* Основні моделі розсіювання забруднюючих речовин в умовах вулично-дорожньої мережі міста..... **162**
- Прокопенко Н.* Удосконалення технологій переробки відходів для відновлювальної енергії..... **165**
- Свашенко А.* Особливості асортименту та структури зелених насаджень придорожньої території..... **167**
- Слобожанюк В., Внукова Н.* Особливості структури системи екологобезпечного сталого розвитку..... **170**
- Хижняков О., Барун М.* Індикативні оцінка техногенного навантаження від місць захоронення твердих побутових відходів..... **173**

*Проектування, будівництво та експлуатація
дорожньої інфраструктури*

ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ДОРІГ В УМОВАХ НЕДОФІНАНСУВАННЯ РОБІТ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

На сьогодні дорожня інфраструктура України перебуває у стані «критичного зносу». Згідно з аналітичним звітом Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України, станом на початок 2026 року понад 85% мережі автомобільних доріг загального користування потребують невідкладного капітального або поточного ремонту [1]. Ця проблема давно вийшла за межі суто економічної площини: хронічне недофінансування галузі трансформувалося у реальну загрозу національній безпеці, що підриває логістичну стійкість держави в умовах воєнного стану та блокує ефективне функціонування стратегічних транспортних коридорів. Подальше зволікання з проведенням регламентних робіт створює ефект «інфраструктурної лавини», коли поодинокі дефекти за один сезон перетворюються на суцільне руйнування дорожнього одягу, роблячи логістику непередбачуваною та дорогою.

За оцінками експертів Світового банку та профільних науково-дослідних інститутів (зокрема ДП «НІРІ»), систематичне недотримання міжремонтних термінів призвело до критичної втрати несучої здатності основи на ключових ділянках опорної мережі [2]. Науково доведено, що вартість відновлення дороги, яка перейшла точку критичного зносу, зростає у 10–15 разів порівняно з витратами на вчасне превентивне утримання. В умовах дефіциту дорожнього фонду це призводить до вимивання обігових коштів держави, які могли б бути спрямовані на розвиток нових сполучень чи модернізацію мостових переходів.

В умовах, коли обсяги фінансування покривають лише 10–12% від нормативної потреби, традиційні стратегії експлуатації стають неефективними. Це зумовлює гостру необхідність розробки нових підходів до прогнозування стану доріг, які дозволять мінімізувати темпи деградації мережі навіть за екстремального дефіциту ресурсів.

Варто наголосити на критичному ризику втрати державного капіталу, інвестованого в інфраструктуру протягом попередніх років, оскільки масштабні проекти з капітального ремонту та реконструкції, реалізовані у 2020–2021 роках, наразі опинилися під загрозою через недотримання регламентних термінів експлуатаційного догляду. Відсутність належного нагляду та ігнорування превентивних заходів із гідроізоляції верхнього шару покриття призводить до того, що дороговартісні конструктивні елементи дорожнього одягу, розраховані на тривалий термін експлуатації, втрачають свою функціональність втричі швидше за розрахункові показники [3]. Такий стан справ можна визначити як регресивну капіталомісткість: коли внаслідок економії на малобюджетному захисті відбувається незворотна деструкція конструктивних шарів та втрата несучої здатності дорожнього полотна, що фактично нівелює ефект від масштабних інвестицій минулого. Це формує парадоксальну модель функціонування, за якої державні кошти фактично "прогорають", оскільки бюджет змушений повторно фінансувати відновлення вже створеної вартості активів замість розширення та модернізації всієї мережі. Саме ці теоретичні висновки щодо критичних темпів втрати інвестиційного капіталу знаходять своє практичне підтвердження при аналізі реального стану дорожньої мережі у весняний період 2026 року.

Практичне підтвердження цих теоретичних висновків ми спостерігаємо на прикладі дорожньої мережі Харківської області у березневий період 2026 року. Зокрема, критична ситуація склалася на автошляху Р-51 у напрямку Харків — Лозова — Павлоград. За даними Служби відновлення та розвитку інфраструктури у Харківській області, понад 70% доріг регіону вже давно вичерпали свої міжремонтні терміни, а деякі ділянки не бачили капітального оновлення ще з 80-х років минулого століття [4]. Через поєднання аномальних температурних коливань поточної зими та інтенсивного руху великовагового транспорту, час

подолання ділянки на Лозову збільшився утричі: з нормативних 20 хвилин до понад однієї години. Таке стрімке падіння середньої швидкості потоку свідчить про повну вичерпаність несучої здатності покриття, де ямковий ремонт уже не здатний забезпечити безпеку руху.

Наведені нижче авторські фотоматеріали (Рис. 1) наочно демонструють стадію «глибокої деградації», де глибина окремих вибоїн сягає 15–20 см. Це візуалізує модель «експоненціального зносу»: коли при досягненні певного порогу руйнувань темпи подальшого розпаду прискорюються у декілька разів щомісяця. В умовах, коли поточне фінансування утримання доріг області покриває лише 15% від потреби [5], виникає ситуація «логістичного колапсу». Експлуатаційні витрати власників автотранспорту зростають через знос ходової частини та збільшення витрат пального, що фактично формує прихований економічний борг перед інфраструктурою. Прогнозування стану доріг має базуватися на визначенні «точки невороття» — граничного стану покриття, за якого подальше утримання стає економічно недоцільним, а єдиним виправданим рішенням є повна реконструкція.

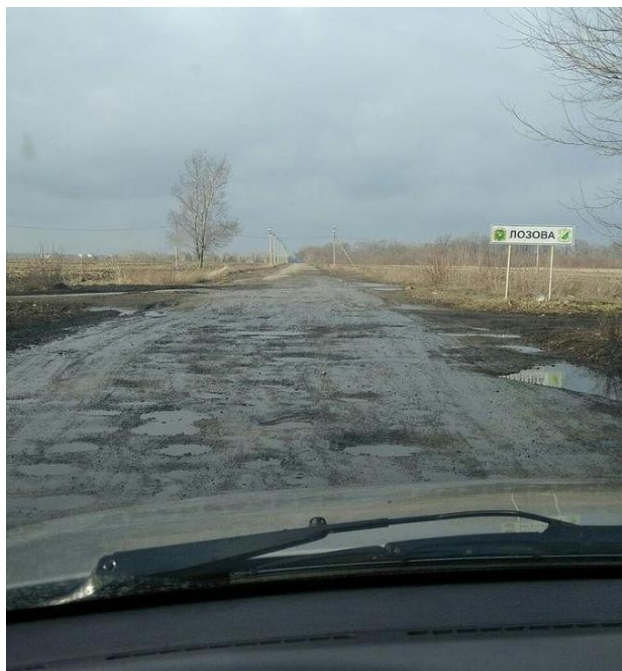


Рис. 1. Стан дороги при в'їзді до міста Лозова станом на 2026 рік

Причини такої деградації мають комплексний характер: фахівці зазначають, що критичний стан полотна зумовлений поєднанням аномальних циклів заморожування та відсутністю своєчасних герметизуючих робіт у попередні сезони. Волога, що потрапляє у неліквідовані через дефіцит коштів мікротріщини, під час морозів руйнує асфальтобетон зсередини, а ситуацію посилюють наднормативні навантаження на вісь через зміну логістичних маршрутів [6]. Це формує «замкнене коло», де поганий стан доріг гальмує економіку та зменшує надходження до дорожнього фонду, перетворюючи кожен зекономлений сьогодні мільйон на експлуатації у майбутні збитки в розмірі 7–12 мільйонів гривень на повну реконструкцію.

Варто розуміти, що проблема недофінансування дорожньої мережі на утримання після зимового періоду не є унікальною для України; сьогодні це стратегічний виклик навіть для найбільш розвинених економічних країн світу. Зокрема, у Німеччині спостерігається стрімка деградація автошляхів: згідно з аналітичними звітами, понад 30% федеральних доріг перебувають у критичному або незадовільному стані, що змушує уряд країни переглядати пріоритети бюджету на користь термінової технологічної стабілізації мережі [7]. Така тенденція чітко підтверджує, що сучасні кліматичні зміни в поєднанні з невпинним

зростанням інтенсивності важковагового руху вимагають переходу до нових, технологічно гнучких підходів до утримання навіть у країнах з високими стандартами будівництва.



Рис. 2. Стан доріг у Німеччині станом на 2026 рік

Аналогічна ситуація у 2026 році зафіксована і в Польщі, де через аномально високу кількість циклів заморожування та відтавання дорожня інфраструктура зазнала збитків на суму понад 2 млрд злотих, що становить близько 500 млн доларів США. Як зазначають експерти польської Генеральної дирекції національних доріг та автомагістралей (GDDKiA), головною причиною такого масштабу руйнувань є недофінансування превентивних заходів у попередні періоди [8]. Навіть високі європейські стандарти будівництва не здатні протистояти проникненню вологи в тріщини, якщо через брак коштів не було проведено своєчасну герметизацію швів та влаштування захисних шарів зносу. Досвід країн ЄС демонструє, що ігнорування стадії інтенсивного дефектоутворення призводить до неконтрольованої деструкції полотна, яка за своїми масштабами та швидкістю ідентична процесам, що ми спостерігаємо на Українських автошляхах. Саме критичний дефіцит фінансування стає каталізатором незворотних змін у структурі дорожнього одягу, що має прямий негативний вплив на стабільність логістичних ланцюгів не лише на національному, а й на міжнародному рівні.

Регрес експлуатаційних показників дорожніх об'єктів має прямий негативний вплив на суміжні галузі економіки, насамперед на сектор вантажних та пасажирських перевезень. Зростання міжнародного індексу рівності покриття (IRI) безпосередньо корелює з різким збільшенням витрат перевізників: через незадовільний стан полотна прискорюється технічне зношення ходової частини транспортних засобів, скорочується міжремонтний інтервал обслуговування та суттєво зростає питома витрата палива [9]. Окрім прямих збитків, критичне зниження середньої швидкості транспортного потоку призводить до порушення термінів постачання, що в умовах сучасних логістичних систем «just-in-time» провокує додаткові втрати для промислового та аграрного секторів. Таким чином, кожен відсоток, що становить систематичний дефіцит бюджетних асигнувань дорожньої галузі, трансформується у прихований економічний податок на мобільність, який змушує бізнес витратити інвестиційний ресурс на ремонт автопарку замість розширення виробництва.

У кінцевому результаті така динаміка призводить до вимушеного здорожчання логістичної складової, яка безальтернативно закладається у кінцеву собівартість товарів першої необхідності та стратегічної експортної продукції. За експертними оцінками, в умовах критичного стану шляхів частка транспортних витрат у ціні продукту може зростати на 15–25%, що формує надмірний інфляційний тиск на економіку країни в кризовий період. Це створює додаткове фінансове навантаження на державний бюджет, оскільки зростання цін на

логістику автоматично збільшує видатки на державні закупівлі, соціальні програми та підтримку життєдіяльності територій. Отже, обмеженість інвестицій у дорожню інфраструктуру перестане бути вузькогалузевою проблемою і перетвориться на вагомий дестабілізуючий фактор для загальнодержавного фінансового планування, погіршуючи конкурентоспроможність експорту та знижуючи купівельну спроможність населення.

Особливого значення проблема систематичного недофінансування дорожньої галузі набуває в контексті забезпечення національної безпеки та стратегічної військової логістики. В умовах 2026 року опорна мережа автомобільних доріг, особливо в прифронтових регіонах, таких як Харківська область, зазнає безпрецедентних навантажень, які значно перевищують розрахункові норми мирного часу. Інтенсивний рух важкої гусеничної та колісної техніки, тралів із великогабаритними вантажами та постійне курсування гуманітарних конвоїв призводять до прискореного руйнування дорожнього одягу. Деградація покриття на логістичних маршрутах безпосередньо впливає на оперативну мобільність: зниження середньої швидкості переміщення резервів та затримки в евакуаційних процесах можуть мати критичні наслідки для обороноздатності держави [10].

З інженерної точки зору, пошкоджена інфраструктура збільшує час логістичного циклу та підвищує ризик виходу з ладу дороговартісної військової техніки через динамічні удари на нерівностях. Вчасна технологічна стабілізація та превентивне утримання стратегічних напрямків є пріоритетним завданням, оскільки капітальний ремонт зруйнованих ділянок в умовах активних бойових дій або безпосередньої близькості до зони конфлікту є практично неможливим та економічно ризикованим. Таким чином, використання аналітичних систем СУСП та НДМ-4, про які буде розглянуто детальніше нижче, має бути в першу чергу спрямоване на ідентифікацію та підтримку життєздатності саме тих ділянок, що складають "каркас" військової логістики.

Крім того, надійність дорожньої мережі є фундаментом для функціонування "шляхів солідарності" (Solidarity Lanes), які забезпечують зв'язок України з європейськими партнерами. Недофінансування експлуатації доріг, що ведуть до стратегічних логістичних хабів та пунктів пропуску, створює додатковий тиск на оборонний бюджет, оскільки держава змушена витратити ресурси на екстрене відновлення проїзності замість планової модернізації.

Слід зауважити, що критичний стан стратегічних логістичних маршрутів створює загрозу не лише для обороноздатності, а й для загальної безпеки дорожнього руху. Поєднання інтенсивного руху важкої військової техніки із деградацією полотна формує нові ризики: за січень-лютий 2026 року в Україні вже зафіксовано 2652 ДТП із потерпілими, у яких загинула 331 особа, а 3432 особи отримали травми. Таким чином, недофінансування трансформується у гостру соціальну проблему, де ціною «економії» на експлуатації стає людське життя [11].

Крім суто економічних збитків, дефіцит асигнувань безпосередньо корелює з аварійністю. У 2026 році найбільш вагомим інженерним фактором ризику є втрата зчпних якостей та поява глибоких вибоїн. За даними моніторингу, значна частина ДТП пов'язана саме з наїздами на перешкоди, що посилюється обмеженою видимістю та складними погодними умовами [12].

Для наочного аналізу ситуації автором було розроблено порівняльну статистику аварійності (табл. 1). Аналіз даних за зимовий період (січень-лютий) 2024–2026 рр. демонструє тривожну тенденцію: попри певне зниження загальної кількості ДТП у 2026 році, питома вага пригод, спричинених саме незадовільним станом дорожнього покриття, демонструє стрімке зростання — з 12% до 24%. Це підтверджує гіпотезу про те, що дорожній одяг в умовах недофінансування стає головним каталізатором аварійності, навіть за умов адаптації водіїв до складних умов.

Показник смертності на рівні 12–13 осіб на 100 пригод свідчить про високу тяжкість наслідків ДТП, де непрямі втрати бюджету (соціальні виплати, втрата працездатності) значно перевищують вартість превентивних робіт, таких як герметизація тріщин чи технологія Slurry Seal.

Таблиця 1. Порівняльна статистика аварійності в Україні за січень-лютий

Рік	Загальна кількість ДТП	Частка ДТП через "незадовільні дорожні умови"	Смертність на 100 пригод
2024	2829	12%	13,2
2025	3092	18%	13,1
2026	2652	24%	15,5

У цьому контексті ідентифікація ділянок із високим ризиком за допомогою систем СУСП та НДМ-4 стає життєво необхідною. Пріоритезація витрат на основі аналізу ризиків дозволяє спрямувати обмежений ресурс на ті заходи, які дадуть максимальний ефект для збереження життя громадян [13].

Зібравши та систематизувавши актуальні дані щодо фактичного стану мережі, автором було побудовано серію прогностичних графічних моделей (Рис. 1–3). Даний комплексний прогноз базується на аналізі інтенсивності руху та темпів деградації типових конструкцій дорожнього одягу в умовах гострого дефіциту ресурсів на різних часових горизонтах: від поточного сезону до стратегічної перспективи у 15 років.

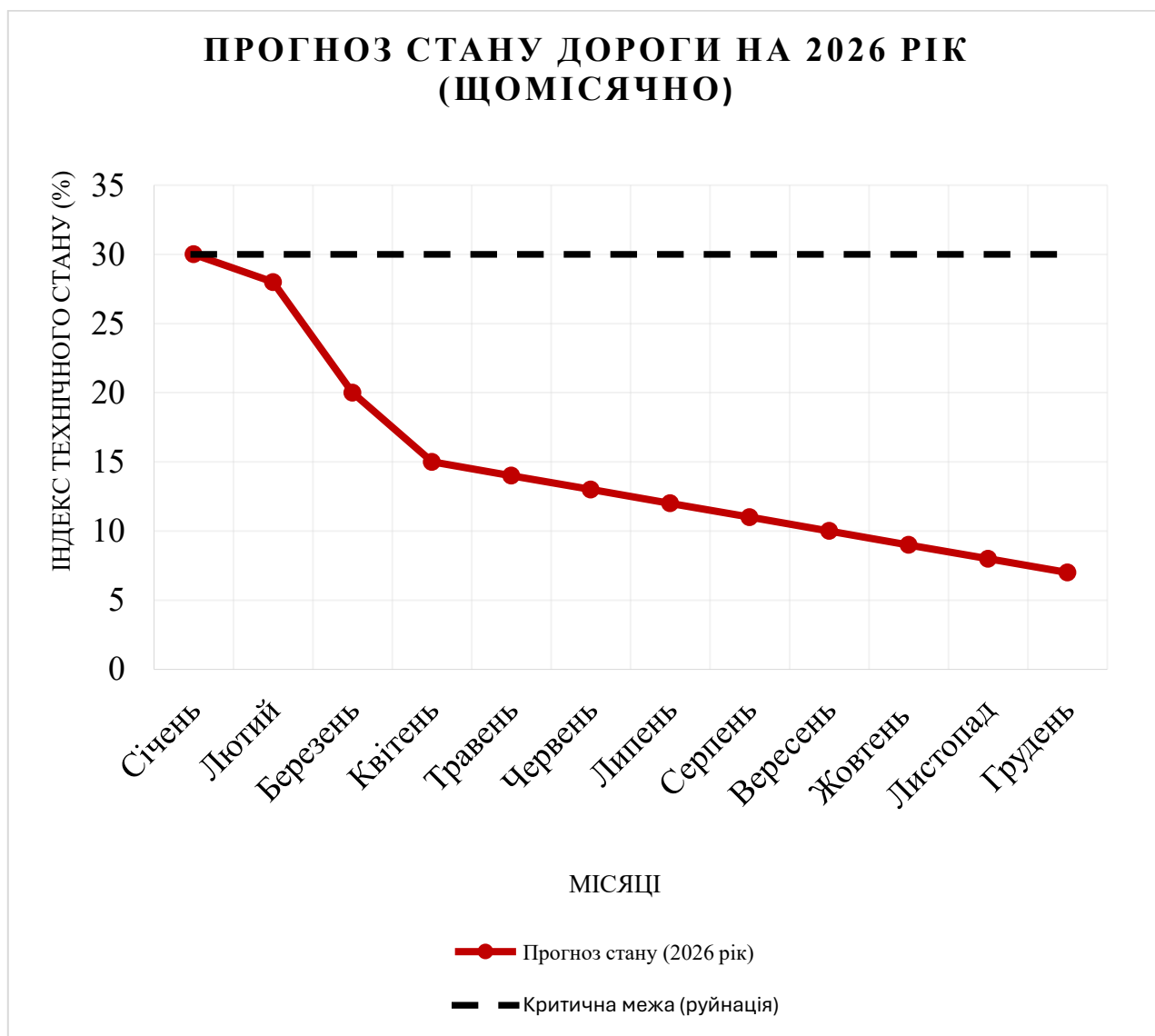


Рис. 3. Короткостроковий прогноз на 2026 рік: динаміка «весняного піку» руйнувань

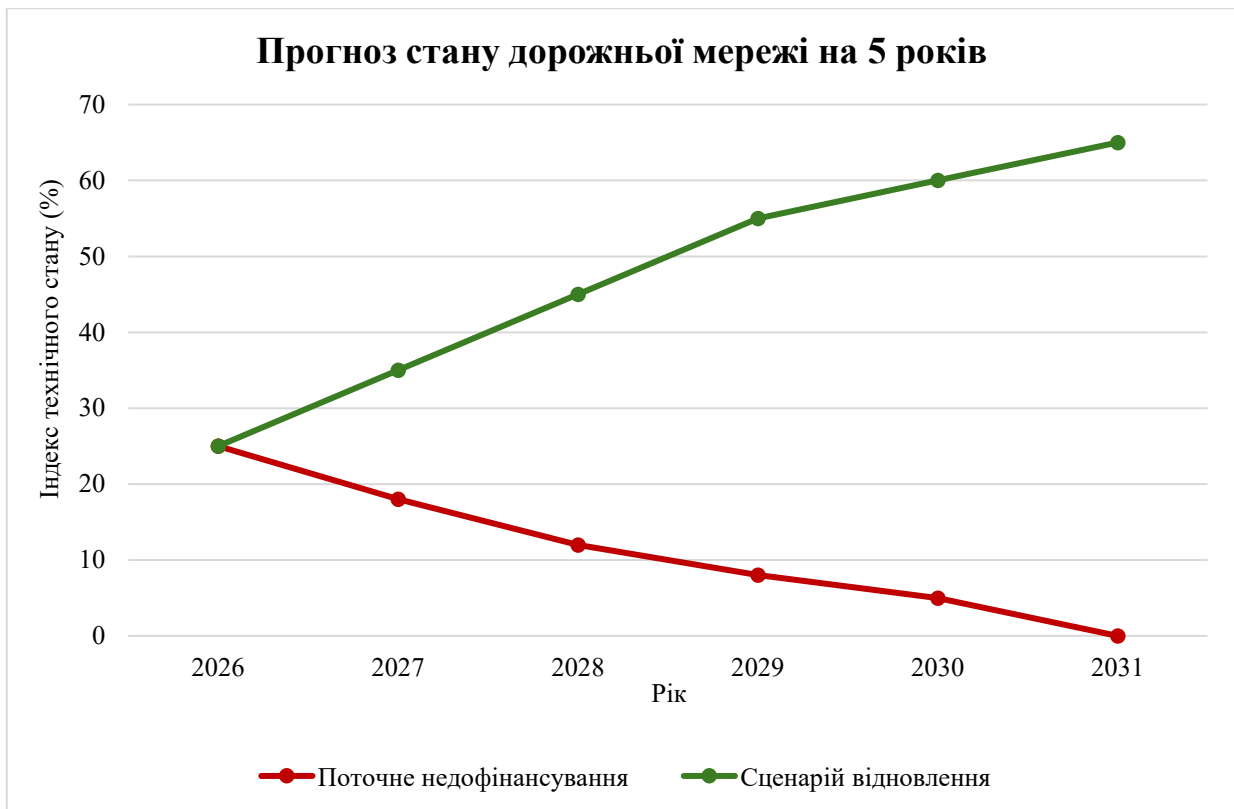


Рис. 4. Середньостроковий прогноз на 5 років: порівняння сценаріїв фінансування та точка критичного зносу



Рис. 5. Стратегічний прогноз на 15 років: циклічність витрат та обґрунтування превентивного утримання

Аналіз представлених моделей підтверджує, що при рівні фінансування менше 30% швидкість розпаду покриття зростає експоненціально вже у січні-лютому поточного року (Рис. 3). Варто зазначити, що у межах даного дослідження за нашими припущеннями було

обрано критичну точку стану на рівні 30%, яка є індикатором переходу дороги у фазу незворотної руйнації. Математичне моделювання на 5 років (Рис. 4) чітко вказує на «точку невороття», після якої відновлення експлуатаційних показників потребує капітальних інвестицій, що неспівмірні з вартістю поточного догляду. Нарешті, стратегічний прогноз (Рис. 5) графічно доводить, що відсутність щорічної герметизації тріщин та влаштування захисних шарів змушує бюджет кожні 7–8 років нести збитки, які у 10 разів перевищують витрати на превентивні заходи.

Таким чином, результати моделювання свідчать: економія на експлуатації сьогодні є найбільш марнотратним шляхом розвитку дорожньої галузі. Слід зазначити, що результати моделювання базуються на узагальнених припущеннях щодо інтенсивності руху та кліматичних умов, що може впливати на точність прогнозів для окремих ділянок.

Для того щоб змінити песимістичний сценарій деградації та спрямувати прогнозні криві у позитивний бік, необхідно докорінно переглянути стратегію управління дорожнім господарством. Першочерговим кроком має стати впровадження жорсткої пріоритезації за критерієм «життєвої важливості» маршрутів. В умовах дефіциту ресурсів фінансування повинно спрямовуватися не на ті ділянки, що знаходяться у найгіршому стані, а на стратегічно важливі логістичні коридори, які забезпечують експорт, гуманітарні перевезення та військову стійкість. Такий підхід дозволить зберегти опорну мережу від проходження «точки невороття» та забезпечить стабільне функціонування економіки навіть за обмежених інвестицій.

Паралельно з управлінськими змінами, технологічний акцент має зміститися у бік «швидкої консервації» дорожнього полотна. Замість капітальних ремонтів, на які наразі бракує коштів, необхідно масово впроваджувати превентивні методи, такі як герметизація тріщин та влаштування тонкошарових захисних покриттів типу Slurry Seal. Це у 5-7 разів дешевше за традиційне відновлення і дозволяє ефективно зупинити потрапляння вологи в основу дороги, що є головною причиною руйнувань навесні. Крім того, критично важливим є розширення мережі систем автоматичного зважування в русі (WIM), оскільки без жорсткого контролю за наднормативними навантаженнями фур будь-які ремонтні зусилля будуть нівельовані протягом одного сезону.

В Україні ключовим інструментом для прийняття рішень на державному рівні є СУСП (Система управління станом покриттів), яка функціонує як галузева геоінформаційна база даних. Вона базується на інтегрованих масивах інформації, куди щорічно вносяться результати інструментального обстеження доріг, що включають показники рівності (за шкалою IRI), наявність дефектів, стан колійності та зчипні якості покриття. Головне завдання СУСП полягає у формуванні науково обґрунтованої пріоритетності ремонтних робіт на основі фактичного технічного стану конкретних ділянок [14]. Як зазначають фахівці ДП «НІРІ», автоматизація цього процесу дозволяє нівелювати суб'єктивний фактор при розподілі бюджетних коштів, спрямовуючи їх на об'єкти з найвищим показником соціально-економічної значущості. Однак ефективність експлуатації даної системи напряму залежить від оперативності оновлення даних та глибини прогнозного моделювання, що робить її інтеграцію з сучасними WIM-технологіями стратегічно важливою умовою для переходу до предиктивного утримання мережі.

У професійному середовищі СУСП розглядається не просто як архів даних, а як динамічний інструмент управління життєвим циклом інфраструктури. За словами провідних інженерів Служби відновлення, впровадження автоматизованих систем моніторингу дозволяє зменшити час на обробку діагностичної інформації та підвищити точність планування на 25–30% [15]. Важливим аспектом розвитку системи є перехід до використання хмарних технологій та засобів дистанційного зондування, що дозволяє отримувати актуальну картину руйнувань безпосередньо після зимового періоду. Таким чином, СУСП формує фундамент для створення "цифрового паспорта" кожної дороги, де історія ремонтів поєднується з прогнозом подальшої деградації. Це створює передумови для реалізації стратегії "найкращого витрачання коштів", де кожен інвестований мільйон гривень забезпечує максимальне

подовження терміну служби покриття, мінімізуючи сумарні витрати держави на довгостроковому горизонті планування.

Логічним продовженням та поглибленням вітчизняних методик моніторингу є застосування міжнародних стандартів стратегічного планування, зокрема програмного комплексу HDM-4 (Highway Development and Management), розробленого за ініціативи Світового банку [16]. Наразі Служба відновлення України активно впроваджує цей інструмент для наукового обґрунтування інвестиційних програм, що є обов'язковою умовою для залучення зовнішнього фінансування та грантової допомоги. Система базується на комплексному аналізі трьох фундаментальних блоків: характеристик дорожньої конструкції, параметрів транспортного потоку та специфіки кліматичних умов. Завдяки використанню алгоритмів HDM-4, стає можливим моделювання сценаріїв експлуатації на період до 20 років, що дозволяє порівняти ефективність стратегії «нульового втручання» з активним впровадженням превентивних методів, таких як технологія **Slurry Seal**.

Особлива цінність інтеграції СУСП та HDM-4 полягає у здатності генерувати точні розрахунки економічної ефективності, зокрема показників чистої приведеної вартості (NPV) та внутрішньої норми рентабельності (IRR) [17]. Це створює надійну доказову базу для міжнародних донорів, демонструючи, що превентивне утримання є значно вигіднішим за капітальне відновлення на великих часових горизонтах. В умовах 2026 року, коли Україна залучає значні цільові гранти від Світового банку у розмірі понад 200 млн доларів, застосування такої аналітичної зв'язки стає критичним фактором прозорості та ефективності відбудови логістичної мережі. Таким чином, поєднання національних баз даних із міжнародним інструментарієм дозволяє трансформувати інженерні прогнози автора у чіткі економічні аргументи, необхідні для стабілізації галузі в умовах дефіциту ресурсів.

Незважаючи на складні виклики, станом на березень 2026 року в Україні вже реалізується низка заходів для стабілізації галузі. Згідно з постановою Уряду про розподіл коштів Державного дорожнього фонду, на поточний рік виділено близько 6,8 млрд грн на експлуатаційне утримання [18]. Хоча ці обсяги не покривають нормативну потребу, вони дозволяють підтримувати проїзд на критичних вузлах та мостових спорудах. Додатково залучаються грантові кошти від міжнародних фінансових інституцій, зокрема Світового банку, у розмірі понад 200 млн доларів, що цільово спрямовуються на відновлення зруйнованої логістики східних регіонів [19]. Це дає змогу Службам відновлення проводити не лише аварійний ремонт, а й працювати над захистом об'єктів інфраструктури від можливих пошкоджень.

Проведене дослідження підтверджує, що сучасний стан дорожньої інфраструктури України вимагає негайного перегляду стратегії управління галуззю в умовах критичного дефіциту ресурсів. На основі проведеного аналізу встановлено, що систематичне недофінансування експлуатаційного утримання призводить не лише до погіршення проїзності, а й до незворотної деструкції конструктивних шарів дорожнього одягу. Це створює пряму загрозу втрати масштабних державних інвестицій минулих років, оскільки об'єкти, відновлені у 2020–2021 роках, без належного превентивного догляду піддаються передчасному технічному зносу, що втричі скорочує їхній життєвий цикл.

Аналіз закордонного досвіду, зокрема Німеччини та Польщі, демонструє, що ігнорування стадії інтенсивного дефектоутворення є глобальним викликом, який призводить до колосальних економічних збитків (понад 500 млн доларів США лише в межах однієї зимової кампанії у сусідніх країнах). Для України цей негативний вплив посилюється логістичним тиском на державний бюджет: зростання вартості перевезень на 15–25% через незадовільний стан доріг стає прихованим "податком на мобільність", що провокує інфляцію та знижує конкурентоспроможність національної економіки.

Ключовим шляхом до стабілізації галузі є перехід від реактивного «ямкового» ремонту до стратегічного управління на основі цифровізації. Інтеграція національної системи СУСП із міжнародним програмним комплексом HDM-4 дозволяє трансформувати інженерні прогнози у чітке економічне обґрунтування для міжнародних донорів та Світового банку. Доведено, що

впровадження технологій превентивної консервації, зокрема Slurry Seal, на етапі появи перших тріщин є єдиним економічно виправданим сценарієм, що дозволяє зберегти до 30% бюджетних асигнувань та забезпечити стійкість транспортної мережі в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення.

Література

1. Звіт про стан дорожнього господарства та стратегічні напрями відновлення транспортних мереж у 2025–2026 рр. Агентство відновлення : веб-сайт. URL: <https://restoration.gov.ua/> (Дата звернення 10.03.2026).
2. Науково-технічний супровід та моніторинг стану об'єктів транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану: Аналітичний огляд інституту. Київ: НІПІ, 2025. 42 с.
3. Стратегічне планування інфраструктури. ОЕСР відновлення : веб-сайт. URL: <https://www.oecd.org/> (Дата звернення: 10.03.2026).
4. Оперативний звіт щодо стану дорожнього покриття та міжремонтних термінів на магістралях Р-51 та Т-2104. Служба відновлення та розвитку інфраструктури у Харківській області : веб-сайт. URL: <https://kh.restoration.gov.ua/> (Дата звернення 14.03.2026).
5. Критичний стан дорожньої мережі Сходу України: потреби фінансування експлуатаційного утримання на 2026 рік. Економічна правда : веб-сайт. URL: https://pravda.com.ua/publications/2026/02/15/road_crisis_kharkiv/ (Дата звернення 14.03.2026).
6. Не лише морози: експерт пояснив, чому насправді руйнуються українські дороги у 2026 році та як цьому запобігти. РБК-Україна : веб-сайт. URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/lishe-morози-ekspert-poyasniv-chomu-naspravdi-1772797961.html> (Дата звернення 15.03.2026).
7. Дороги Німеччини після зими: третина шляхів у критичному стані. НовиниLviv : веб-сайт. URL: <https://1.lviv.ua/dorogi-nimechchini-pislia-zimi-tretina-shlyahiv-y-kritichnomu-stani/> (Дата звернення 18.03.2026).
8. Стан дорожньої інфраструктури в країнах Центральної Європи: аналіз зимового періоду 2025–2026 рр. GDDKia : офіційний веб-сайт. URL: <https://www.gov.pl/web/gddkia/> (Дата звернення 18.03.2026).
9. Аналіз впливу якості дорожньої інфраструктури на логістичну ефективність. Звіти Світового банку : веб-сайт. URL: <https://ipi.worldbank.org/> (Дата звернення 21.03.2026).
10. Пріоритети відновлення інфраструктури та стратегічні маршрути 2026. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України : веб-сайт. URL: <https://restoration.gov.ua/> (дата звернення: 11.04.2026).
11. Аналіз аварійності на автомобільних дорогах України за 2025 рік. Патрульна поліція України : веб-сайт. URL: <https://patrol.police.gov.ua/> (Дата звернення 25.03.2026).
12. Глобальний звіт ВООЗ про стан безпеки дорожнього руху. World Health Organization : веб-сайт. URL: <https://www.who.int/> (Дата звернення 25.03.2026).
13. Найнебезпечніші траси України: на яких дорогах загинуло найбільше людей. Слово і діло : веб-сайт. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2026/02/03/infografika/suspilstvo/najnebezpechnishi-trasy-ukrayiny-vakyx-dorohax-zahynulo-najbilshe-lyudej> (Дата звернення 25.03.2026).
14. Порядок проведення моніторингу експлуатаційного стану автомобільних доріг загального користування : Наказ Міністерства інфраструктури України № 421 від 11.08.2021 р. : веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1073-21> (дата звернення: 01.04.2026).
15. Офіційний сайт ДП «НІПІ». ДП «НІПІ» : веб-сайт. URL: <https://www.dorndi.org.ua/> (дата звернення: 01.04.2026).
16. Highway Development and Management Series. HDMGlobal Knowledge Base : веб-сайт. URL: <https://www.hdmglobal.com/> (дата звернення: 03.04.2026).
17. Road Asset Management Manual. PIARC (World Road Association) : веб-сайт. URL: <https://road-asset-management.piarc.org/en> (дата звернення: 03.04.2026).
18. Постанова про розподіл коштів державного дорожнього фонду на 2026 рік. Кабінет Міністрів України : веб-сайт. URL: <https://www.kmu.gov.ua/> (Дата звернення 10.04.2026).
19. Пріоритети відновлення транспортної мережі в умовах обмеженого фінансування: звіт за I квартал 2026 року. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України : веб-сайт. URL: <https://mtu.gov.ua/> (Дата звернення 10.03.2026).

Наталія Арінушкіна

*к.т.н., доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: nataliaarinushkina@gmail.com, тел. +380664157257

Ілона Костюк

здобувачка вищої освіти, група Д-46-22

e-mail: kostukilona76@gmail.com, тел. +380966528265

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ СПІНЕНИХ БІТУМІВ У ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ

Анотація. У статті розглянуто питання приготування та застосування спінених бітумів у асфальтобетонних сумішах при виконанні будівельно-ремонтних робіт на асфальтобетонних покриттях, які мають ряд переваг в порівнянні з використанням у відповідних технологіях традиційних дорожніх бітумів. Зниження експлуатаційних та енергетичних витрат на приготування асфальтобетонних сумішей та зниження навантаження на екологію є одним із найважливіших завдань у дорожньому будівництві, що особливо актуально в теперішній час.

Ключові слова: спінений бітум, ремонтні роботи, приготування спіненого бітуму, асфальтобетонне покриття, асфальтобетонні суміші, холодний ресайклінг..

В сучасних умовах є актуальним застосування технологій приготування асфальтобетонних сумішей з використанням спінених бітумів при виконанні будівельно-ремонтних робіт для підвищення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг, економії матеріалів, зменшення вартості робіт з забезпеченням високої якості, особливо актуально при мінімальному фінансуванні дорожньої галузі у військовий період.

В умовах обмеженого фінансування стан асфальтобетонного покриття автомобільних доріг суттєво погіршується. Одним з методів підвищення показників якості та зниження витрат при виробництві асфальтобетонних сумішей є застосування спінених бітумів.

З початку 90-х років почали проводитися широкі експериментальні та теоретичні дослідження з використанням бітумів у спіненому стані. Це сприяло створенню нової технології приготування асфальтобетонних сумішей, що забезпечує збереження енергії, матеріалів та зменшення екологічного навантаження за рахунок зниження температури змішування компонентів і запобігання термічному старінню в'язучого.

Питаннями застосування сучасних технологій приготування асфальтобетонних сумішей з використанням спінених бітумів при виконанні будівельно-ремонтних робіт на автомобільних дорогах займалися вчені Савенко В. Я., Желтобрюх А. Д., Малій П. Р., Одегова Т. С., Тимошук О. Ю., Ілляш С. І., Мудриченко А. Я. та інші, які відображені в роботах [1, 2, 3].

Спінений бітум (бітумна піна) – це полідисперсна система, в якій дисперсною фазою є газ (повітря, пара), а дисперсійним середовищем – бітум. Вона характеризується малою в'язкістю, великою поверхневою енергією та високою активністю до взаємодії з поверхнею мінеральних матеріалів, завдяки чому суттєво полегшується процес перемішування суміші, відбувається більш рівномірний та повний розподіл в'язучого. В результаті перерозподілу групових сполук в об'ємі бітуму при його спінюванні стає можливим зниження витрати в'язучого, суттєве підвищення продуктивності змішувального обладнання та зниження температури нагрівання компонентів, що дає підставу розглядати цю технологію як енерго- і матеріалозберігаючу.

Застосування спінених бітумів є актуальним як при будівництві нових асфальтобетонних покриттів так і при виконанні ремонтних робіт методом холодного рециркулювання.

Ширшого розповсюдження набули два способи спінювання бітумів: спінювання та розпилення бітуму холодною водою або парою, яку одержують у парогенераторах або

централізовано по системі теплопостачання; спінювання та розпилення попередньо обводненого бітуму за рахунок збільшення тиску при його нагріванні до температури понад 100 °С у спеціальному герметичному підігрівачі перед подачею в змішувач [4].

Вибір технологічного процесу підготовки, подачі до змішувача і введення в нього бітуму в спіненому стані значною мірою залежить від способу спінювання.

Метою вдосконалення технології ремонту асфальтобетонних покриттів із застосуванням спіненних бітумів є поліпшення адгезійних властивостей, що забезпечують міцне та стійке зчеплення з поверхнею мінеральних матеріалів різної природи, а також міжшаровий зв'язок в умовах знижених температур. При цьому під адгезією розуміють зчеплення між поверхнями двох різних матеріалів, що контактують, – бітуму та мінерального матеріалу.

Утворенню тонких бітумних плівок на мінеральній поверхні передують її змочування бітумом, величина якого визначається природою мінерального матеріалу та силою поверхневого натягу бітуму.

Появі тонких плівок бітуму при традиційній технології приготування асфальтобетонних сумішей сприяє підвищення температури, введення пластифікаторів та збільшення тривалості перемішування, що призводить до зростання енерговитрат, зниження продуктивності та погіршення фізико-механічних характеристик матеріалу.

Найбільш ефективним є спосіб, що передбачає зниження поверхневого натягу бітуму шляхом його переведення в спінений стан при змішуванні гарячого в'язучого з вологим мінеральним матеріалом. Спінювання бітуму покращує змочування мінеральної поверхні та підвищує адгезію в'язучого до неї.

При використанні спіненого бітуму відбувається більш рівномірний розподіл в'язучого в суміші, що супроводжується обволіканням усіх мінеральних частинок тонкою бітумною плівкою. Це забезпечує якісну обробку мінеральної суміші та міцне закріплення в'язучого на поверхні матеріалів незалежно від схеми подачі компонентів у змішувальний агрегат.

Відмінність технології приготування асфальтобетонних сумішей на спіненних бітумах полягає у наявності спеціального устаткування для спінювання в'язучого.

Укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей на спіненних бітумах може відбуватися при температурі на 15–25 °С нижче у порівнянні з гарячими асфальтобетонними сумішами [4].

Спінений бітум можна застосовувати також при холодній регенерації асфальтобетонних покриттів.

Холодний ресайклінг з додаванням спіненого бітуму може виконуватися за методом «на місці» або методом «в установці».

У ході холодного ресайклінгу за методом «на місці» утворений асфальтовий гранулят змішується ресайклером зі спіненим бітумом (рис. 1), і під час однієї робочої операції створюється нова суміш.

Холодний ресайклер, що працює за методом «на місці», оснащений потужним фрезерно-змішувальним ротором, а також системою впорскування. Деякі типи машин також мають вирівнюючий брус, який виконує розрівнювання і попереднє ущільнення нової суміші. Після ущільнення суміші утворюється шар високої якості, який здатний витримувати максимальне транспортне навантаження.

У ході холодного ресайклінгу методом «в установці» знятий асфальтогранулят транспортується до установки для приготування холодної суміші. В установці асфальтогранулят обробляється спіненим бітумом та створюється нова готова до укладання холодна суміш яку можна використовувати безпосередньо для укладання шару або зберігати на складах.

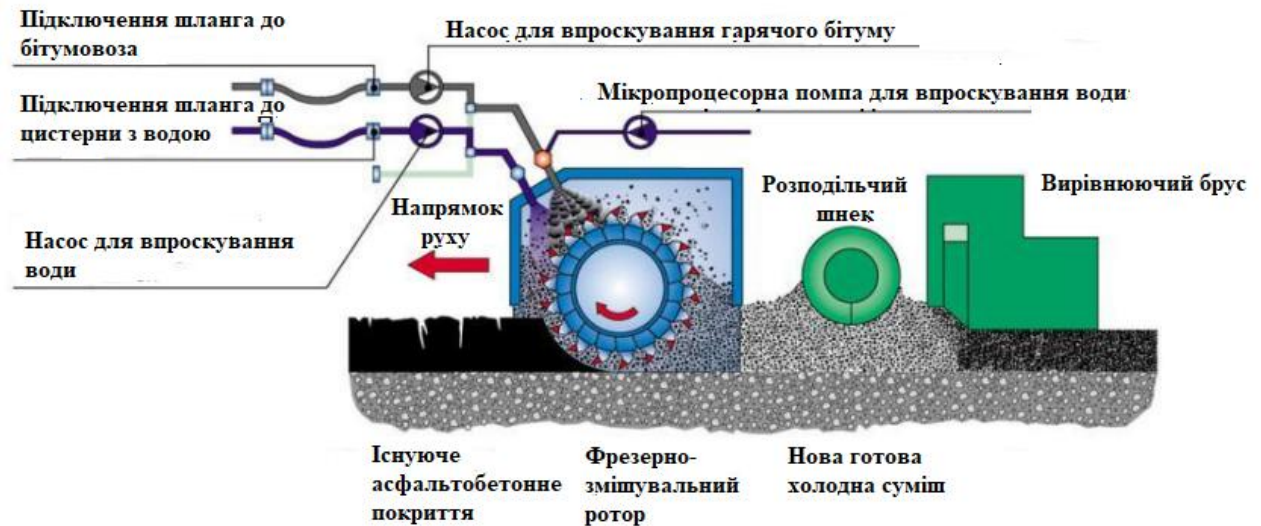


Рис.1. Холодний ресайклінг з додаванням спіненого бітуму за методом «на місці»

Додавання спіненого бітуму в рецикльований асфальтобетонний гранулят дозволяє повністю переробляти його без обмеження терміну перебування його в холодному стані. Переробка без підігрівання вихідного матеріалу дозволяє значно зменшити викиди CO₂. Додавання в'язучого у кількості від 1,5 % до 2,5 % від маси всієї суміші істотно зменшує витрати на новий матеріал. Укладання матеріалу проводиться відразу після приготування суміші. Після укладання та ущільнення шару дорожній рух відразу відновлюють, що призводить до скорочення термінів будівництва.

Сьогодні асфальтобетон на спіненому бітумі є найбільш економічним та ресурсозберігаючим способом виробництва асфальтобетонних сумішей для будівництва та ремонту асфальтобетонних покриттів. Це досягається за рахунок зниження температури при виготовленні, укладанні та ущільненні суміші, а також скорочення часу її перемішування, що сприяє підвищенню строків служби дорожніх покриттів.

Використання меншої кількості вихідного бітуму, порівняно із традиційними технологіями, дозволяє зменшити вартість асфальтобетонної суміші.

Метод холодної регенерації з використанням спіненого бітуму та асфальтогрануляту дає змогу виготовляти більш дешевшу асфальтобетонну суміш, ніж суміш, виготовлена з нових матеріалів.

Застосування спієних бітумів дозволить виконувати значні обсяги ремонтно-будівельних робіт в умовах обмеженого фінансування, що сприятиме швидкому відновленню мережі автомобільних доріг України у стислі строки.

Література

1. Желтобрюх А.Д., Малій П.Р., Одегова Т.С., Тимошук О.Ю. Використання асфальтобетонних сумішей на основі спіненого бітуму. *Дороги і мости*. Київ, 2019. Вип. 19-20. С. 94-106.
2. Савенко В.Я, Ілляш С.І., Мудриченко А.Я. Аналіз фізико-механічних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму. *Дороги і мости*. Київ, 2022. Вип. 25. С. 87-98.
3. Sarvesh Kumrawat, Vinay Deulkar. Foamed Bitumen. *International research journal of engineering and technology*. India, 2018. 5. P. 401-404.
4. Рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спієних бітумів (Р В.2.7-37641918-894:2018). Київ, 2018, 30 с. (Інформація та документація).
5. ДСТУ 8978:2020. Настанова з улаштування шарів дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу. [Чинний від 2021-01-05]. Київ, 2020. 17 с.

Олена Арінушкіна
асистент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна
e-mail: lenaarinushkina@gmail.com, тел. +380663626606

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ ФІБРОВЛОКОН НА ВЛАСТИВОСТІ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ

Анотація. У статті наведено інформацію стосовно покращення властивостей щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом для будівництва шарів дорожнього одягу автомобільних доріг. В статті наведено результати експериментальних досліджень стосовно впливу довжини поліпропіленових фібро волокон на фізико-механічні властивості щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом. Встановлено, що найбільша ефективність властива щебенево-піщаним сумішам укріплених цементом армованих поліпропіленовими фібро волокнами довжиною 18 мм.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, цемент, щебенево-піщана суміш, фіброволокна.

Як відомо, одним із способів покращення властивостей щебенево-піщаних сумішей є їх укріплення. Традиційні методи з використанням лише цементу забезпечують високу жорсткість, але мають суттєвий недолік – низьку стійкість до розтягуючих напружень та поява температурних відображених тріщин на шарі дорожнього покриття. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є використання низьких марок матеріалу за міцністю в шарах конструкції дорожнього одягу, з мінімальним вмістом цементу.

Також, виконаними раніше дослідженнями [1-3] встановлено, що дисперсне армування мінеральної частини ЩПС фіброволокнами, дозволяє змінювати структуру матеріалу укріпленого мінеральним в'язучим та покращувати його властивості. Для виконання експериментальних досліджень було спроектовано склад крупнозернистої щебенево-піщаної суміші, згідно з ДСТУ 9177-3 [4] (рис. 1).

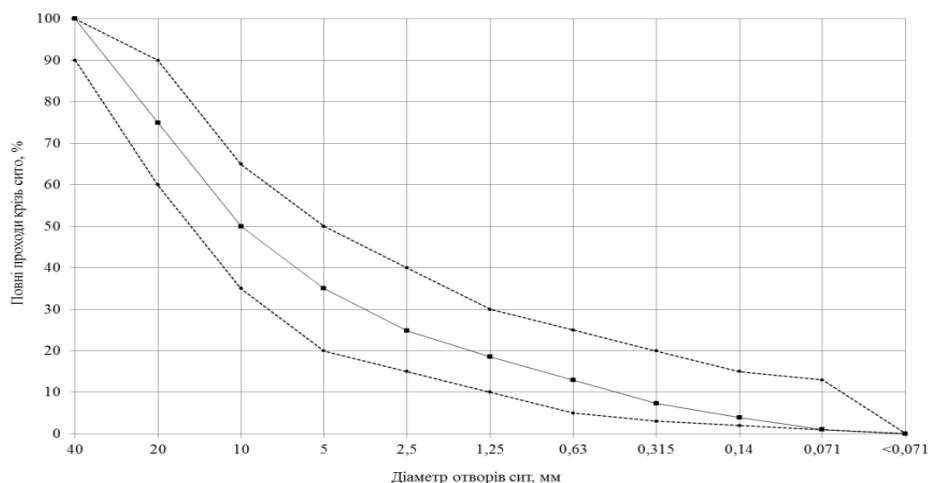


Рис.1. Гранулометричний склад суміші прийнятої для досліджень згідно ДСТУ 9177-3

Для проведення досліджень було виготовлено суміші та заформовані серії лабораторних зразків. Ущільнення здійснювалося на гідравлічному пресі під стандартним навантаженням 20 МПа.

Дослідження виконували на крупнозернистих піщаних сумішах з вмістом цементу 2 %, що відповідає показникам міцності які властиві щебенево-піщаним сумішам укріпленим цементом марки М20.

Для фіброармування було використано поліпропіленові фіброволокна довжиною 6 мм, 12 мм та 18 мм які представлені на будівельному ринку України. Фіброармування виконувалось за допомогою лабораторного змішувача на вищезазначеній суміші у кількості 0,03 % [3] від маси мінеральної частини для крупнозернистої щебенево-піщаної суміші. Результати показують (рис. 2 та рис. 3), що зі збільшенням довжини фіброволокна, міцнісні характеристики зростають. Для дослідженої крупнозернистої суміші армованої фіброволокнами у кількості 0,03 %, міцність на стиск зросла на 22,9 %, і міцність на розкол на 42,9 %.

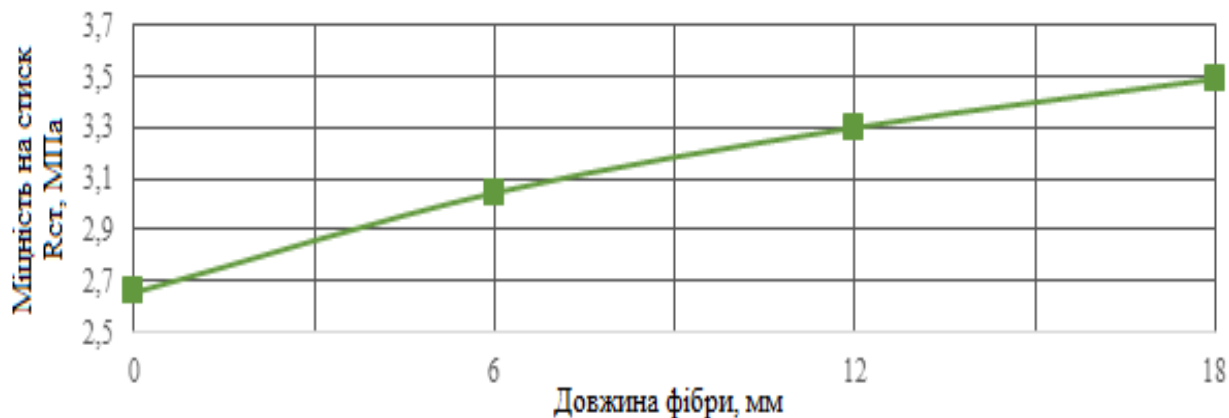


Рис. 2. Залежність показника міцності на стиск від довжини фіброволокон

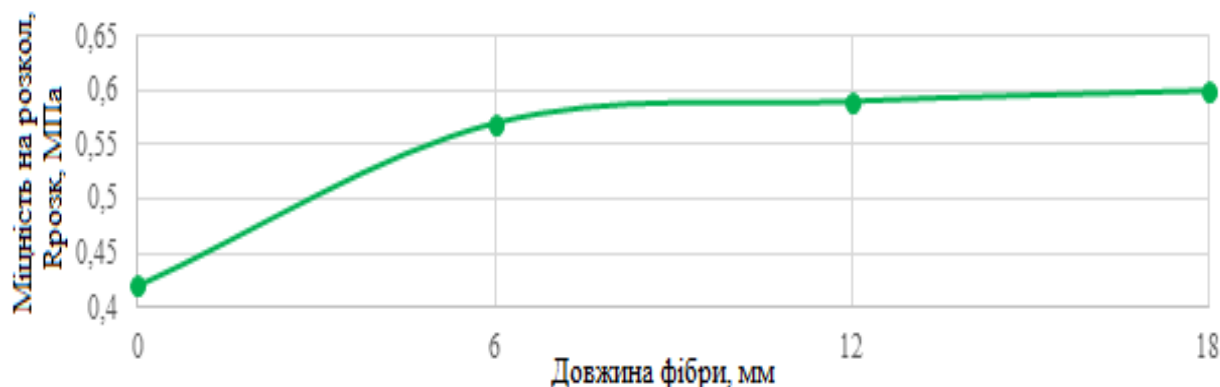


Рис. 3. Залежність показника міцності на розкол від довжини фіброволокон

Також, виготовлені зразки піддавались циклам заморожування-відтавання. Для крупнозернистої щебенево-піщаної суміші максимальна кількість циклів заморожування-відтавання складала 10 циклів.

На рис. 4 та рис. 5 зображено зміну показника міцності від циклів заморожування-відтавання для крупнозернистої щебенево-піщаної суміші армованих фіброволокнами різної довжини у кількості 0,03 %, з чого випливає, що найбільша ефективність так само фіброволокнами у кількості 0,03 %.

Результати досліджень показали, що для крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей, отримані значення міцності для сумішей без фіброармування, менші за значення міцності зразків виготовлених з сумішей армованих поліпропіленовими фіброволокнами всіх досліджуваних довжин. Найвища міцність, так само властива зразкам виготовленим з сумішей армованих фіброволокнами довжиною 18 мм.

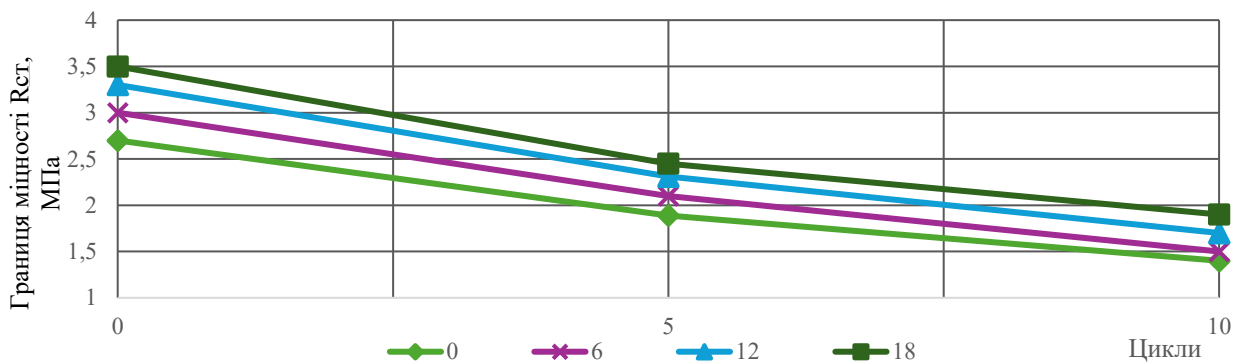


Рис. 5. Залежність зміни границі міцності на стиск від кількості циклів заморожування-відтавання

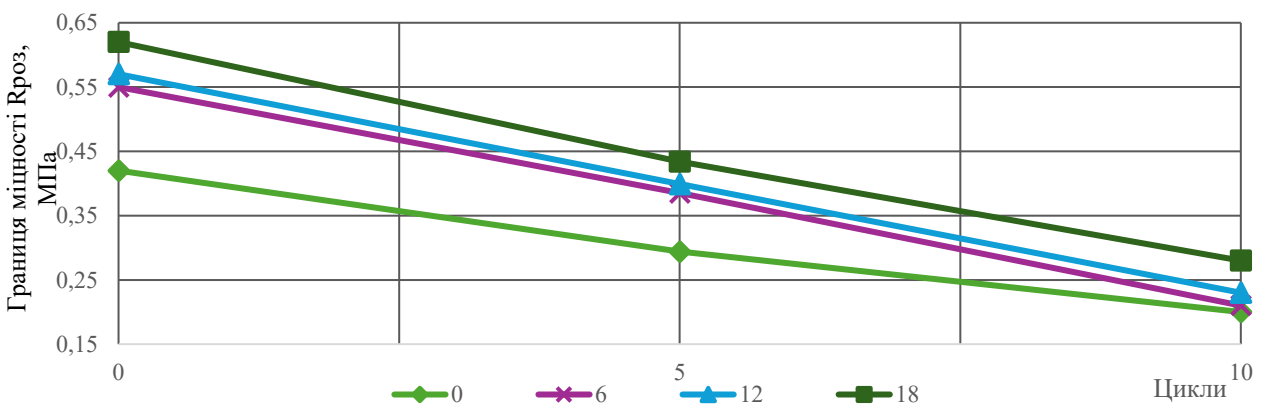


Рис. 6. Залежність зміни границі міцності на розкол від кількості циклів заморожування-відтавання

Узагальнюючи отримані результати можна зробити висновки, що з отриманих результатів досліджень видно, що додавання фіброволокон у склад укріплених цементом крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей позитивно впливає на їх механічні властивості. Зі збільшенням довжини фіброволокна (від 6 мм до 18 мм) у крупнозернистій суміші з вмістом цементу 2 % при одній і тій самій концентрації фіброволокон 0,03 %, спостерігається стійке зростання показників границі міцності на стиск та на розкол. Для крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей застосування поліпропіленових фіброволокон дозволяє зберегти морозостійкість суміші після впливу циклів заморожування-відтавання.

Література

1. Сунь Цзянь. Підвищення довговічності шарів дорожнього одягу влаштованих з використанням щебенево-піщаних сумішей із залістистих кварцитів: дис. на здобуття наук. ступеня доктора філософії: спец. 192 "Будівництво та цивільна інженерія" / Цзянь Сунь. Харків. 2025. 212 с.
2. Арінушкіна О.О. Укріплені цементом щебенево-піщані суміші для будівництва дорожніх одягів автомобільних доріг. // Науковий вісник будівництва. Арінушкіна О.О., Жданюк В.К. – 2016. - №1(83). – С. 120-125.
3. Арінушкіна О.О., Костін Д.Ю. Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах, укріплених цементом. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, ЛНТУ. 2025, Випуск 23. 19–30 с. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02).
4. ДСТУ 9177-3:2022. Матеріали щебеневої та гравійної для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими [Чинний від 2023-01-01]. – К.: УкрНДНЦ, 2023. 20 с. (Державний стандарт України).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАТИВНОСТІ ВІДСІВУ З ВІДХОДІВ РУЙНУВАНЬ В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. У роботі наведено результати експериментальних досліджень деформативних характеристик відсіву дроблення, отриманого з відходів зруйнованих будівель, за умови оптимальної вологості. Встановлено закономірності дезінтеграції мінерального каркасу матеріалу під дією циклічного компресійного навантаження. Обґрунтовано обмеження щодо використання таких матеріалів у конструктивних шарах дорожнього одягу у незв'язному стані.

Ключові слова: відходи руйнувань, відсів дроблення, модуль пружності, дезінтеграція, дорожній одяг, деформативність.

Масштаби руйнувань об'єктів цивільної та промислової інфраструктури внаслідок військових дій призвели до критичного накопичення будівельного сміття, обсяги якого вже обчислюються мільйонами тонн. Традиційні методи утилізації таких відходів через захоронення на полігонах є екологічно небезпечними та економічно недоцільними, що вимагає негайного пошуку шляхів їх рециклінгу. В той же час, дефіцит кондиційної природної сировини для відновлення логістичних маршрутів змушує розглядати відходи руйнувань як перспективний ресурс для дорожнього господарства. В умовах масштабних руйнувань інфраструктури в Україні утворюються значні обсяги великотоннажних будівельних відходів. Повторне використання цих матеріалів у дорожньому будівництві є пріоритетним напрямом циркулярної економіки, що закріплено чинним законодавством [1]. У процесі переробки та дроблення залізобетонних і цегляних конструкцій утворюється значна кількість дрібнофракційної суміші — відсіву. Попри економічну привабливість використання відсіву з відходів руйнувань у конструкціях дорожніх одягів, його безпосереднє застосування пов'язане з технологічними та експлуатаційними ризиками. Попередні теоретичні розрахунки напружено-деформованого стану систем, виконані на основі критерію перколяції [2], вказували на те, що наявність слабких включень у вторинних матеріалах призводить до руйнування жорсткого каркасу і критичного зростання питомої поверхні зерен. Проте питання фактичної деформативності та несучої здатності дрібних фракцій із будівельних відходів потребувало експериментального підтвердження, оскільки саме модуль пружності є ключовим розрахунковим параметром при конструюванні дорожнього одягу. Специфіка відсіву дроблення будівельних відходів полягає у значній неоднорідності його фізико-механічних властивостей. Це зумовлено варіативністю міцності вихідного бетону, наявністю цегляного бою, залишків штукатурних розчинів та інших слабких включень. Така гетерогенність структури створює непередбачувані умови для формування контактних напружень між зернами, що суттєво впливає на стабільність мінерального скелета шару.

Метою даного дослідження є експериментальне визначення еквівалентного модуля пружності та оцінка ступеня структурної деградації відсіву дроблення будівельних відходів під дією ступінчастого навантаження.

Для проведення лабораторного експерименту використовували пробу невідсортованої суміші (відсіву дроблення відходів руйнувань) фракції 0–20 мм. Зважаючи на те, що деформативні властивості дрібнозернистих матеріалів критично залежать від вмісту води, випробування проводилися за умови оптимальної вологості суміші. Дослідження деформативних характеристик матеріалу здійснювалося методом компресійних випробувань у жорсткому металевому циліндрі (умова неможливості бічного розширення). Навантаження передавалося на втрамбовану суміш через жорсткий штамп у вигляді ступінчастих циклів навантаження та розвантаження. Вертикальні деформації (осідання) фіксувалися за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Для комплексної оцінки

роботи матеріалу додатково проводився порівняльний гранулометричний (ситовий) аналіз суміші до початку випробувань та після зняття максимальних навантажень.

Результати компресійних випробувань зафіксували специфічну поведінку відсіву з будівельних відходів. Під час першого циклу навантаження спостерігалися значні показники загальної деформації, що пов'язано з процесами первинного доущільнення та взаємного переміщення зерен. Після зняття навантаження було зафіксовано суттєве значення залишкової (пластичної) деформації. Під час другого, розрахункового циклу навантаження, попри попереднє ущільнення, матеріал продовжував демонструвати високу податливість. За результатами обробки петлі гістерезису «напруження-деформація» встановлено, що еквівалентний модуль пружності досліджуваного відсіву при оптимальній вологості становить лише 45 МПа. Даний показник є екстремально низьким порівняно з традиційними щебеневопіщаними сумішами з природних кам'яних матеріалів (для яких $E = 150\text{--}250$ МПа) і за своїми деформативними характеристиками наближається до показників зв'язних ґрунтів земляного полотна.

Пояснення таких низьких пружних властивостей дають результати порівняльного гранулометричного аналізу матеріалу. Встановлено, що зниження модуля пружності та накопичення залишкових деформацій супроводжується інтенсивною дезінтеграцією (деградацією) мінерального каркасу безпосередньо під час випробування. Згідно з отриманими даними, після компресійного навантаження маса каркасоутворюючої фракції 10–20 мм зменшилася на 5,6 % (з 310,7 г до 293,3 г), а фракції 5–10 мм — на 1,3 %. Водночас зафіксовано синхронний приріст маси дрібних піщаних та пилюватих фракцій. Зокрема, маса частинок розміром менше 0,071 мм зросла майже на 7 %. Це свідчить про те, що під дією навіть статичного навантаження слабкі включення (уламки цегли, цементного каменю), які входять до складу відсіву, не витримують контактних напружень і розколюються.

Процес руйнування крупних зерен та заповнення міжзернового простору новоутвореним пилом призводить до неможливості формування надійного перколяційного кластера. Матеріал втрачає внутрішню тертя і жорсткість, що фізично проявляється у низькому модулі пружності (45 МПа) та значних осіданнях.

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що відсів дроблення з будівельних відходів схильний до інтенсивної дезінтеграції під навантаженням. Використання такого матеріалу у незв'язному стані (без застосування в'язучих) у шарах основи дорожнього одягу є недоцільним, оскільки призведе до швидкого накопичення залишкових деформацій та колієутворення. Таким чином, зафіксована схильність матеріалу до швидкої degradaції структури свідчить про його високу чутливість до навантажень у ранній період експлуатації. Це вказує на необхідність перегляду традиційних підходів до проектування товщин шарів із використанням відходів руйнувань, з обов'язковим урахуванням зниженої жорсткості незв'язного відсіву. Раціональною сферою застосування даного вторинного ресурсу є його використання у робочому шарі земляного полотна, або у складі укріплених (стабілізованих) неорганічними в'язучими сумішей, де цементна матриця нівелюватиме слабкість зерен відсіву.

Література

1. Про затвердження Порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків : постанова Кабінету Міністрів України від 27.09.2022 р. № 1073. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1073-2022-%D0%BF> (дата звернення: 12.04.2026).

2. Білик М. А. Раціональне застосування відходів від зруйнованих споруд при відбудові дорожньої інфраструктури. *Молодь – драйвер відновлення країни : матеріали IV Всеукр. наук. конф. молодих вчених*. 2025. С. 15–16.

Олександр Воловик

*к.т.н., доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: volovyk-dntc@ukr.net, тел. +380677255322

ЩОДО ПИТАННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПРИ ОБҐРУНТУВАННІ ЗАХОДІВ З ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА

Анотація. На основі аналізу літературних джерел, публікацій, звітів з обліку інтенсивності руху та складу транспортного потоку минулих років і технічної документації про наявність ділянок автомобільних доріг загального користування в межах України у статті обґрунтовано доцільність виконання обліку інтенсивності руху та складу транспортного потоку. Як відомо, наявні дані про інтенсивність руху та склад транспортного потоку є важливим транспортно-експлуатаційним показником, який дає можливість обґрунтування і планування обсягів та термінів виконання ремонтних робіт, підвищення якості дорожніх умов та безпеки руху з подальшим забезпеченням пропускної здатності автомобільної дороги відповідно до проектної категорії за рівнем завантаженості автомобільної дороги як в межах однієї окремо взятої області, так і транспортних коридорів та логістичних маршрутів, які проходять територією України.

Ключові слова: інтенсивність руху, склад транспортного потоку, автомобільна дорога, індекс дороги, візуальний облік, автоматизований облік.

Актуальність. Зростання частки великовагових та великогабаритних транспортних засобів, щорічна зміна інтенсивності руху та складу транспортного потоку та його перерозподіл по дорогам державного значення, поява нових типів транспортних засобів, у тому числі багатовісних причепів та напівпричепів призводить до поступового перевантаження автомобільних доріг, їх руйнування та втрати несної здатності конструкції дорожнього одягу в цілому. Не відповідність експлуатаційного стану автомобільної дороги впливає на техніко-економічні показники роботи автомобільного транспорту, собівартість перевезень, швидкість та комфортність руху. Як наслідок – підвищення вимог до експлуатаційного утримання автомобільних доріг.

Наявні дані про інтенсивність руху та склад транспортного потоку є важливим транспортно-експлуатаційним показником, який дає можливість обґрунтування і планування обсягів та термінів виконання ремонтних робіт, підвищення якості дорожніх умов та безпеки руху з подальшим забезпеченням пропускної здатності автомобільної дороги відповідно до проектної категорії [1-6].

Аналізом літературних джерел, публікацій, звітів з обліку інтенсивності руху та складу транспортного потоку минулих років і технічної документації про наявність ділянок автомобільних доріг загального користування в межах України, враховуючи вимоги [7] встановлено, що облік інтенсивності руху та складу транспортного потоку в останнє виконувався у довоєнний період. У той час склад транспортного потоку та його розподіл по автомобільним дорогам державного значення суттєво відрізняється від сучасних реалій існування суспільства. На момент дії воєнного стану, у 2023 році проведено облік інтенсивності руху та складу транспортного потоку з метою встановлення рівня завантаженості та закономірностей розподілу транспортних засобів на автомобільних дорогах державного значення.

Метою роботи є порівняльні дослідження показника приросту інтенсивності руху за роками у довоєнний та воєнний періоди. Для досягнення поставленої мети, завданням є облік інтенсивності руху та складу транспортного потоку на досліджуваних об'єктах.

Постановка завдання. Для визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку існують методи автоматизованого обліку, інструментального обліку та візуального обліку. При оцінці рівня завантаженості автомобільних доріг, обґрунтування проектних

рішень, виконання робіт з експлуатаційного утримування, будівництва або реконструкції ділянки автомобільної дороги, організації дорожнього руху, виявлення аварійно-небезпечних ділянок, оцінки транспортно-експлуатаційних показників, встановлення рівня забруднення повітря викидами та встановлення рівня шумового навантаження, облік руху може бути вибіркоким (коли збір інформації проводиться протягом окремих діб, або годин доби); неперервним (коли збір інформації виконується цілодобово протягом року безперервно); оперативним (коли облік виконується за короткі проміжки часу (менше години)).

Методикою досліджень є встановлення кількості транспортних засобів, які проходять через певний переріз автомобільної дороги, на основі зорового спостереження. Вказана методика є найбільш точним способом, який дозволяє віднести кожен транспортний засіб, що проїжджає, до відповідного класу згідно з розподіл транспортних засобів по типах [8], оскільки завантаженість транспортного засобу та його марка, кількість осей, кількість коліс на одній осі, тип коліс, тип підвіски, тиск у шинах та швидкість руху по різному впливають на конструкцію дорожнього одягу і у подальшому на пропускну здатність автомобільної дороги, як інженерної споруди.

Цей метод найдешевший, оскільки немає необхідності купляти та встановлювати додаткове обладнання для проведення вимірювань, виконувати догляд за ним та періодичне обслуговування. З недоліків слід відмітити, що візуальний облік транспортних засобів ускладнюється при їх високій швидкості, особливо в умовах щільного транспортного потоку.

Для досягнення поставленої мети, облік руху виконувався візуально для прямого і зворотного напрямків на тимчасових облікових пунктах. Перевагу надано візуальному обліку інтенсивності руху, оскільки автоматизовані прилади мають обмежені можливості розподілу транспортних засобів за типами.

Виклад результатів дослідження. Дослідження проведено на прикладі автомобільної дороги державного значення М-03 Київ-Харків-Довжанський, яка проходить в межах Київської, Полтавської, Харківської та Донецької областей на момент дії воєнного стану.

Автомобільні дороги міжнародного значення [9] є важливими транспортними коридорами, які пролягають територією України, відповідно, проходять через чисельну кількість населених пунктів, у тому числі районні центри, сполучаючи їх між собою. Відповідність транспортно-експлуатаційного стану, рівня завантаженості тієї чи іншої ділянки досліджуваної автомобільної дороги є взаємопов'язаними показниками з тією кількістю транспортних засобів, які рухаються по ній з послідуочим встановленням рівня завантаженості автомобільної дороги на підходах до населених пунктів, де щільність потоку є найбільшою або прямолінійних ділянок. При цьому слід враховувати, що на рівень завантаженості впливає не тільки кількість транспортних засобів, але і стан проїзної частини, кількість смуг руху, щільність регульованих і не регульованих перехресть, зон зниження швидкості тощо.

На досліджуваній автомобільній дорозі виконано розподіл пунктів обліку в місцях чітко вираженої зміни інтенсивності руху, зокрема: поза межами населених пунктів, на підходах до населених пунктів з населенням понад двадцять тисяч мешканців, обласних та районних центрів, адміністративних центрів, вантажоутворювальних та пасажироутворювальних комплексів, у місцях перетинання або примикання автомобільних доріг державного значення, у місцях примикання з іншими автомобільними дорогами, де очікується різка зміна загальної інтенсивності руху транспортного потоку.

Візуальний облік руху виконувався одночасно у прямому (в бік збільшення кілометражу) і зворотному (в бік зменшення кілометражу) напрямках руху транспортних засобів.

Пункти обліку в межах обраних ділянок та фактичні значення інтенсивності руху окремо по кожному виду транспорту на основі зорового спостереження наведено у таблиці 1. За отриманими результатами розраховано середньомісячну добову інтенсивність руху та середньорічну добову інтенсивність руху з урахуванням поправочних коефіцієнтів, які враховують нерівномірність розподілу інтенсивності руху за годинами доби, днями тижня, тижнями місяця, місяцями року. Результати розрахунків обліку інтенсивності руху на момент

дії воєнного стану та довідкові дані середньорічної інтенсивності руху у довоєнний період зведено до таблиці 2.

Таблиця 1. Зведений журнал обліку інтенсивності руху транспортних засобів

Індекс дороги	Місце визначення інтенсивності руху, км	Назва ділянки				Інтенсивність руху транспортних засобів по типах									
		Від	До	Легкові	Мікро-автобуси	Автобуси середні	Автобуси важкі	Вантажні легкі	Вантажні середні	Вантажні важкі	Автопоїзди		Мотоцикли та інші ТЗ		
											Тягачі з напівпричі	Тягачі з причепом			
М-03	Київська область														
	32+000	25	307	35	000	12258	817	539	77	885	491	318	201	29	1
	62+000	53	000	62	602	5128	284	264	45	70	171	379	1356	68	0
	101+000	90	346	103	106	3532	266	140	42	182	426	338	1162	134	2
	122+000	121	070	126	700	3389	215	149	47	220	592	208	1233	49	7
	Полтавська область														
	150+000	134	529	151	725	3814	211	147	41	210	569	189	1311	49	9
	191+000	167	000	191	528	3878	290	151	43	248	814	218	1472	105	18
	234+000	227	800	244	847	3685	178	90	42	243	549	176	870	33	1
	351+000	349	740	362	500	6044	236	180	31	285	644	247	671	60	10
	Харківська область														
	399+000	396	094	404	013	491	48	2	4	41	59	46	114	10	0
	405+000	404	000	417	000	485	48	0	6	48	57	44	107	6	0
	420+000	417	000	427	000	627	48	10	6	65	88	52	166	12	0
	435+000	427	000	446	555	547	46	2	6	82	72	51	124	9	0
	450+000	446	555	459	200	890	66	18	3	51	101	63	137	14	1
	461+000	459	200	462	194	1173	65	7	3	109	108	74	127	5	2
	464+000	462	194	468	000	1410	106	54	4	63	153	80	113	16	5
	470+000	468	000	472	221	1480	109	7	5	166	170	184	180	6	8
	475+000	472	221	484	265	705	35	3	1	36	61	82	46	5	2
	490+000	484	265	492	840	653	35	10	0	20	53	44	38	8	1
	500+000	492	840	507	500	322	20	1	0	32	36	56	44	5	0
	515+000	507	500	516	225	421	32	5	0	27	56	56	40	3	0
	518+000	516	225	522	000	1723	103	11	28	163	133	77	63	10	6
	530+000	522	000	539	070	1343	128	15	8	137	123	132	53	6	2
	556+000	539	070	561	470	301	33	3	0	40	31	29	14	1	1
	590+000	573	390	600	887	289	35	5	0	44	34	33	17	1	3
	610+000	600	887	625	000	212	32	6	0	27	14	12	5	3	1
	629+000	625	000	629	500	256	23	2	0	32	36	39	21	4	0
	634+000	629	500	646	200	190	18	1	1	24	24	32	13	4	0
	Донецька область														
	660+000	655	800	664	450	2061	154	54	4	250	300	154	49	18	6
	675+000	672	809	676	670	2685	212	17	1	344	376	245	86	11	9

Таблиця 2. Зведена відомість результатів визначення середньорічної добової інтенсивності руху транспортних засобів

Індекс дороги	Місце визначення інтенсивності руху, км	Назва ділянки				Середньорічна добова інтенсивність руху транспортних засобів	
		Від	До	на момент дії воєнного стану, з 2023 року	у довоєнний період, станом на 2017 рік		
1	2	3	4	5	6		
М-03	Київська область						
	32+000	25	307	35	000	30112	51879
	62+000	53	000	62	602	15325	16609
	101+000	90	346	103	106	12024	9602
	122+000	121	070	126	700	11173	9654
	Полтавська область						
	150+000	134	529	151	725	12037	11002
	191+000	167	000	191	528	12933	11287
	234+000	227	800	244	847	10499	9439
	351+000	349	740	362	500	14599	11843
	Харківська область						
	399+000	396	094	404	013	6770	5 835
	405+000	404	000	417	000	6522	6 607
	420+000	417	000	427	000	8392	7 393
	435+000	427	000	446	555	7548	9 103

Кінець таблиці 2

1	2	3	4	5	6		
	450+000	446	555	459	200	9616	10 359
	461+000	459	200	462	194	12044	14 964
	464+000	462	194	468	000	16143	19 524
	470+000	468	000	472	221	18291	21 725
	475+000	472	221	484	265	7865	15 344
	490+000	484	265	492	840	6928	14 018
	500+000	492	840	507	500	4210	14 259
	515+000	507	500	516	225	4676	12 443
	518+000	516	225	522	000	16933	16 031
	530+000	522	000	539	070	15755	14 972
	556+000	539	070	561	470	3714	4421
	590+000	573	390	600	887	2877	3645
	610+000	600	887	625	000	2011	4 853
	629+000	625	000	629	500	3084	3 911
	634+000	629	500	646	200	2310	2 959
Донецька область							
	660+000	655	800	664	450	5356	5080
	675+000	672	809	676	670	6837	6040

За результатами обліку інтенсивності руху та складу транспортного потоку побудовано гістограму перерозподілу транспортних засобів окремо по кожній області, відповідно по всім ділянкам досліджуваної автомобільної дороги (рис. 1-4).

Київська область

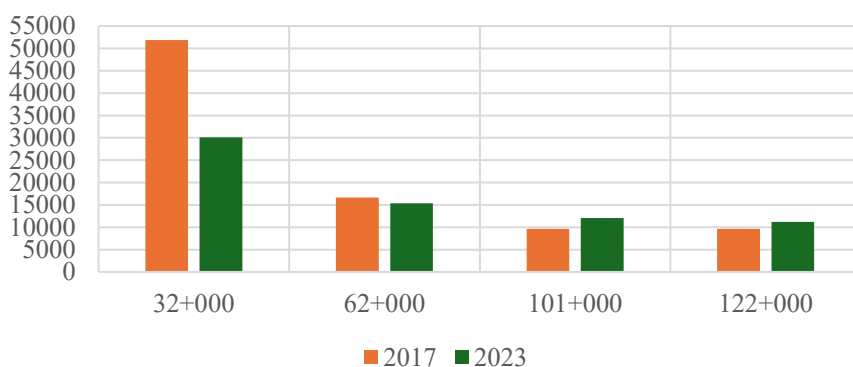


Рис. 1. Гістограма зміни інтенсивності руху транспортних засобів за роками спостережень на автомобільній дорозі М-03 Київ-Харків-Довжанський в межах Київської області

Полтавська область

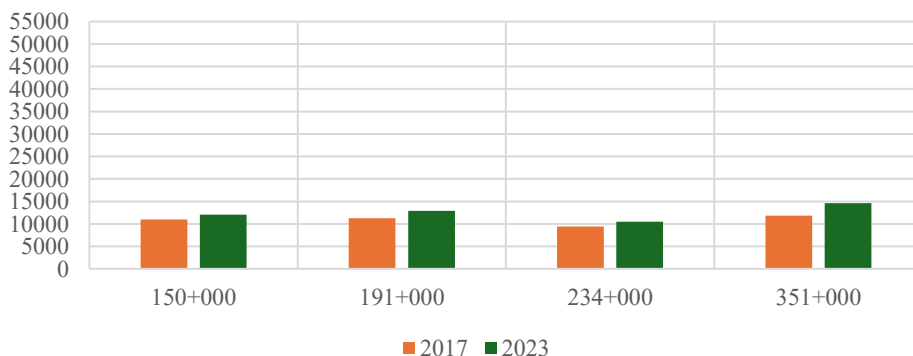


Рис. 2. Гістограма зміни інтенсивності руху транспортних засобів за роками спостережень на автомобільній дорозі М-03 Київ-Харків-Довжанський в межах Полтавської області

Харківська область

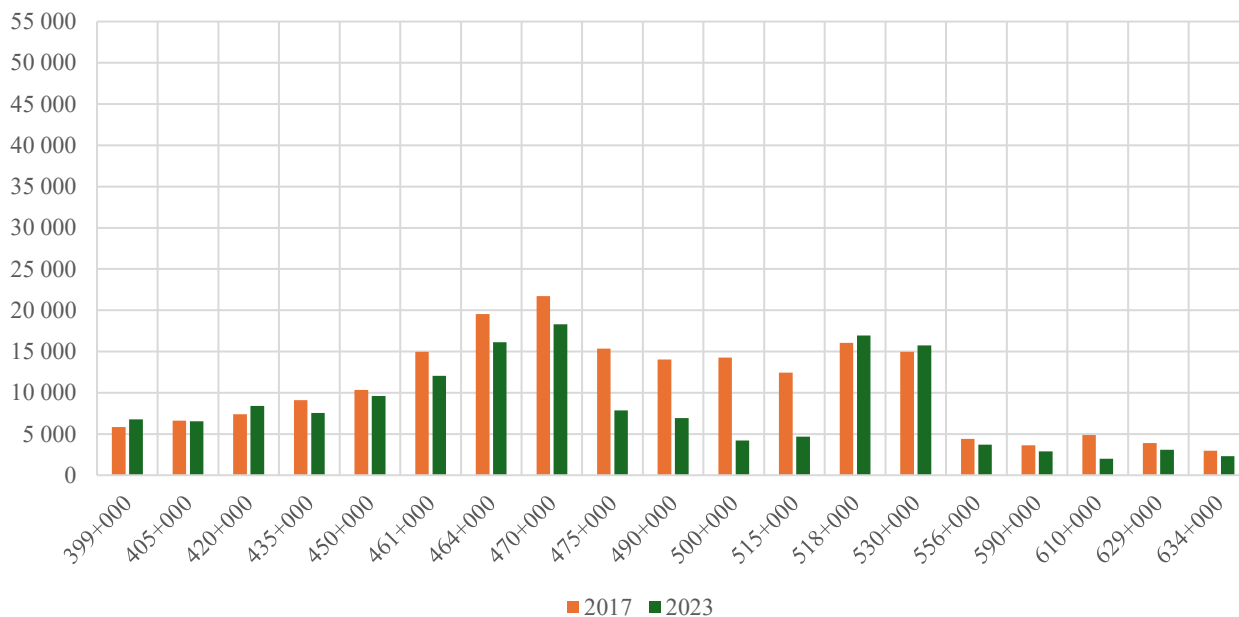


Рис. 3. Гістограма зміни інтенсивності руху транспортних засобів за роками спостережень на автомобільній дорозі М-03 Київ-Харків-Довжанський в межах Харківської області

Донецька область

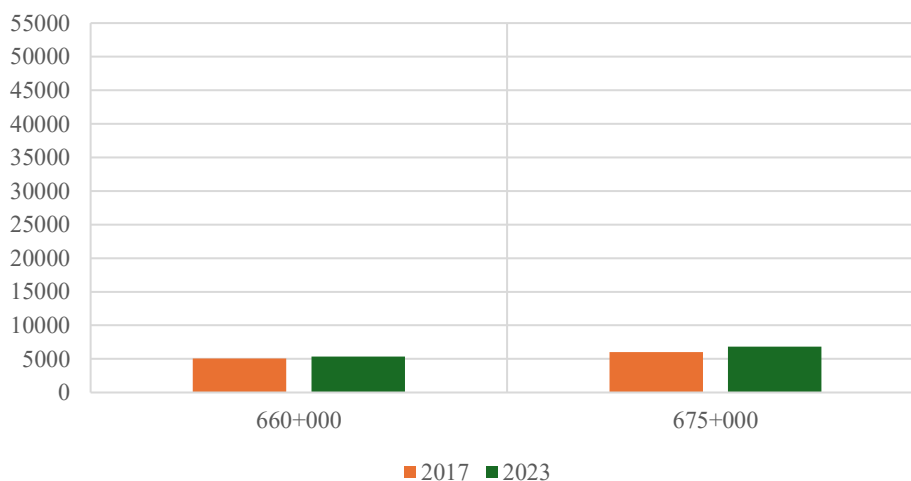


Рис. 4. Гістограма зміни інтенсивності руху транспортних засобів за роками спостережень на автомобільній дорозі М-03 Київ-Харків-Довжанський в межах Донецької області

Висновки. За результатами досліджень можемо відзначити, що найбільша концентрація транспортних засобів характерна у найближчих точках до крупних населених пунктів, зокрема обласних центрів та столиці України – міста Київ, де спостерігається найбільша середньорічна добова інтенсивність руху транспортних засобів у кількості 51879 автомобілів на добу у довосенний період, км 32+000. У зв'язку із введенням військового стану встановлено, що ця ділянка характеризується різкою зміною середньорічної добової інтенсивності руху транспортних засобів, зокрема на км 32+000 зменшення на 41,96 %.

Різка зміна середньорічної добової інтенсивності руху транспортних засобів також характерна на під'їздах до обласного центру – міста Харків, зокрема на км 490+000, км 500+000, км 515+000 зменшення на 50,58 %, 70,47 % та 62,42 % відповідно.

Також слід відзначити, що на значній кількості пунктів обліку спостерігається збільшення середньорічної добової інтенсивності руху транспортних засобів.

Відповідно, результати проведених досліджень можуть бути використані при подальшому визначенні рівня завантаженості автомобільної дороги, обґрунтування заходів щодо підвищення транспортно-експлуатаційних показників автомобільної дороги, формування плану дорожніх робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання за умови необхідності проведення обліку інтенсивності руху та складу транспортного потоку щорічно.

Література

1. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану: ДСТУ 3587:2022. – [Чинний від 2022-12-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 19 с.
2. Безпека дорожнього руху. Лінійний аналіз аварійності та оцінювання умов безпеки руху на автомобільних дорогах: ДСТУ 8894:2019. – [Чинний від 2020-10-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 37 с.
3. Види та перелік робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання. Автомобільні дороги: ДСТУ 8747:2017. – [Чинний від 2020-01-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 14 с.
4. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. – 91 с.
5. ДБН В.2.3-4:2015. Зміна № 1 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2019-09-01]. Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. – 34 с.
6. ДБН В.2.3-4:2015. Зміна № 2 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2022-03-01]. Київ, Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. – 16 с.
7. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України: П-Г.1-218-113:2009. – [Чинний від 01.07.2009]. – Київ, Харків, 2009. – 258 с.
8. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку: ДСТУ 8824:2019. – [Чинний від 2019-10-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 36 с.
9. Постанова Кабінету міністрів України «Про затвердження переліку автомобільних доріг загального користування державного значення», № 1318 від 15.12.2023 року.

Олександр Догадайло

к.т.н., доцент, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля;

Яна Догадайло

к.е.н., доцент, доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля;

Сергій Серета

здобувач вищої освіти 4-року навчання, група Д-47-22

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

e-mail: san19san75@gmail.com

ЕФЕКТИВНЕ ВИКОНАННЯ ФУНКЦІЙ ЗАМОВНИКА ПІД ЧАС ЗИМОВОГО УТРИМАННЯ ДОРІГ

Анотація. У роботі досліджено механізми оптимізації діяльності замовника в умовах дії ДСТУ 3587-2022 та ДСТУ 9185:2022. Розглянуто юридичну відповідальність органу управління за безпеку руху та впровадження цифрового моніторингу на основі Floating Car Data (FCD) для оцінки якості робіт за показником відновлення швидкості потоку. Обґрунтовано використання прецизійних метеомоделей для превентивної обробки покриття. Доведено ефективність снігозахисту з оптимальними параметрами та переваги механізованого створення снігових траншей. Сформовано концепцію переходу до інтелектуальних систем управління зимовим утриманням

Ключові слова: зимове утримання, замовник, FCD-моніторинг, снігозахист, зимова слизькість.

Ефективне виконання функцій замовника під час зимового утримання автомобільних доріг є фундаментом стабільного функціонування транспортної інфраструктури держави, що безпосередньо впливає на економічну безпеку та соціальну стабільність. Актуальність даної теми зумовлена суттєвою трансформацією кліматичних умов в Україні, що характеризується непередбачуваністю опадів, частими переходами температури через нуль градусів за Цельсієм та посиленням вітрового навантаження, яке призводить до інтенсивного снігозанесення.

Діяльність замовника (Служб відновлення та розвитку інфраструктури) базується на повноваженнях, закріплених статтею 11 Закону України «Про автомобільні дороги» [1], що передбачає організацію утримання автомобільних доріг відповідно до державних норм та здійснення контролю за станом мережі. Згідно зі статтею 13 Закону України «Про автомобільні дороги» [1], орган управління несе персональну цивільно-правову відповідальність за стан покриття та відшкодування збитків користувачам, що виникли внаслідок незадовільного утримання.

Традиційні підходи до управління, що базувалися на застарілих нормативах та пасивній моделі очікування повідомлень про негоду, вичерпали свій ресурс. Сьогодні замовник – це не просто контролер актів виконаних робіт, а високотехнологічний центр управління ризиками. Забезпечення безперебійного руху взимку вимагає інтеграції космічного моніторингу, прецизійного метеорологічного прогнозування та впровадження інноваційних інженерних споруд для снігозатримання. У контексті європейської інтеграції та оновлення нормативної бази, зокрема введення в дію ДСТУ 3587-2022 [2], вимоги до оперативності та якості роботи замовника зросли в рази, що робить переосмислення його функцій нагальною потребою галузі.

Постановка завдання полягає у системному дослідженні та детальному розписі механізмів, які дозволяють замовнику максимально ефективно реалізовувати свої повноваження. Це передбачає глибокий розбір юридичної відповідальності органу управління, визначеної чинним законодавством, та перетворення її на дієві інструменти контролю підрядників. Необхідно дослідити роль сучасних технологій, таких як Floating Car Data (FCD), у процесі оперативного моніторингу стану доріг та оцінки ефективності використання протижелезних матеріалів. Також завданням є порівняльний аналіз світових метеорологічних моделей для вибору найбільш адекватної стратегії планування ресурсів та обґрунтування переваг превентивного снігозахисту над механічним очищенням. Кінцевою

метою є створення деталізованого керівництва, яке охоплює всі етапи зимового утримання – від підготовки техніки восени до аналізу і фіксації результатів проведеної роботи навесні.

Нормативно-правовий базис визначає межі та зміст діяльності замовника. Як уже було зазначено, згідно зі Статтею 13 Закону України «Про автомобільні дороги» [1], орган управління несе персональну відповідальність за стан доріг загального користування. Ця відповідальність є багатогранною: вона включає не лише технічну справність покриття, а й безпеку користувачів доріг. Замовник зобов'язаний забезпечувати відповідність стану доріг встановленим нормам, контролювати якість робіт підрядника та цільове використання бюджетних коштів. У разі виникнення ДТП через незадовільні дорожні умови, саме замовник є першою інстанцією, до якої висуваються претензії щодо відшкодування збитків. Ключовим інструментом виконання цих функцій є патрулювання. Відповідно до ДСТУ 3587-2022 [2], патрулювання має бути не формальним, а аналітичним. Стандарт чітко класифікує дороги за чотирма рівнями вимог залежно від інтенсивності руху. Для першого рівня (міжнародні та національні дороги з трафіком понад 7000 авт./добу) патрулювання у період прогнозованої негоди має бути цілодобовим. Замовник повинен перевіряти не лише наявність снігу, а й стан узбіч, тротуарів, заїзних кишень та технічних засобів організації дорожнього руху. Важливо розуміти, що будь-яке відхилення від строків ліквідації слизькості (від 3 до 12 годин залежно від рівня) є порушенням, яке замовник має фіксувати у відповідних приписах.

Одним із найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності діяльності замовника є впровадження системи моніторингу на основі Floating Car Data (FCD). Традиційні методи контролю, такі як виїзд інспектора або перегляд камер відеоспостереження, мають суттєві обмеження. Під час сильних хуртовин видимість на камерах часто нульова, а інспектор фізично не може охопити сотні кілометрів мережі одночасно. Технологія FCD, що базується на анонімних даних від мобільних пристроїв та навігаційних систем, дозволяє бачити реальну картину руху. Замовник отримує можливість відстежувати середню швидкість потоку на кожній ділянці. Якщо на певній ділянці швидкість падає нижче критичного рівня при відсутності ДТП, це є прямим індикатором утворення зимової слизькості або снігового замету. Особливу цінність має показник $T_{\text{відн}}$ – час, за який швидкість потоку повертається до норми після проходження снігоочисної техніки. Аналіз $T_{\text{відн}}$ дозволяє замовнику оцінювати якість протижелезних матеріалів. Якщо після обробки сіллю або розсолем швидкість не зростає, це свідчить про неправильну концентрацію реагенту або несвоєчасність його розподілення. Таким чином, замовник переходить від контролю «виїзду машини з гаража» до контролю «реального стану проїзду».

Прогнозування погоди є наступним критичним елементом. Замовник і підрядник при виборі сайту прогнозу погоди мають орієнтуватися у світових чисельних моделях прогнозування погоди (NWP). Глобальні моделі, такі як ECMWF (Європейський центр середньострокових прогнозів) та GFS (Американська система), надають загальну картину на 7–10 днів, що дозволяє заздалегідь привести техніку у стан підвищеної готовності. Однак для оперативного управління замовник може використовувати регіональні моделі з високою роздільною здатністю, наприклад, ICON-EU або WRF. Ці моделі враховують локальну орографію та вплив великих водойм, що дозволяє з точністю до години спрогнозувати початок опадів або момент утворення «чорного льоду». Розуміння фізики процесів, зокрема різниці між адвективною та радіаційною ожеледдю, дозволяє замовнику вимагати від підрядника превентивної обробки покриття розсолами ще до початку опадів. Це запобігає утворенню адгезії (зчеплення) льоду з покриттям, що в разі полегшує подальшу розчистку.

Не варто нехтувати проблемами снігозахисту. Науковці кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля Харківського національного автомобільно-дорожнього університету мають великий практичний досвід дослідження снігозаносимих ділянок доріг. Вже більше 55 років при кафедрі функціонує наукова лабораторія зимового утримання доріг. Одним з важливих результатів діяльності лабораторії є створення базових нормативних документів щодо зимового експлуатаційного утримання доріг загального користування, зокрема і ДСТУ 9185:2022 Настанова щодо зимового утримування

автомобільних доріг [3]. На основі досліджень лабораторії та досвіду експлуатації доріг у зимовий період встановлено, що механічне очищення заносів є найменш ефективним способом боротьби зі снігом. Наукові праці Рональда Таблера [4, 5] та вітчизняні дослідження підтверджують: вартість розчищення одного кубічного метра снігу, що вже потрапив на дорогу, значно вища за вартість його утримання на підходах. Замовник повинен ініціювати встановлення снігозатримувальних щитових ліній (в тому числі з полімерних сіток) та збереження і відновлення лісосмуг. Важливою технічною характеристикою щитових ліній є їхня провітність. Оптимальний показник – 50%. Такі конструкції не зупиняють вітер повністю (що призвело б до швидкого занесення самої щитової лінії), а сповільнюють його, змушуючи сніг випадати в осад за щитом у вигляді довгого пологого шлейфу. Використання полімерних сіток є сучасною альтернативою важким дерев'яним щитам, оскільки вони легші у монтажі та зберіганні.

Окрему увагу замовник повинен приділяти технічним характеристикам матеріалів, що використовуються для тимчасового снігозахисту, зокрема полімерним сіткам. На превеликий жаль, у сучасній практиці існують непоодинокі випадки, коли підрядні організації, намагаючись спростити монтаж або зменшити вітрове навантаження на опори, застосовують полімерні сітки з надмірною провітністю – на рівні 65 %, а іноді навіть 80 %. З інженерної та аеродинамічної точок зору встановлення таких конструкцій є абсолютно недоцільним і являє собою марну трату часу, людських ресурсів та бюджетних коштів. Фізика процесу снігозатримання базується на створенні зони аеродинамічної тіні, де швидкість повітряного потоку падає нижче критичної межі, необхідної для перенесення сніжинок. При використанні сітки з провітністю понад 60 %, повітряний потік проходить крізь перешкоду майже без втрати кінетичної енергії. Сніг не осідає біля щита, а продовжує рух, вільно проникаючи крізь великі чарунки, і зрештою накопичується безпосередньо на проїзній частині. Науково обгрунтовано та підтверджено багаторічними експериментами, що еталонним показником пористості для снігозатримувальної перешкоди є діапазон 45-55 %. Саме така щільність забезпечує оптимальне співвідношення між накопичувальною здатністю та стійкістю конструкції до перекидання. Замовник, у межах своїх контрольних функцій, зобов'язаний жорстко припинити спроби використання підрядником невідповідних матеріалів ще на етапі вхідного контролю або під час перевірки готовності до зимового періоду. Допущення встановлення «прозорих» сіток фактично означає залишення ділянки дороги без захисту, що в умовах сильної хуртовини призведе до блокування руху. Ефективний замовник має вимагати від підрядника надання технічних паспортів на полімерні вироби та проводити вибіркові заміри фактичної провітності. Лише прискіпливий контроль за дотриманням параметрів пористості дозволить перетворити снігозахисні споруди на реальний бар'єр для стихії, а не на формальну декорацію вздовж автомобільної дороги.

Додатковим високоефективним напрямком, який замовник має активно впроваджувати у практику підрядних організацій, є створення системи снігових траншей на прилеглих до доріг полях. Цей метод базується на принципі аеродинамічного затримання снігу шляхом штучного збільшення шорсткості поверхні за межами смуги відведення. Снігові траншеї дозволяють акумулювати значні обсяги снігу ще до того, як він наблизиться до земляного полотна, що критично важливо для ділянок, які проходять у низинах або на відкритих степових плато.

Головною перевагою снігових траншей є повна відсутність потреби у важкій ручній праці, що вигідно вирізняє цей метод на фоні встановлення полімерних сіток або дерев'яних щитів. Якщо монтаж, обслуговування, а потім і демонтаж штучних загороджень потребують залучення значної кількості дорожніх робітників, значного часу та витрат на логістику (складування та перевезення), то створення траншей здійснюється виключно механізованим способом. Використання тракторів чи автогрейдерів з клиновидними відвалами або спеціалізованих агрегатів дозволяє за одну зміну підготувати кілометри захисних ліній.

Більше того, снігові траншеї є «самовідновлюваним» ресурсом: після заповнення траншеї снігом підрядник може оперативно прокласти нову паралельну лінію по тому ж

сніговому масиву, створюючи багаторядний ешелонований захист. Замовник повинен стимулювати підрядників до використання саме цієї технології, оскільки вона дозволяє суттєво знизити собівартість утримання одного кілометра дороги, вивільнити людські ресурси для інших невідкладних робіт та забезпечити найвищу ємність снігозатримання серед усіх тимчасових засобів захисту. Контроль замовника у цьому питанні має зосереджуватися на своєчасності прокладання перших траншей (відразу після випадання перших 10-15 см снігу) та їхній правильній орієнтації відносно панівних вітрів.

Важливою є методика польового контролю. Замовник не повинен покладатися лише на дані метеостанцій, які можуть знаходитися на великій відстані одна від одної. Рекомендується облаштування контрольних снігомірних пунктів на найбільш важливих ділянках доріг. Використання каліброваних майданчиків дозволяє точно вимірювати інтенсивність снігопаду та щільність снігового покриву. Це дає замовнику об'єктивні аргументи у суперечках з підрядником щодо обсягів використаних паливно-мастильних матеріалів та моторесурсів.

Крім того, замовник має суворо контролювати правила формування снігових валів після очищення доріг від снігу. Згідно з нормативами, вали не повинні обмежувати видимість, перебувати на пішохідних переходах ближче ніж за 6 метрів або перекривати доступ до технічних споруд.

У висновках слід зазначити, що ефективне виконання функцій замовника під час зимового утримання доріг можливе лише за умови комплексного поєднання адміністративних, технологічних та інженерних підходів. Основним вектором розвитку має стати перехід до інтелектуальних транспортних систем, де дані від датчиків покриття, метеомоделей та GPS-трекерів техніки зводяться в єдину аналітичну панель. Юридична відповідальність замовника, підкріплена сучасними методами моніторингу, стає гарантом безпеки. Превентивний снігозахист та грамотне використання протиожеледних матеріалів дозволяють не лише зберегти життя людей, а й значно подовжити термін служби дорожнього одягу, мінімізуючи руйнівний вплив соляних розчинів та механічних впливів відвалів. Замовник майбутнього – це оператор даних, який випереджає негоду, а не просто бореться з її наслідками.

Література

1. Про автомобільні дороги : Закон України від 08 вересня 2005 р. № 2862-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15> (дата звернення: 10.04.2026).
2. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги. Вимоги до експлуатаційного стану : ДСТУ 3587-2022. [Чинний від 2023–01–01]. Київ : УкрНДНЦ, 2022. 45 с.
3. Настанова щодо зимового утримування автомобільних доріг : ДСТУ 9185:2022. [Чинний від 2023–09–01]. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 82 с.
4. Tabler R. D. Design Guidelines for the Control of Blowing and Drifting Snow. Washington, DC : Strategic Highway Research Program, 1991. 366 p.
5. Tabler R.D. The Mechanical Control of Blowing Snow. Laramie : Tabler & Associates, 1991. 265 p.

IMPLEMENTATION OF THE INTEGRATED PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIP MODEL AS A KEY INSTRUMENT FOR UKRAINE'S ROAD INFRASTRUCTURE TRANSFORMATION: SUSTAINABLE DEVELOPMENT PERSPECTIVE

Abstract. *The work substantiates strategic directions for the transformation of Ukraine's road infrastructure based on sustainable development principles. The research proposes an integrated logical framework for PPP implementation, enabling a transition from linear construction to cyclical road asset lifecycle management. The model integrates financial, digital, and juridical mechanisms to enhance transparency and attract international investment. It is argued that the synergy of phased partnership and multidimensional BIM modeling provides a sustainable pathway for infrastructure recovery, aligning national practices with ISO 55000 and PIARC standards.*

Keywords: *road infrastructure, public-private partnership (PPP), transformation, sustainable development, integrated PPP model, road asset lifecycle.*

The road network serves as the cornerstone of any nation's infrastructure, acting as a vital prerequisite for economic growth and improving the population's quality of life. However, amid the full-scale war, Ukraine's road sector has encountered unprecedented challenges. The total cost of infrastructure recovery and reconstruction needs nationwide is estimated at a staggering USD 524 billion over the next decade, according to the fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4), conducted jointly by the Government of Ukraine, the World Bank, the European Commission, and the United Nations [1]. This requirement has increased by 7,8% (US\$ 38 billion) compared to the previous year's assessment (RDNA3). The transport sector ranks second in terms of total needs, amounting to nearly USD 78 billion (Table 1), with the requirement growing by 5% (US\$ 4 billion) over the past year.

Table 1. Ukraine's infrastructure recovery and reconstruction needs over the next decade

Economic Sector	Recovery and reconstruction needs [1], US\$ billion	Needs Structure, %
Housing	83,7	15,97
Transport	77,5	14,79
Energy	67,8	12,94
Commerce & industry	64,4	12,29
Agriculture	55,5	10,59
Social protection & livelihoods	38,9	7,42
Education & science	32,9	6,28
Explosive hazards management	29,8	5,69
Health	19,4	3,70
Other	54,1	10,33
Total	524	100,00

It is essential to emphasize that the challenges within Ukraine's road sector existed long before the imposition of martial law: fixed assets were significantly depreciated, management efficiency

remained low, and corruption risks were prevalent [2]. The current situation demands more than just the physical restoration of what was lost; it requires a qualitative transformation in the management of road asset lifecycles based on the 'Build Back Better' principle [3]. This implies the implementation of innovative financing models and digital technologies that will ensure transparency, accountability, and the environmental sustainability of the recovery process [4].

The recovery of Ukraine has the potential to become one of the most ambitious infrastructure projects of the 21st century. The experience of international financial institutions and global frameworks for sustainable recovery emphasize the necessity of integrating ESG principles (Environmental, Social, and Governance) into all stages of project planning and implementation [5]. This requires coordinated efforts between government authorities, local communities, and international partners [6]. The transport sector, with needs totaling USD 78 billion, critically depends on the mobilization of private capital. Experts estimate that 30–35% of investment requirements could be covered by the private sector through public-private partnership (PPP) mechanisms, risk insurance programs, and guarantees from organizations such as the IFC and MIGA [7]. Integrating these mechanisms with the DREAM (Digital Restoration Ecosystem for Accountable Management) digital ecosystem enables the creation of a 'single window' for project monitoring, ensuring compliance with international transparency standards [8].

Thus, the research, the purpose of which is to provide a scientific justification for promising directions in the development of Public-Private Partnerships within Ukraine's road industry, and to develop integrated models for concession agreements and financial transformation models for the network based on digitalization, transparency, and environmental sustainability during post-conflict recovery [2], is relevant. The work [2] substantiates prospective directions for the transformation of Ukraine's road sector based on the concepts of sustainable development and public-private partnership (PPP). A comprehensive analysis of the scale of transport network destruction was conducted, and the financial recovery needs for reconstruction were assessed in accordance with the RDNA4 report (2025). The classification of nine types of concession agreements is detailed, and the selection of an integrated infrastructure model for phased partnership with "60/40" mixed financing is justified. The necessity of digital transformation in the industry is proven through the implementation of multidimensional BIM technologies and the DREAM ecosystem as tools for ensuring transparency and investment de-risking. Strategic recommendations have been developed for adapting road projects to the environmental standards of the EBRD "Green Transition" 2026–2030. Proposals have been formulated to improve the financing model of the road sector through the use of PPPs, specifically: two models have been selected as motorway concession models for Ukraine: "Build-Operate-Transfer" (BOT) and "Reconstruction-Operate-Transfer" (ROT); an integrated infrastructure model of phased partnership was chosen as the concession agreement model for the construction and operation of highways in Ukraine; the financing model for motorway concessions and the procedure for financing the concession project at the implementation stage were determined [2]. However, the work [2] has not yet detailed the interplay between the individual results and the sequential roadmap for PPP development. To address this, the current study focuses on establishing a logical framework for the implementation of an integrated PPP model

The integrated Public-Private Partnership (PPP) model in Ukraine's road sector is a complex interaction system where each stage of the road asset's lifecycle is synchronized with digital control tools and financial mechanisms. The logical framework for this interaction is presented as a vertical progression in Fig.

The proposed integrated model (Fig.) demonstrates a transition from linear construction to cyclical road asset lifecycle management [9]. The transition to cyclical management implies a shift from the mere process of budget spending on construction toward investing in assets, where every currency unit spent is monitored by a digital twin and secured by the long-term liability of the private partner. The primary advantage of this logic lies in the synergy between financial resilience (the 60/40 model) and digital transparency (DREAM ecosystem + BIM). This facilitates not only the accelerated transformation of infrastructure but also ensures the institutional trust of international donors through automated monitoring of every eurocent of investment. The utilization of 7D BIM at the asset transfer

stage guarantees that the state receives not merely a physical facility, but its complete "digital genetics" for subsequent effective operation.

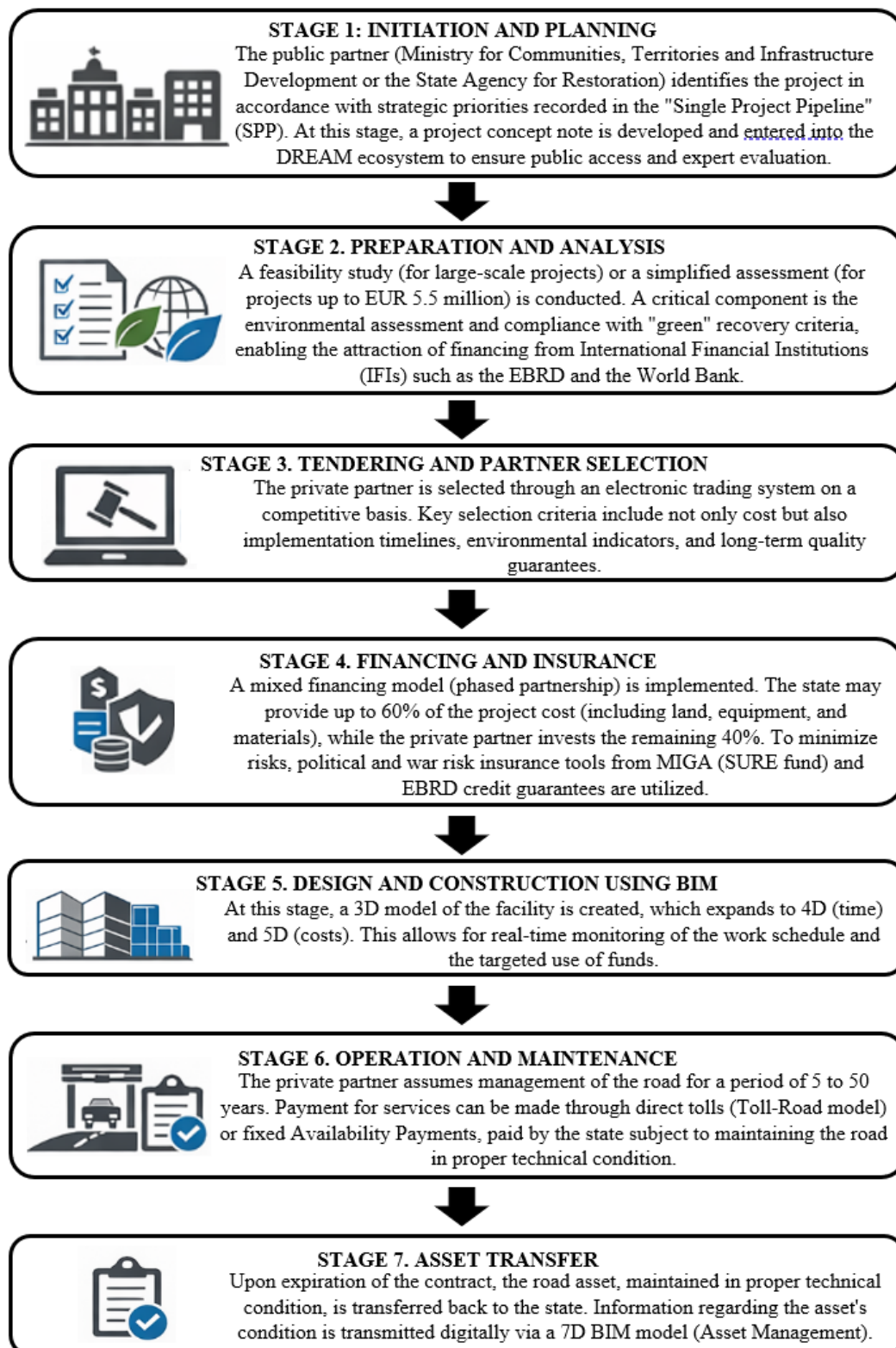


Fig. 1. Logical framework for the implementation of the integrated PPP model in the road sector

Thus, the study refines the conceptual framework for road infrastructure transformation by developing an integrated PPP model which, unlike existing linear approaches, is based on the principle of cyclical road asset lifecycle management. An original concept of systemic integration is

proposed, combining financial (60/40 split), digital (BIM+DREAM), and juridical (Availability Payments) tools within a single logical framework. This ensures the continuous transfer of the object's 'digital genetics' (7D BIM) throughout its lifecycle and establishes new risk mitigation mechanisms for international investors." The proposed model aligns with the international standards of asset management, particularly ISO 55000 [9] and the PIARC Road Asset Management Manual [10], which define the road asset lifecycle as a continuous process of value creation and preservation.

In a work Google Gemini and Google Translate services were utilized to facilitate the academic translation and terminological adaptation of the article. Meanwhile, the analytical substantiation of the proposed models, the development of strategic transformation pathways, final scientific editing of the text, and the formulation of conclusions were performed directly by the authors, ensuring scientific novelty and original interpretation of the results.

Literature

1. World Bank Group, Government of Ukraine, European Union, & United Nations. (2025). *Updated Ukraine recovery and reconstruction needs assessment (RDNA4)*. <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/02/25/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>
2. Dohadailo, Y., & Dohadailo, O. (2025). Developing public-private partnerships within the framework of Ukraine's road infrastructure reconstruction based on sustainable development principles. In *Science and education as the basis for the modernization of the world order: Monographic series «European Science»* (Book 45, Part 42, pp. 162-172, 240-243). Karlsruhe, Germany: SWorld & Scientific Publishing Management. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2025-45-02-037>
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025, February 25). *Ukraine will need USD 524 billion for recovery and reconstruction over the next 10 years – new RDNA4 assessment released*. <https://www.kmu.gov.ua/en/news/524-mlrd-dolariv-na-vidnovlennia-ta-rekonstruktsiu-potrebutatyme-ukraina-u-naiblyzhchi-10-rokiv-opryliudneno-novu-otsinku-rdna4>
4. United Nations Development Programme. (2024, May 22). *Creative recycling of rubble in Ukraine puts reconstruction in the spotlight with new Government, UNDP campaign*. <https://www.undp.org/ukraine/press-releases/creative-recycling-rubble-ukraine-puts-reconstruction-spotlight-new-government-undp-campaign>
5. International Institute for Sustainable Development. (2025, July). *Building forward better: Sustainable recovery for Ukraine* [Policy brief]. <https://www.iisd.org/publications/brief/building-forward-better-sustainable-recovery-ukraine>
6. United Nations Development Programme. (n.d.). *UNDP Ukraine*. Retrieved January 23, 2026, from <https://www.undp.org/ukraine>
7. Unicorn Capital. (2025, February). *Ukraine's recovery needs assessment 2025 (World Bank RDNA4): New priorities and the role of the private sector*. <https://www.unicorncapital.fund/2753/ukraines-recovery-needs-assessment-2025-world-bank-rdna4-new-priorities-and-the-role-of-the-private-sector/>
8. DREAM. (n.d.). *State single project pipeline*. Retrieved January 23, 2026, from [https://dream.gov.ua/en/spp-pipeline?filter\[reference\]=080825-0F5D1D82](https://dream.gov.ua/en/spp-pipeline?filter[reference]=080825-0F5D1D82)
9. International Organization for Standardization. (2014). *ISO 55000:2014. Asset management — Overview, principles and terminology*. <https://www.iso.org/standard/55088.html>
10. World Road Association (PIARC). (2020). *Road asset management manual*. <https://road-asset-management.piarc.org/>

Дорошко Євген Вікторович
к.т.н., доц., завідувач кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
ХНАДУ, Україна,
evgeniy.dorozhko@gmail.com

Саркісян Гор Саркісович
к.т.н., доц., доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
ХНАДУ, Україна,
gorsar14@gmail.com

Захарова Еліна Володимирівна
асистент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою
ХНАДУ, Україна,
linazaharova21@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ЦИФРОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ У ТОРОСАД: ФУНКЦІОНАЛ, МЕТОДИ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто сучасні підходи до цифрового проектування лінійних інженерних об'єктів із використанням програмного комплексу Торосад. Проаналізовано основні інструменти та алгоритми побудови трас, зокрема формування тангенціального ходу, застосування кругових і перехідних кривих, а також можливості параметричного редагування. Окрему увагу приділено збереженню трас у табличному вигляді та подальшому використанню цих даних для створення профілів, виконання розбивки та аналізу поверхні. Висвітлено практичне значення застосування Торосад у інженерно-геодезичних вишукуваннях і проектуванні інфраструктурних об'єктів. Показано, що використання сучасних цифрових технологій сприяє підвищенню точності, ефективності та надійності проектних рішень.

Ключові слова: Торосад, цифрове моделювання, траса, інженерно-геодезичні роботи, лінійні об'єкти, поздовжній профіль, поперечний профіль, 3D-моделювання, геометричні елементи, проектування доріг.

Проектування лінійних інженерних споруд, таких як автомобільні дороги, залізничні колії чи інженерні комунікації, базується на точному визначенні їх геометричних параметрів у плані та профілі. Сучасні програмні засоби значно спрощують ці процеси завдяки автоматизації та інтеграції інженерних розрахунків. Одним із ефективних рішень у цій сфері є програмний комплекс Торосад, який поєднує гнучкість налаштувань і потужний інструментарій.

Торосад забезпечує можливість створення трас різного рівня складності з подальшим параметричним редагуванням і використанням у численних інженерних задачах. Система підтримує побудову поздовжніх і поперечних профілів, аналіз рельєфу, а також формування тривимірних моделей об'єктів, що особливо важливо в умовах сучасного цифрового проектування.

Основною метою дослідження є узагальнення функціональних можливостей Торосад, аналіз алгоритмів побудови трас та оцінка їх практичного значення для інженерно-геодезичних робіт.

Геометричне моделювання траси в Торосад ґрунтується на використанні базових елементів: прямих відрізків, кругових кривих та перехідних кривих (клотоїд). Прямі ділянки задають основний напрямок, дуги забезпечують плавність поворотів, а клотоїди створюють поступовий перехід між різними типами кривизни, що підвищує безпеку та комфорт руху.

Процес створення траси включає кілька етапів. Спочатку формується тангенціальний хід шляхом задання ключових точок у графічному середовищі. Далі виконується автоматичне сполучення цих елементів із використанням заданих параметрів радіусів і довжин перехідних кривих. У результаті ламана лінія трансформується в оптимізовану трасу, що відповідає інженерним нормам.

Важливою перевагою Topocad є можливість гнучкого редагування вже створеної траси. Користувач може змінювати параметри кривизни, переміщувати вершини або задавати додаткові контрольні точки, не порушуючи загальної геометричної цілісності об'єкта. Це дозволяє швидко адаптувати проєкт до нових умов або уточнених даних.

Збереження траси у табличному форматі є ключовим етапом, що відкриває доступ до подальших інженерних операцій. Такий формат містить повний опис геометрії траси, включаючи довжини елементів, радіуси, кути та пікетаж. Це забезпечує можливість виконання точних розрахунків і використання даних у різних модулях системи.

На основі збереженої траси реалізуються додаткові функції. Зокрема, автоматична розбивка дозволяє створювати пікетажні точки з заданим кроком і виконувати підготовку до винесення проєкту в натуру. Інструменти контролю поверхні дають змогу порівнювати фактичний рельєф із проєктними даними, виявляючи відхилення та потенційні помилки.

Функції перетворення координат забезпечують взаємозв'язок між різними системами представлення даних, що є необхідним при геодезичних роботах і розрахунках. Крім того, Topocad дозволяє створювати поздовжні та поперечні профілі, що відображають зміну рельєфу та конструктивних елементів уздовж траси.

Особливо важливою є можливість формування тривимірної моделі траси. На основі плану та профілю створюється просторова полілінія, яка використовується для моделювання дорожнього коридору, обчислення об'ємів земляних робіт і візуалізації проєктних рішень.

Практичне значення використання Topocad полягає у значному підвищенні ефективності інженерних робіт. Автоматизація процесів зменшує ймовірність помилок, скорочує час виконання завдань і забезпечує високу точність результатів. Крім того, робота в єдиному програмному середовищі спрощує взаємодію між різними етапами проєктування.

Отже, Topocad є потужним інструментом для цифрового моделювання лінійних інженерних об'єктів. Його функціональні можливості охоплюють повний цикл робіт — від побудови геометрії траси до створення комплексної тривимірної моделі. Використання цього програмного забезпечення сприяє підвищенню якості інженерно-геодезичних вишукувань і забезпечує надійність проєктних рішень у сфері інфраструктурного будівництва.

Література

1. Adtollo AB. Topocad Geometry Tools and Road Module Overview. Stockholm, 2021.
2. Andersson F., Lilje M. Topocad User Manual. Adtollo AB, Sweden, 2020.
3. Lilje M. Introduction to Topocad: Design, Mapping and GIS Tools. Adtollo AB, 2019.
4. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина I. Проєктування. Частина II. Будівництво. Київ: Мінрегіонбуд України, 2015.
5. ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012. Настанова з проєктування автомобільних доріг загального користування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2012.
6. Кучер О. А. Цифрова модель рельєфу: основи побудови та використання. Львів: Видавництво ЛНУ, 2016.
7. Лисенко В. А., Трофименко Г. М. Картографічне моделювання та геоінформаційні технології. Харків: ХНУ, 2018.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВИХ НАПРЯМКІВ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ДЕФІЦИТУ ОРГАНІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ЗАВДЯКИ ВИКОРИСТАННЮ АРОМАТИЧНИХ ВУГЛЕВОДНІВ

Анотація. У статті розглядається один з можливих напрямків вирішення проблеми дефіциту органічних в'язучих, які є невід'ємним компонентом асфальтобетонних сумішей, завдяки використанню ароматичних вуглеводнів. Сумісне окислення нафтового гудрону та кислій коксохімічної смолки може дозволити збільшити кількість дорожнього бітуму з регульованими властивостями, а також знизити негативний вплив відходів на екологічну обстановку в районі автомобільних доріг.

Ключові слова: дорожній бітум; нафтовий гудрон; кисла коксохімічна смолка; окислення; безпека.

На території України 77,1 % автомобільних доріг мають асфальтобетонне покриття. І тому на сучасному етапі відновлення та розвитку інфраструктури автомобільних доріг України важливим аспектом є отримання органічних в'язучих. Якщо мінеральні складові асфальтобетонних сумішей видобуваються у 20 областях України, що дозволяє забезпечити таке виробництво у необмеженому обсязі, то видобуток нафти в Україні має значні обмеження, а відповідно і виробництво бітуму теж значно обмежене та не задовольняє споживчих потреб дорожнього будівництва. За останні тридцять років, відколи Україна здобула свою незалежність, значно загострилась проблема дефіциту органічних дорожньо-будівельних в'язучих.

Та не тільки цим обмежуються проблеми з органічними в'язучими дорожній галузі. Одним з актуальних питань у дорожньому будівництві є визначення гарантованих термінів служби асфальтобетонних покриттів. Для прогнозування довговічності асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг необхідно знати інтенсивність зчеплення бітумів з поверхнею мінеральних матеріалів. У свою чергу цей показник зчеплення залежить від хімічних сполук, які входять до складу органічних в'язучих та забезпечують високі показники адгезії, але у свою чергу властивості таких сполук залежать від технологічного процесу отримання цих в'язучих. Попередні дослідження у цьому напрямку довели, що властивості бітуму, що відповідають за зчеплення, залежать від способів та методів їх виробництва.

При влаштуванні асфальтобетонного покриття автомобільних доріг необхідно керуватися нормативними вимогами. Ці нормативні вимоги до асфальтобетону, тобто ДСТУ Б В.2.7-119:2011 [1], в цьому процесі в першу чергу повинні бути основною опорною платформою. Тому необхідно мати на увазі, що при виробництві органічних в'язучих головними та принциповими завданнями є забезпечення: якомога кращого показника зчеплення з мінеральною поверхнею; довговічності, що обумовлена стабільністю фізико-хімічних показників; екологічності, яка обумовлена відсутністю шкідливих канцерогенних сполук. Всі ці завдання повинні вирішуватись на стадії науково-технологічного процесу.

Для вирішення цього дослідницького завдання було проведено пошукові випробування та лабораторний експеримент. Перед сумісним окислення нафтового гудрону з смолкою виконувались підготовчі роботи. Для цього перевірялась можливість присутності води в обох компонентах, яка показала її велику кількість, а це спричиняє дуже інтенсивне спінювання обох компонентів. Для уникнення спінювання обидва компоненти окремо нагрівались до температури, що знаходилась в межах від 103 °С до 105 °С. Оскільки такий діапазон тримати було складно, то максимальна допустима межа не перевищувала 110 °С. Цей процес тривав до повного зникнення спінювання та утворення дзеркальної поверхні на обох компонентах.

Для експериментального дослідження було використано лабораторну окислювальну колону. Заповнена експериментальною сумішшю окислювальна колона нагрівалась до

температури 200 °С і крізь нагріту рідину за допомогою ввідного патрубку та розподільвача пропускатись повітря фіксованої кількості. Контроль кількості повітря, яке проходило крізь рідину, відбувався за допомогою лічильника. За допомогою контролю температури, кількості повітря та часу окислювального процесу відбувалось прогнозування отримання бітуму з завданими властивостями. Відбір пробних зразків відбувався у запланований час без зупинки процесу окислення.

Відібрані зразки проб бітуму випробовувались до відповідності нормативним вимогам ДСТУ 4044:2019 [2] та ДСТУ 4148:2003 [3]. Особлива увага приділялась зчеплення з мінеральною поверхнею за ДСТУ 9169:2021 [4]. За результатами лабораторних випробувань (табл. 1) робились висновки щодо доцільності їх використання у будівництві автомобільних доріг або загальному будівництві.

Таблиця 1 Показники властивостей в'язучого після окислення

Назва показника	Гудрону після:			Гудрону (95 %) + смолки (5 %) 1 година	ДСТУ 4044:2019 для марки БНД 100/150	ДСТУ 4148:2003 для марки БНБ 90/10
	4 годин	6 годин	8 годин			
Глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, 0,1 мм	19	14	9	147	101÷150	5÷20
Температура розм'якшеності, °С	87,5	99,7	106,3	41,2	41÷47	90÷105
Температура крихкості, °С	-	-	-	-18	не вище -16	-
Розтяжність (дуктильність) за температури 25 °С, см	1,8	1,5	1,2	73	більше 70	більше 1
Зчеплюваність з мінеральною поверхнею, %	-	-	-	28	більше 16	-
Температура спалаху у відкритому тиглі, °С	260	265	265	240	більше 230	більше 250
Розчинність в органічному розчиннику, %	99,8	99,8	99,8	99,8	більше 99,0	більше 99,5

Окрім окислення виконувались експериментальні роботи з компаундування нафтового гудрону з різною відсотковою кількістю смолки для визначення її впливу на ступінь екологічної забрудненості. Аспектами екологічної небезпечності займались відповідні фахівці. А також вивчався досвід окислення нафтових продуктів фахівців Львівської політехніки [5-7].

Як нафтову сировину для проведення досліджень використовували вакуумний залишок (гудрон), отриманий у процесі вакуумної перегонки нафти Монастирищенсько-Софіївського нафтогазоносного району. Вакуумний залишок утворювався при кінцевій температурі перегонки 515÷546 °С (в перерахунку на атмосферний тиск), що відповідає умовам одержання важких нафтових залишків, придатних для подальшого окиснення з метою виробництва дорожніх бітумів. Вихід гудрону за таких умов становив 13-25 % мас. і залежав від кінцевої температури кипіння вихідної нафти. Гудрон характеризувався підвищеною густиною та в'язкістю, що є типовим для важких нафтових залишків. Густина гудрону при 20 °С становила 0,965 г/см³, а кінематична в'язкість при 100 °С — 13-25 сСт, що свідчить про значний вміст високомолекулярних компонентів та його придатність до структуроутворення в процесі окиснення.

Загалом, фізико-хімічні та реологічні характеристики вакуумного залишку відповідають вимогам до сировини, що використовується для окиснювального отримання нафтових бітумів і створюють передумови для дослідження впливу кислої вуглекислотної смолки на процес сумісного окиснення та регулювання властивостей отриманих бітумних в'язучих, які можуть використовуватись, як в дорожньому, так і в загальному будівництві.

У дослідженні як модифікуючий компонент використовували кислоту смолку сульфатного відділення коксохімічного виробництва, яка утворюється як побічний продукт під час

уловлювання аміаку з коксового газу за допомогою сірчаної кислоти. Формування кислій смолки є результатом одночасного перебігу декількох процесів, зокрема полімеризації ненасичених сполук коксового газу під дією сірчаної кислоти та конденсації кам'яновугільної смоли з газової фази у розчині. За своєю природою кисла смолка є складною багатокомпонентною системою, що являє собою суміш продуктів полімеризації ненасичених вуглеводнів і компонентів кам'яновугільної смоли. Вона характеризується високою густиною, значною в'язкістю та підвищеною температурою розм'якшення, що зумовлює її потенційну придатність до використання у складі важких нафтових в'язучих.

Основні фізико-хімічні показники досліджуваної кислій смолки, такі як густина смолки, що становила 1,21-1,22 г/см³, та істотно перевищувала густину нафтових залишків, свідчить про високу концентрацію ароматичних та смолистих структур. В'язкість за Редвудом (10/50 с) перебувала у межах 30-40, що підтверджує високу текучо-пластичну природу матеріалу при підвищених температурах. Вміст розчинної частини у смолці становив 40-45 %, при цьому масова частка вільної кислоти в розчині дорівнювала 1,2-1,5 %, а вміст сульфату амонію — 40-45 %. Значна кількість неорганічних компонентів та кислотних груп обумовлює підвищену хімічну активність смолки і може суттєво впливати на перебіг процесів окиснення при її сумісному використанні з нафтовими залишками. Вміст речовин, нерозчинних у толуолі, становив 15-30 %, що свідчить про наявність високомолекулярних конденсованих структур, здатних брати участь у формуванні асфальтенових агрегатів.

Фракційний склад кислій смолки характеризується значною часткою висококиплячих компонентів. Частка фракцій, що відганяються до 200 °С, становить лише 1-2 %, тоді як у діапазоні 200-230 °С відганяється 10-15 %, у межах 230-300 °С — 12-16 %, а в інтервалі 300-360 °С — 17-25 %. Основну частину смолки складають компоненти з температурою кипіння вище 300 °С, частка яких досягає 50-55 %. Такий фракційний склад свідчить про переважання важких високомолекулярних сполук ароматичного та смолистого характеру.

Загалом, у якості висновку можна констатувати, що поєднання високої густини, значного вмісту важких фракцій, кислотних компонентів та ароматично-смолистої природи робить кислу вуглехімічну смолку перспективним компонентом для використання у процесах сумісного окиснення з нафтовим вакуумним залишком. Її введення може впливати як на кінетику окиснення, так і на структуроутворення бітумних в'язучих, що обґрунтовує доцільність подальшого дослідження таких систем. Також такі системи дозволяють досягнути значного зменшення вмісту поліциклічних аренів після окиснення та підвищити потенціал екологічно безпечної утилізації смолки через включення до бітумів завдяки їх сумісному окисненню.

Література

1. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови: ДСТУ Б В. 2.7-119:2011 – [Чинний від 2012-10-01]. – К. : ДП «Укр. НДНЦ», 2012 – 38 с. – (Національний стандарт України).
2. Національний стандарт України ДСТУ 4044:2019 Бітуми дорожні в'язкі нафтові. Технічні умови (National Standart Ukraine DSTU 4044:2019 Viscous petroleum road bitumens. Specifications).
3. Національний стандарт України ДСТУ 4148-2003 Бітуми нафтові будівельні. Технічні умови (National Standart Ukraine DSTU 4044:2019 Petroleum bitumens for construction. Specifications).
4. DSTU 9169:2021. Bitum ta bitumni v"yazhuchi. Vyznachennya zcheplyvanosti z mineral'nym materialom.
5. Grynshyn O. B., Khlibyshyn Yu. Ya., Nagurskyu A. O., Nagurskyu O. A. (2015). Methods of Obtaining Bitumen from Heavy Oil Processing Residues. Techn. Audit i Rezervy Proizvod, 5(4), 45–48. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51054>
6. Khlibyshyn Yu. Ya., Pochapska I. Ya., Grynshyn O. B., Gnativ Z. Ya. (2018). The study of the fabrication of bitumen from acid tars and oil residues. Питання хімії та хімічної технології, 5 (120), 161–167.
7. Хлібишин Ю. Я., Одержання нафтових бітумів окисненням гудрону із суміші східноукраїнських нафт / Ю. Я. Хлібишин, О. Б. Гринишин, І. Я. Почапська, К. Пєтровська / Chemistry, Technology and Application of Substances, Vol. 6, No. 2, 2023. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.02.049>

Орест Поліщук

*аспірант кафедри автомобільних доріг основ та фундаментів,
Національний університет водного господарства та природокористування, Україна
e-mail: o.m.polischuk@nuwm.edu.ua , тел. +380961671191*

Юрій Зятюк

*к.т.н, доцент кафедри автомобільних доріг основ та фундаментів,
Національний університет водного господарства та природокористування, Україна
e-mail: y.y.ziatiuk@nuwm.edu.ua , тел. +380979121983*

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ФІБРОБЕТОНІВ ДЛЯ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ТА АЕРОДРОМІВ

Анотація. У статті представлено результати дослідження міцності комбінованого фібробетону для жорстких дорожніх покриттів, зокрема проаналізовано вплив поєднання різних типів волокон на формування його механічних і експлуатаційних властивостей. Встановлено, що таке армування підвищує довговічність матеріалу в умовах агресивних середовищ, що підтверджує доцільність його використання в дорожніх та аеродромних конструкціях із підвищеними вимогами до надійності.

Ключові слова: фібра, бетон, фібробетон, міцність, довговічність, комбіноване армування.

Підвищення довговічності фібробетонів для дорожніх покриттів та аеродромів набуває особливої актуальності в умовах необхідності забезпечення безперервної експлуатації транспортної інфраструктури під час бойових дій в Україні та її подальшого відновлення після завершення воєнного стану. Інтенсивні навантаження, динамічні впливи та агресивні фактори середовища вимагають застосування матеріалів із підвищеними експлуатаційними характеристиками [1]. Використання дисперсного армування фібрами різного типу дозволяє суттєво покращити тріщиностійкість, ударну в'язкість і стійкість до втомного руйнування цементобетонів [2, 3, 4]. Поліпропіленова фібра ефективно знижує усадкове тріщиноутворення та забезпечує стабільність структури на ранніх стадіях тверднення. Сталева фібра сприяє підвищенню несучої здатності та роботі матеріалу під дією значних експлуатаційних навантажень. Скляна та базальтова фібри підвищують корозійну стійкість і довговічність у складних експлуатаційних умовах, зокрема при впливі агресивних середовищ. Комплексне застосування різних типів фібри забезпечує синергетичний ефект, що є особливо важливим при реконструкції пошкоджених покриттів і споруд. Таким чином, дослідження довговічності фібробетонів із урахуванням сучасних викликів є важливим напрямом підвищення надійності та стійкості дорожньої й аеродромної інфраструктури України [5].

Важливу роль у формуванні стійкості бетону відіграє також вибір в'язучого. Оскільки цемент є основним компонентом бетонів, його мінералогічний склад, активність і здатність протистояти корозійним процесам значною мірою визначають загальну довговічність матеріалу. Додатково суттєвий вплив має використання вискоєфективних хімічних і мінеральних добавок, які забезпечують зниження водоцементного відношення, підвищення щільності цементного каменю та покращення його мікроструктури [6]. Комплексне поєднання оптимально підібраного в'язучого, дисперсного армування та сучасних добавок дозволяє цілеспрямовано формувати структуру бетону з підвищеною стійкістю до дії агресивних середовищ і тривалих експлуатаційних навантажень [10].

Дослідження властивостей комбінованого фібробетону та його впливу на довговічність жорстких дорожніх покриттів є актуальним напрямом дорожньої науки, що сприяє підвищенню ефективності використання матеріалів і надійності конструкцій. Це також дає змогу зменшити витрати на ремонт і обслуговування доріг та забезпечити стабільне функціонування транспортної мережі [7, 8, 9].

Для приготування фібробетонних сумішей використовувався товарний портландцемент ПЦ І-500 та ПЦ ІІ-А/Ш-500 (СЕМ І 42,5, СЕМ ІІ/А-S 42,5DIN 11641, EN-196) виробництва ПАТ «Волинь-цемент» (м. Здолбунів), пісок із родовищ Славутського району Хмельницької

області та гранульований гранітний щебінь фракції 5–10 мм Вирівського кар'єру Рівненської області.

Дослідження включало контрольний склад без фібри, бетон із поліпропіленою фіброю МістоАрт довжиною 20 мм, а також суміші зі сталеву анкерною фіброю «СТАЛЬканат Силур» (довжина 50 мм, діаметр 0,9 мм). Було проаналізовано вплив різних типів фібри на властивості бетонних композицій. Всі контрольні куби виготовлялися з бетону класу С20/25 зі складом Ц:Щ:П = 1:3,72:2,30 при водоцементному співвідношенні В/Ц = 0,35. За результатами випробувань, середня міцність на стиск становила $R_{st} = 51$ МПа, а коефіцієнт варіації – $C_v = 12,3\%$. Вміст повітря у суміші, необхідний для забезпечення морозостійкості марки F200, становив 5%.

Бетонування кубів і призм виконували у заздалегідь підготовленій металевій інвентарній опалубці, наявній у лабораторії. Методика оцінювання корозійної стійкості фібробетону передбачала випробування кубічних зразків розміром $10 \times 10 \times 10$ мм із визначенням зміни міцності на стиск після 28 діб тверднення в нормальних умовах та подальшої експозиції 6 і 12 місяців в агресивних середовищах.

Дослідження виконували в умовах, що імітують різні типи корозії: кисле ($pH=3$), лужне ($pH=13$) середовища та слабкисле ($pH=5$) та нейтральне ($pH=7$). На основі результатів випробувань на стиск, отриманих для зразків у воді та агресивних середовищах, що моделюють різні типи корозії побудували графіки.



Рис. 1. Випробування зразків після дії агресивних впливів (2 – серія)

Встановлено, що модифікація цементного композиту шляхом введення поліпропіленої фібри сприяє підвищенню його міцності на стиск. Досліджені склади у проектному віці забезпечували зростання класу бетону на один рівень порівняно з контрольним. Приріст міцності становив у середньому 5–7 % у віці 7 діб та 10–14 % у віці 28 діб, що обумовлено зниженням інтенсивності мікротріщиноутворення, редукцією капілярної пористості та формуванням більш щільної мікроструктури цементного каменю.

Застосування комбінованого дисперсного армування (сталеву та поліпропіленої фібри) забезпечує більш інтенсивне зростання міцнісних характеристик — у межах 12–26 % відносно контрольного складу. Такий ефект пояснюється синергетичною взаємодією волокон: сталеву фібра підвищує тріщиностійкість і несучу здатність, тоді як поліпропіленува інгібує ініціацію та розвиток мікродфектів. Додаткове використання скляної та базальтової фібри сприяє підвищенню корозійної стійкості та довготривалої стабільності властивостей композиту.

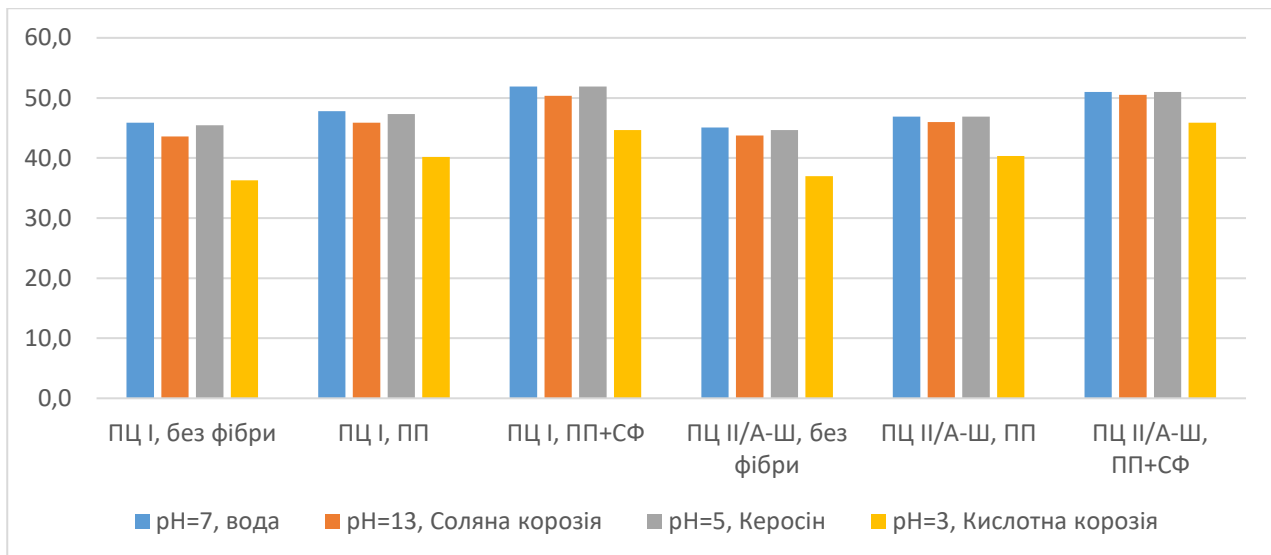


Рис. 2. Міцність на стиск бетонів різних складів під дією різних агресивних впливів після 12 місяців витримки, МПа (2 – серія)

Результати експериментальних досліджень у різних експлуатаційних середовищах свідчать, що ефективність дисперсного армування безпосередньо впливає на підвищення довговічності матеріалу залежно від умов впливу. У водному середовищі комбіноване використання фібр забезпечує кращі показники збереження властивостей бетону порівняно з однотипним армуванням. У кислому середовищі різниця між типами фібри зменшується до 6–12 %, що вказує на їхню достатню хімічну стійкість і здатність забезпечувати стабільність матеріалу. Зростання довговічності фібробетону обумовлене стримуванням розвитку тріщин, зниженням водопоглинання та відкритої пористості. Водночас встановлено, що максимальний ефект досягається за оптимального вмісту фібри, особливо при комбінованому застосуванні поліпропіленових і сталевих волокон.

Література

1. Бану С.В., Седов А.В. Причини раннього ушкодження бетонних і залізобетонних мостів. Секція «Будівництво та експлуатація автомобільних доріг» Збірник наукових праць 86-ї міжнародної наукової конференції студентів університету (9-10 квітня 2024 року)/ ХНАДУ. Харків, 2024. – С. 21-24.
2. Гедулян Д. Ю. Фібробетони підвищеної довговічності для дорожніх одягів та аеродромних покриттів : дис. ... д-ра філос. : 192 / Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури. Одеса, 2025. 195 с.
3. Дворкін Л.Й. Стійкість бетону до температурно-вологісних впливів: навчальний посібник.-Київ: Каравела, 2023. 180с.
4. Кривяков С. О., Шестакова Л. Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів з базальтовою фіброю та повітрявтягуючою добавкою. Дороги і мости. 2023. Вип. 28. С. 144-158. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>.
5. Толмачов С.М., Токар А.А. Матеріали та технології для будівництва, ремонту та відновлення бетонних покриттів. Органічні і мінеральні в'язучі та дорожні бетони на їх основі: збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, 8 - 9 листопада 2022 р., м. Харків. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2022 160-164 с.
6. Dvorkin, L.; Konkol, J.; Marchuk, V.; Huts, A. Efficient, Fine-Grained Fly Ash Concrete Based on Metal and Basalt Fibers. *Materials* 2023, 16, 3969. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16113969>
7. Deng Q., Zhang R., Liu C., Duan Z., Xiao J. Influence of fiber properties on abrasion resistance of recycled aggregate concrete: Length, volume fraction, and types of fibers. *Construction and Building Materials*, 2023, 362, 129750. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129750>.
8. Yao D., Li J., Xiao H., Yang W., Liu R. Research on the surface abrasion resistance performance of basalt fiber reinforced concrete. *Journal of Building Engineering*, 2024, 88, 109125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109125>.
9. Polishchuk, O., Ziatyuk, Y., Fursovysh, M., Supruniuk, V., Romaniuk, V., 2025. Combined Reinforcement as a Means of Increasing the Durability of Rigid Pavement. *MSF 1170*, 75–79. URL: <https://doi.org/10.4028/p-bqtxa8>
10. Naaman A.E. Fiber reinforced concrete: A state of the art. – Detroit: HPRCC Workshop, 2003. – 64 p. URL: <http://www.personal.umich.edu/~naaman/downloads/FRC-State-of-the-Art.pdf> (дата звернення: 12.02.2026).

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛАКІВ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА УКРІПЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ
ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

Анотація. У статті наведено інформацію щодо використання шлаків в дорожньому будівництві. За своїми характеристиками (хімічний, мінералогічний склад, морозостійкість) шлаки є цінною сировиною для приготування щєбєневих матеріалів та мінеральних в'язучих, на основі яких виготовляють цементно- та асфальтобетонні суміші для влаштування дорожніх покриттів. Головним фактором, що визначає властивості шлаку є його структура, яка залежить від хімічного складу шлаку і режиму охолодження.

Ключові слова: електросталеплавильний шлак, міцність, активація, дорожній одяг.

Узагальнені дані, які опубліковані в науково-технічній літературі, показали, що систематичних досліджень основних електросталеплавильних шлаків практично відсутні [1, 2]. Певний вплив на якісне та кількісне фазове співвідношення у цих шлаках надає спосіб охолодження (повітряний або водний). Застосування водного охолодження вносить певні зміни фазовий склад шлаків.

З цією метою більшість електросталеплавильних негранульованих відвальних шлаків стала охолоджуватися водою, тому детально досліджувався фазовий склад шлаків водного охолодження свіжого виходу і пролежав у відвалах протягом 3-4 років.

В доменних шлаках кристалічна частина представлена більш як двадцятьма мінералами. Електросталеплавильні шлаки мають щільну мікропорфірову структуру і складаються, в основному, із силікатів з додатками інших мінералів (табл. 1) [1].

Таблиця 1. Хімічний склад електросталеплавильного шлаку

Назва матеріалу	Хімічний склад, %							Модуль основності, M_o
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	S	
Електросталеплавильний шлак – щільний дрібнозернистий сірого кольору	28,3	12,0	31,0	9,0	5,6	13,4	0,7	1,1

В цілому, за хімічним складом електросталеплавильний шлак близький до природних ефузивних кам'яних матеріалів типу базальту. Фізико-механічні характеристики електросталеплавильного шлакового щєбню наведено в табл. 2 [1].

Для порівняння паралельно проводились дослідження гранітного щєбню. Аналізуючи дані, наведені в табл. 2, можна стверджувати, що фізико-механічні характеристики (міцність, дробильність, водопоглинання) у шлакового щєбню вище, ніж у гранітного і відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-74-98, тобто цей матеріал може бути використаний для влаштування шарів покриття та основи дорожніх одягів.

На підставі аналізу досліджень запропоновані способи застосування шлаку водного охолодження під час будівництва укріплених основ автомобільних доріг [3].

Щєбєневі суміші з активних та високоактивних шлаків фракції 0–70(120) мм оптимального зернового складу використовують при влаштуванні верхніх та нижніх шарів основ доріг I–V категорій. Щєбєневі суміші з малоактивних шлаків активізують CaCl₂, Na₂CO₃, CaSO₄ [4].

Таблиця 2. Фізико-механічні характеристики електросталеплавильного шлакового щебню

Найменування показників	Щебінь шлаковий електросталеплавильний	Щебінь гранітний
Дійсна густина, г/см ³	3,45	4,2
Середня густина, г/см ³	3,84	4,35
Насипна густина, кг/м ³	1800,0	1850,0
Пористість, %	5,4	7,5
Водопоглинання, %	2,1	3,4
Марка за морозостійкістю	Висока F 150	Висока F 150
Марка за дробильністю	M 1200	M 1000
Твердість за десятибальною шкалою, бали	6-7	-
Марка за стираністю	Висока СТ-1	Висока СТ-1
Міцність при стисканні у циліндрі, МПа	7,4	5,4
Вміст зерен пластинчастої (лещадної) та голчастої форми	Кубовидна група, 12	Кубовидна група, 15
Вміст глини в грудках	-	-

Роль основного в'язучого в шлакових щебневих сумішах грають шлакові пісок та борошно. На початковій стадії експлуатації дороги основа з активного шлаку працює як матеріал, що несе здатність якого забезпечується щільністю скелета та заклинанням щебневих фракцій. Такі основи не дають присадок та мають підвищений модуль пружності 300-400 МПа. У процесі експлуатації вони перетворюються на монолітну стійку плиту. Модуль пружності напівжорстких основ збільшується до 1200 МПа.

У роботі досліджено кінетика зростання міцності шлаковапняного каменю при різному вмісті активатора із застосуванням рівняння теорії перенесення, що містить початкову швидкість процесу, коефіцієнт гальмування та коефіцієнт кореляції, що залежать від вмісту вапна в системі [5].

Як видно з рис. 1 додавання вапна значно збільшує швидкість твердіння та механічну міцність шлаковапняного каменю.

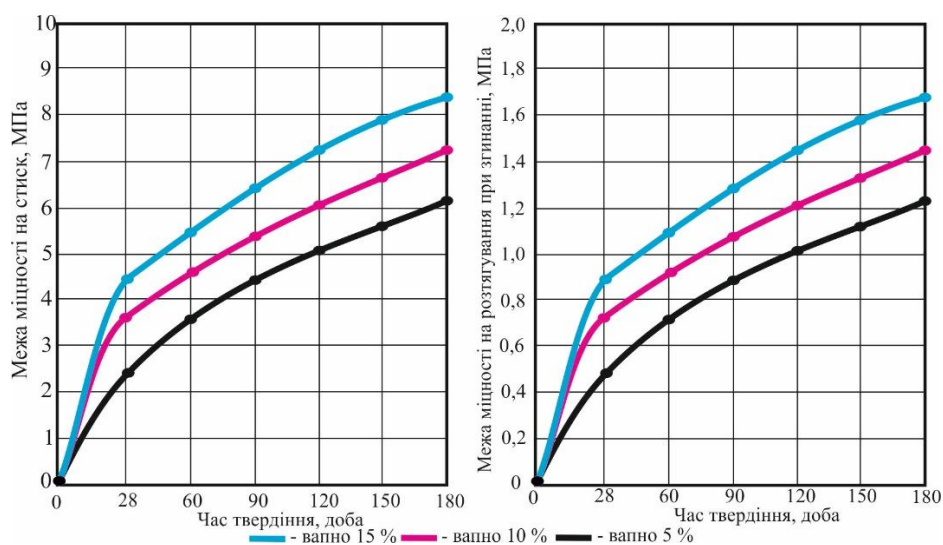


Рис. 1. Вплив вмісту активатора на: межу міцності шлаковапняної суміші

Збільшення дозування вапна від 5 % до 15 % підвищує її активуючу дію. Примітно те, що при додаванні 5 % вапна камінь зі шлаку досягає нормативних значень. При введенні 15 %

вапна міцність майже в два перевищує нормативну величину для в'язучих з малою активністю і наближається до вимог для в'язучих з високою активністю. Аналіз експериментальних даних та кінетичних констант (рис. 1), отриманих при застосуванні рівняння теорії перенесення, дозволив зробити такі висновки [3]:

– при введенні вапна у кількості від нуля до десяти відсотків початкова швидкість твердіння шлаковапняного в'язучого зростає практично лінійно. При подальшому збільшенні дозування вапна до 15 % початкова швидкість стабілізується на одному рівні і не зростає.

З цього випливає практичний висновок, що дозування вапна 10 % є оптимальним дозуванням, що забезпечує найбільшу міцність як при стисканні, так і при згині в початкові терміни твердіння;

– коефіцієнт гальмування при введенні вапна в кількості від нуля до десяти відсотків досить різко падає при випробуванні на стиск від $0,608 \text{ МПа}^{-1}$ до $0,225 \text{ МПа}^{-1}$, а при випробуванні на вигин – від 5 МПа^{-1} до $1,1 \text{ МПа}^{-1}$, звідси слідує, що міцність шлаковапнякового каменю зростає зі зростанням дозування вапна до п'ятнадцяти і більше відсотків;

– коефіцієнт кореляції плавно зростає при зміні дозування вапна від 0 % до 10 %. При подальшому збільшенні вапна у складі шлаковапняного каменю від 10 % до 15 %, зростання коефіцієнта кореляції незначне.

З цих даних випливає практичний висновок, що оптимальний вміст вапна становить 10 % [6]. Активність шлаковапнякового в'язучого при оптимальному вмісті вапна 10 % через 90 діб гідравлічного твердіння становила $5,2 \text{ МПа}$. Таким чином, при активації шлаку відвальним вапном у 90-добовому віці отримано в'язуче марки 50, яке може бути використане для обробки основ основи автомобільних доріг.

У дорожньому будівництві велика увага має бути приділена забезпеченню морозостійкості одержаних матеріалів, тому було проаналізовано дослідження з вивчення морозостійкості дрібнозернистих бетонів на основі сталеплавильного шлаку. Аналіз отриманих даних показав, що через 90 діб гідравлічного твердіння композити, піддані встановленої кількості циклів попереминого заморожування та розморожування (25 циклів), мають однаковий характер зміни морозостійкості на всіх видах заповнювача. Встановлено, що зниження міцності на стиск дрібнозернистих бетонів на основі шлаку склало 19 % на заповнювачі з кварцитопісковика та граніту, на вапняковому заповнювачі цей показник становив 21 %. Таким чином, отримані дрібнозерністі бетони на основі шлаку, за морозостійкістю належать до марки F25, що дозволяє застосовувати їх для будівництва основ автомобільних доріг в районах із середньомісячною температурою повітря найбільш холодного місяця від мінус $3 \text{ }^\circ\text{C}$ до мінус $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Література

1. Andriy Belyatynsky, Kateryna Krayushkina Use of non-utilizing slag of different manufactures in road building. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*. Kyiv, 2010. 12. P. 24-30 [in Ukrainian]
2. Крюковська Л. І., Скорченко В. Ф. Методи дослідження технічних характеристик шлаків для дорожнього будівництва. Праці міжнародної науково-технічної конференції «Екологія промислових підприємств. Проблема утилізації відходів» (13-17 вересня 2004 р., м. Ялта). Київ, 2004. 116 с.
3. ДСТУ 9043:2020 Матеріали щєбеневі зі шлаків металургійних для дорожнього будівництва. Технічні умови. Київ, 2020. 26 с. (Інформація та документація).
4. Forteza R., Far M., Segui C., Cerdá V. Characterization of bottom ash in municipal solid waste incinerators for its use in road base. *Waste Management*. 2004. Vol. 24 (9). P. 899-909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.07.004> (дата звернення: 27.07.2025).
5. Susanna Olssona, Erik Kärrmanb and Jon Petter Gustafssona, Environmental systems analysis of the use of bottom ash from incineration of municipal waste for road construction. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 48, Iss. 1. 2006. P. 26-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.11.004> (дата звернення: 27.07.2025).
6. Rashad A.M., Sadek D.M., Hassan, H.A. An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*. 2016, 112. P. 1086-1096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.127> (дата звернення: 27.07.2025).

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ЗА ГБН В.2.3-37641918-559:2019 ТА В'ЯЗКО-ПРУЖНОЇ 3D-МОДЕЛІ

На мережі автомобільних доріг України в останні роки помітно зросла частка багатотоннажних транспортних засобів, і разом з нею — вимоги до надійності конструкцій нежорсткого дорожнього одягу. Проектування дорожніх одягів в Україні ведеться за ГБН В.2.3-37641918-559 [1], де матеріали шарів описуються як лінійно-пружні. Ця методика добре відпрацьована на практиці, але має відоме обмеження: пружна модель не враховує того, що асфальтобетон під багаторазовим навантаженням поводить себе як в'язко-пружне тіло і поступово накопичує залишкові деформації. Саме ці деформації з часом утворюють колію — одну з типових причин передчасного ремонту на дорогах високих категорій. У роботі [4] було запропоновано тривимірну в'язко-пружну модель, яка дає змогу розрахувати цей процес.

Порівняємо обидва підходи: нормативний (пружний) та дослідницький (в'язко-пружний).

За [1] міцність дорожнього одягу перевіряється за трьома критеріями: допустимий пружний прогин, зсувостійкість у незв'язних шарах та ґрунті, опір монолітних шарів розтягу при згині. Розрахункова схема — шарувата пружна основа під круговим штампом діаметром D (пляма контакту колеса). Загальний модуль пружності пакета рахується ітеративно від нижнього шару до верхнього, з використанням табличних номограм або їх апроксимацій [1]. На виході — три коефіцієнти міцності, які мають перевищувати мінімально допустимі значення для відповідної категорії дороги та рівня надійності [2, 3]. Метод простий, швидкий і повністю узгоджений з чинними нормами, тому саме ним користується більшість проектних організацій. Але є суттєве спрощення: для кожного матеріалу задається одна характеристика — модуль пружності (різний для трьох перевірок: при 10 °С, 30 °С та 0 °С відповідно). Час дії навантаження і реальна історія температурних впливів при цьому не враховуються.

У роботі [4] асфальтобетон розглядається вже не як пружне, а як в'язко-пружне тіло. Фізичною основою є узагальнена модель Максвелла з двома ланками плюс окремих в'язкий елемент, що відповідає за накопичення залишкових деформацій. Кожен асфальтобетонний шар описується не одним модулем пружності, а п'ятьма параметрами: жорсткості G_1 , G_2 та в'язкості η_1 , η_2 двох ланок Максвелла, в'язкість залишкових деформацій η_3 , а також коефіцієнт Пуассона μ . Девіатори напружень і деформацій зв'язуються диференціальними рівняннями, розв'язок яких при одноосному навантаженні зводиться до суми експонент з часами релаксації $\tau_n = \eta_n/G_n$ [4]. На практиці розрахунок проводиться в програмному комплексі ANSYS [5] методом скінченних елементів на тривимірній сітці; для підготовки вхідних файлів розроблено спеціальний генератор APDL-кодів. Головне, що дає такий підхід і чого не може пружна модель — прогноз глибини колії. Задавши інтенсивність руху N_p і термін експлуатації T_n , можна оцінити накопичену залишкову деформацію після $N_n = N_p \cdot T_n$ циклів навантаження. Крім того, у [4] запропоновано інтегральний критерій міцності, який об'єднує перевірки на розтяг, стиск і зсув в одній граничній поверхні — тобто замінює три окремі перевірки однією.

Основні відмінності між розглянутими методами зведено у таблиці 1.

З таблиці видно, що різниця між методами — не в «точності» як такої, а в тому, які задачі кожен з них вирішує. Нормативний метод дає відповідь на питання «чи пройде конструкція три обов'язкові перевірки», і для цього йому достатньо стандартних лабораторних даних та хвилини обчислень.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика методів розрахунку нежорсткого дорожнього одягу

Ознака	Нормативний метод за [1]	В'язко-пружна 3D-модель за [4]
Фізична модель матеріалу	Лінійно-пружна	Лінійна в'язко-пружна (узагальнена Максвелла)
Параметри асфальтобетону	$E_{пр}, E_{зс}, E_{зг}, \mu$	$G_1, G_2, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \mu$
Розрахункова схема	2D, шарувата основа з круговим штампом	3D, скінченно-елементна сітка
Урахування часу	Опосередковано через температурні модулі	Безпосередньо, інтегрування у часі
Урахування циклічності	Через ΣN_p у формулі прогину	Числове моделювання $N_{ц} = N_p \cdot T_{н}$ циклів
Перевірки міцності	Прогин, зсув, згин (3 критерії)	Інтегральний критерій + прогноз колії
Обчислювальна складність	Низька, секунди	Висока, години-доби на ANSYS
Вхідні дані з лабораторії	Стандартні випробування за [3]	Криві повзучості при кількох температурах
Нормативний статус в Україні	Чинний, обов'язковий [1]	Дослідницький [4]

В'язко-пружна модель відповідає на інше питання: «що буде з покриттям через 5, 10 та 15 років циклічного навантаження», але вимагає для цього випробувань на повзучість при кількох температурах [4], ліцензійного ANSYS [5] і помітних обчислювальних ресурсів. Тобто ці методи не конкурують, а працюють на різних рівнях деталізації.

Варто окремо зазначити: в'язко-пружна модель сама по собі не замінює перевірок за [1, 2] – вона не дає коефіцієнтів міцності у тому вигляді, якого вимагає норматив. Її доцільно використовувати як додатковий інструмент там, де стандартних перевірок недостатньо. Типовий приклад – ділянки з інтенсивним гальмуванням (під'їзди до перехресть, зупинки транспорту, підйоми), де асфальтобетон працює при підвищених дотичних напруженнях і колія з'являється раніше, ніж прогнозує пружна модель. Для звичайних доріг III-V категорій 3D-моделювання, очевидно, надлишкове. Але для магістралей Ia-II категорій, особливо з високою часткою вантажного руху, такий аналіз дає корисну додаткову інформацію, якої нормативний метод не надає.

Висновок: Розрахунок за ГБН [1] і в'язко-пружна 3D-модель [4] не є взаємозамінними – вони відповідають на різні питання і доповнюють один одного. На етапі проектування нормативний метод залишається основним і обов'язковим. В'язко-пружна модель корисна як додатковий аналіз для відповідальних об'єктів, де потрібен прогноз колієутворення. Поєднання обох підходів дає проектувальнику і формальну відповідність нормам, і розуміння того, як конструкція буде працювати у часі.

Література

1. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткого типу. Проектування. – К.: Укравтодор, 2019. – 56 с.
2. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. – К.: Мінрегіонбуд України, 2015. – 113 с.
3. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. – К.: Укравтодор, 2004. – 176 с.
4. Розробити трьохмірну реологічну (фізичну та математичну) моделі роботи монолітних матеріалів в конструкціях дорожніх одягів нежорсткого типу: звіт про НДР (заключний) / кер. В.К. Жданюк. – Харків: ХНАДУ, 2014. – 262 с.
5. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 2021 R1. – Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2021. – 1124 p.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАТИВНОЇ РІВНОСТІ ПОКРИТТІВ ДОРІГ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РЕМОНТНИХ РОБІТ

Забезпечення нормативних показників рівності дорожнього покриття [1] є багатокритеріальним процесом. Формування фінального мікропрофілю поверхні обумовлене як технологічними аспектами влаштування окремих конструктивних шарів дорожнього одягу, так і геометричними параметрами підстильних шарів. Характерною особливістю є зростання вартості матеріалів при одночасному зменшенні товщини шарів у міру наближення до верхнього шару покриття.

Встановлено, що нерівності основи часто не можуть бути повноцінно нівельовані за рахунок верхніх шарів. Відтак, забезпечення цільової рівності покриття має ґрунтуватися на прецизійному формуванні земляного полотна.

Параметри ґрунтової основи повинні виключати наявність дефектів, амплітуда яких перевищує компенсаційні можливості вищерозташованих конструктивних елементів. Слід констатувати, що в наукових дослідженнях та чинній нормативній базі [2] питанню контролю рівності саме конструктивних шарів основи приділяється недостатньо уваги.

Нижче наведено аналіз методів та інструментарію для оцінювання геометричних параметрів поверхонь, а також визначено їхню релевантність для контролю різних технологічних шарів. Відповідно до класифікації, обґрунтованої експертами Світового банку на початку 80-х років ХХ століття, методи оцінювання рівності дорожнього покриття поділяються на чотири основні класи [3-5]:

I клас. Методи статичного профілювання.

Методологія базується на застосуванні класичного геодезичного інструментарію (нівелірів, контрольних рейок, рівнів). Процедура передбачає дискретну фіксацію висотних позначок у поздовжньому профілі за визначеними траєкторіями руху транспортних засобів (коліями накату).

Основними характеристиками інструментів цього класу є висока трудомісткість та низька оперативність отримання даних.

II клас. Системи безпосереднього вимірювання мікропрофілю.

До цього класу належить прецизійне обладнання, інтегроване з лазерними, ультразвуковими або акустичними сенсорами.

Прилади забезпечують безперервну високошвидкісну фіксацію вертикальної відстані від базової площини до поверхні дорожнього одягу. Розрахунок показників рівності здійснюється шляхом математичного моделювання динамічної відповіді еталонного («золотого») транспортного засобу за отриманим профілем.

На основі зазначеної методології розраховується міжнародний індекс рівності (International Roughness Index — IRI). Показник IRI, розроблений фахівцями Мічиганського університету на замовлення Світового банку, на сьогодні є одним із базових параметрів діагностики транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг у світовій практиці.

III клас. Прилади динамічної (інерціальної) дії.



Рис. 1. Установка сканування покриттів Dynatest

До третього класу належать системи, що реєструють динамічний відгук механізмів вимірювального комплексу під час руху мобільної лабораторії з фіксованою швидкістю. Ця група охоплює поштовхоміри різних модифікацій, а також причіпні установки, що фіксують параметри коливань підресореної маси транспортного засобу.

IV клас. Методи суб'єктивного експертного оцінювання.

Дана категорія передбачає візуальну дефектовку стану об'єкта кваліфікованим фахівцем. Оцінювання здійснюється з використанням спеціалізованих бальних шкал, що дозволяють корелювати візуальні ознаки деградації покриття з індексом IRI або іншими індикаторами експлуатаційної придатності.

Рекомендації щодо вибору засобів контролю за шарами дорожнього одягу.

Для контролю ґрунтової основи та шарів із фракціонованих кам'яних матеріалів (щебеню) доцільно застосовувати обладнання з високою дискретністю вимірювань для точної локалізації дефектів. Проте використання систем II класу (зокрема лазерних сканерів) на таких поверхнях є обмеженим через специфічну фактуру та високу шорсткість матеріалів, що може призводити до значних похибок. Відтак, для нижніх конструктивних шарів пріоритетним є використання інструментарію I класу: триметрових контрольних рейок та методів геометричного нівелювання.

Для конструктивних шарів із застосуванням органічних в'язучих (зв'язних шарів) рекомендовано використання систем II класу в режимі максимальної дискретності. Це забезпечує ефективну ідентифікацію та подальше усунення технологічних нерівностей на проміжних етапах будівництва.

Остаточне формування мікропрофілю дорожнього покриття завершується на етапі влаштування верхнього (фінального) шару. Враховуючи кумулятивний ефект накопичення нерівностей попередніх конструктивних шарів, цей технологічний етап потребує особливого метрологічного нагляду, оскільки саме він визначає підсумкову відповідність об'єкта нормативним вимогам.

Для забезпечення проектних показників поздовжньої та поперечної рівності, а також ефективного водовідведення, застосовується система висотних відміток. Уздовж межі проїжджої частини встановлюються копірні струни, які слугують базовою лінією для автоматизованої системи керування асфальтоукладача при розподілі суміші.

Фундаментальними принципами роботи асфальтоукладального комплексу, що гарантують максимальну однорідність та рівність покриття, є дотримання регламентованого технологічного режиму, а також плавність і безперервність руху машини. Це досягається

шляхом синхронізації продуктивності укладача з інтенсивністю постачання суміші, що передбачає розрахунок необхідної кількості та вантажопідйомності транспортних засобів залежно від дальності перевезень.

Процес вивантаження асфальтобетонної суміші в бункер укладача має здійснюватися плавно, без динамічних ударів. Рекомендовано попередньо піднімати кузов автосамоскида із закритим заднім бортом на $(1/3 - 1/4)$ від повної висоти для початкового зсуву маси суміші, з подальшим поступовим розподілом матеріалу в бункер.

Критичним фактором, що детермінує фінальну рівність покриття, є швидкість переміщення асфальтоукладача в кореляції з частотою роботи трамбувального бруса вигладжувальної плити. Параметри вібраційного впливу та частота ударів бруса визначають показник початкового ущільнення суміші. Нерівномірність цих факторів безпосередньо впливає на залишкову деформацію матеріалу під час подальшого ущільнення котками, що зрештою визначає геометричні параметри готового покриття.

Для встановлення залежності нерівності покриття від нерівності основи були проведені експериментальні дослідження. В ході експерименту було проведено порівняння рівності щебеневого шару та асфальтобетонного покриття за індексом IRI. Дані оброблялися у програмі ProVAL.

Відстань (м)	Рівність асфальтобетонного покриття по міжнародному індексу IRI (м/км)	Рівність щебеневого шару по міжнародному індексу IRI (м/км)
10	1,40	1,51
20	1,45	1,55
30	1,47	1,61
40	1,44	1,60
50	1,46	1,63
60	1,43	1,56
70	1,44	1,65
80	1,42	1,58
90	1,44	1,60
100	1,43	1,58

Рис. 2. Приклад отриманих даних вимірювань шарів дорожнього одягу

Аналіз отриманих даних дозволив простежити динаміку зміни показників рівності на контрольній ділянці довжиною 100 метрів. У межах зазначеного відрізка забезпечувалося безперервне влаштування шару з однорідного типу асфальтобетонної суміші. Параметри налаштування асфальтоукладача залишалися константними, а рух машини здійснювався з рівномірною швидкістю, що мінімізувало вплив сторонніх чинників на результати експерименту.

Виявлено чітку кореляційну залежність: рівень якості підготовки підстильного шару безпосередньо детермінує можливість досягнення нормативних значень індексу рівності на верхніх конструктивних шарах дорожнього одягу. Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що геометричні дефекти основи відображаються на вище розташовані шари, попри компенсаційні заходи під час укладання.



Рис. 3 – Порівняння рівності шарів дорожнього одягу

Література:

- 1.ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2015. 112 с.
- 2.Смолянук Р.В. Оцінка експлуатаційного стану дорожніх покриттів на основі вдосконалення методів вимірювання рівності та зчпних якостей: дис. ... кандидата техн. наук: 26.10.05 / Смолянук Роман Володимирович. Х., 2005. – 157 с.
- 3.Sayers M. W., Gillespie T. D., Queiroz C. A. The International Road Roughness Experiment (IRRE): Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. World Bank Technical Paper. 1986. No. 45. 453 p.
- 4.ASTM E1926-08(2021) Standard Practice for Computing International Roughness Index (IRI) from Longitudinal Profile Measurements. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2021. 7 p.
- 5.ASTM E950/E950M-22 Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling System. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2022. 9 p.

*Роман Смолянюк,
к.т.н., професор кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна*
*Віталій Онуфрієв,
здобувач 3-го рівня вищої освіти
ХНАДУ, Україна*

КОНЦЕПЦІЯ ЗАСТОСУВАННЯ СУРОГАТНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МОДЕЛЮВАННЯ У РОЗРОБЦІ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ

Сучасні глобальні виклики, зумовлені наслідками пандемії та веденням активних бойових дій, істотно трансформували освітнє середовище, закріпивши дистанційну форму навчання як базовий елемент освітнього процесу. Незважаючи на успішну адаптацію теоретичної складової до онлайн-формату, забезпечення належного рівня практичної підготовки залишається складною системною проблемою. В умовах обмеженого безпечного доступу до матеріально-технічної бази, навчальних установок та спеціалізованих полігонів, розробка та впровадження віртуальних лабораторних комплексів стає науково та практично обґрунтованим рішенням. Застосування цифрових симуляторів дозволяє вирішити комплекс стратегічних завдань: забезпечити високий рівень наочності складних технологічних процесів, мінімізувати безпекові ризики для учасників освітнього процесу, а також оптимізувати експлуатаційні витрати. Попри те, що безпосередня фізична взаємодія з реальним обладнанням залишається еталонною формою інженерної підготовки, системна інтеграція віртуальних лабораторій наразі є стратегічним пріоритетом для забезпечення стійкості та подальшого розвитку технічної освіти.

Технологія створення віртуальних лабораторій являє собою комплексний процес, який починається з тривимірного просторового моделювання необхідного обладнання та матеріалів методами полігональної графіки у спеціалізованих програмних середовищах. Для досягнення візуальної реалістичності отриманим геометричним об'єктам надаються оптичні характеристики за допомогою текстуровання. Потім готові моделі інтегруються в інтерактивне середовище сучасного 3D-рушія, а керування всіма процесами симулятора здійснюється за допомогою програмних скриптів. Однак найскладнішим технічним викликом у розробці таких тренажерів є достовірність симуляції.

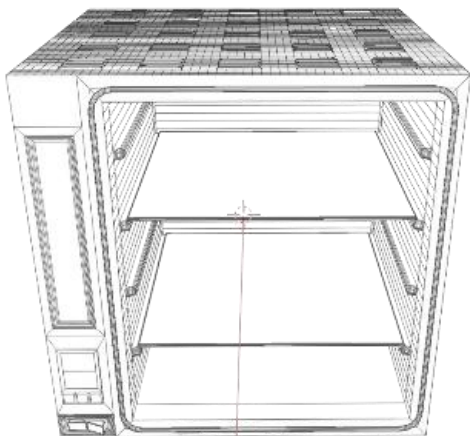


Рис. 1. 3D модель

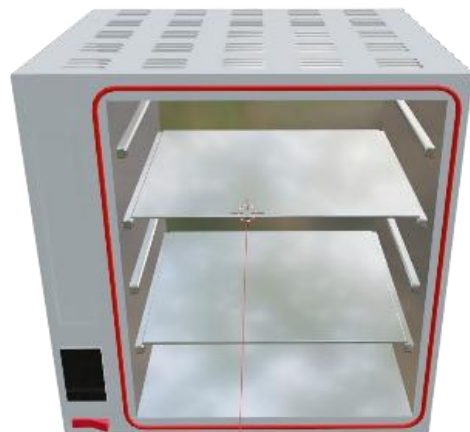


Рис. 2. 3D модель з текстурою



Рис 3. 3D модель інтегрована в рушій

Принцип роботи більшості складних віртуальних симуляторів зводиться до емуляції достовірного результату, а не його прямого математичного розрахунку, оскільки обчислення досліджуваних процесів у режимі реального часу потребує надлишкових апаратних потужностей і є принципово неможливим у багатьох випадках на сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки. Це впливає на рівень інтерактивності симуляції та, як наслідок, на якість результату її застосування.

У межах цього дослідження ми фокусуємося на процесах деформації ґрунтів, зокрема при проведенні віртуального експерименту «визначення щільності ґрунту методом ріжучого кільця». Ґрунт є складною дисперсною системою з нелінійними характеристиками, де кожен акт взаємодії — наприклад, занурення кільця в масив — супроводжується процесами локального ущільнення та зміни об'єму. Традиційним інструментом для опису такої поведінки є метод дискретних елементів (DEM), суть якого полягає у представленні середовища як сукупності величезної кількості окремих мікрочастинок.

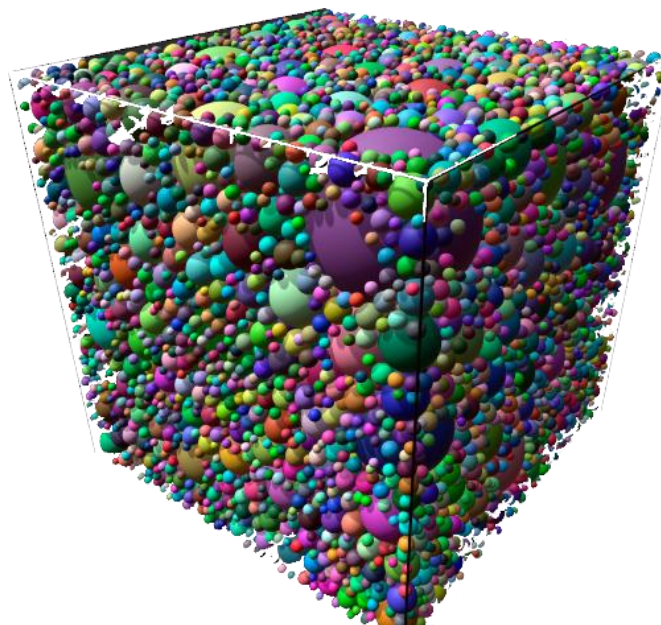


Рис. 4. Метод дискретних елементів (DEM)

Кожен крок симуляції в межах цього методу вимагає розв'язання систем диференціальних рівнянь для розрахунку сил тертя, пружних взаємодій та переміщень кожної частки. Математична складність такого підходу така, що прямий розрахунок у режимі

реального часу є принципово неможливим за поточного рівня розвитку обчислювальної техніки.

Для подолання цього фундаментального обчислювального бар'єру в архітектурі розроблюваного симулятора пропонується застосувати метод сурогатного нейромережевого моделювання. Суть підходу полягає у часовому розділенні процесу обчислень. На підготовчому етапі генерується масив еталонних даних: ресурсоємні розрахунки деформації ґрунту за методом DEM виконуються заздалегідь із використанням потужних обчислювальних комплексів. Отримані результати використовуються для навчання компактної штучної нейронної мережі, яка починає виконувати функцію математичного сурогату — високошвидкісного апроксиматора фізичних процесів. Безпосередньо під час виконання віртуальної лабораторної роботи додаток вже не розв'язує диференціальні рівняння. Замість цього навчена нейромережа здійснює швидкий логічний вивід (інференс), миттєво генеруючи кожного разу унікальну реакцію ґрунту на маніпуляції з ріжучим кільцем, достовірність якої залежатиме лише від якості навчання нейронної мережі.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що концепція впровадження методу сурогатного нейромережевого моделювання розглядається як перспективне інженерне рішення, спрямоване на подолання фундаментальних обчислювальних бар'єрів у розробці спеціалізованих віртуальних тренажерів. Зрештою, успішна програмна реалізація такого підходу здатна зробити складні лабораторні комплекси загальнодоступними для використання на стандартних пристроях студентів, формуючи надійний технологічний фундамент для подальшого розвитку інтерактивної інженерної освіти.

Література

1. Altair EDEM. Discrete Element Method (DEM) Software [Електронний ресурс] / Altair Engineering Inc. — Режим доступу: <https://altair.com/edem> (дата звернення: 10.04.2026).
2. Ansys Rocky. Particle Dynamics Simulation Software [Електронний ресурс] / Ansys, Inc. — Режим доступу: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-rocky> (дата звернення: 10.04.2026).
3. PFC (Particle Flow Code) [Електронний ресурс] / Itasca Consulting Group, Inc. — Режим доступу: <https://www.itascacsg.com/software/pfc> (дата звернення: 10.04.2026).
4. Yade Documentation 3 [Електронний ресурс] / V. Šmilauer [et al.] // The Yade Project. — Режим доступу: <https://yade-dem.org/doc/> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Kloss C. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM / C. Kloss, C. Goniva, A. Hager, S. Amberger, S. Pirker // Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. — 2012. — Vol. 12, No. 2-3. — P. 140–152.

Владислав Тетера

*аспірант кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна
e-mail: vl1470@ukr.net , тел. +80976824338*

Валерій Жданюк

*доктор технічних наук, професор кафедри будівництва та експлуатації автомобільних
доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна
e-mail: vk.zhdanuk@gmail.com , тел. +80679632807*

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГООЩАДНИХ ДОБАВОК ДО БІТУМУ

Анотація. Досліджено адгезійну ефективність енергоощадних добавок Адбіт-Н, Evotherm та Lowtherm по відношенню до в'язкого дорожнього бітуму. Оцінювання адгезійної ефективності енергоощадних добавок виконували за показником зчеплюваності плівки бітуму з поверхнею зерен гранітного щебеню та з поверхнею скляних пластин, а також за показником адгезійної активності. Показано, що додавання до нафтового дорожнього бітуму енергоощадних добавок покращує його адгезійні властивості.

Ключові слова: нафтовий дорожній бітум, енергоощадна добавка, адгезійна активність, показник зчеплюваності бітуму з мінеральною поверхнею.

В останні десятиліття зусилля фахівців дорожньої галузі спрямовані на зменшення енергоспоживання під час приготування і використання асфальтобетонних сумішей. Традиційні гарячі асфальтобетонні суміші зазвичай виробляють за температур понад 140-165 °С, що призводить до значного споживання енергії та утворення викидів, таких як тверді частинки, оксид азоту (NO_x) та парникові гази. Для пом'якшення впливу на навколишнє середовище в різних країнах почали застосовувати технологію приготування асфальтобетонних сумішей за більш низьких температур (110–130 °С). Такі суміші отримали назву теплі асфальтобетонні суміші (Warm Mix Asphalt, WMA). Технологія WMA спрямована на зменшення споживання палива в процесі приготування (на 20 %) і ущільнення таких сумішей без погіршення механічних властивостей асфальтобетонних шарів дорожнього одягу, влаштованих із них. Додаткові переваги застосування технології WMA пов'язані зі зменшенням її негативного впливу як на навколишнє середовище, так і на здоров'я людей, завдяки зменшенню витрат палива та викидів забруднюючих речовин, а також покращенню умов праці асфальтоукладальних бригад [1–4].

Технологія WMA передбачає введення спеціальних добавок в бітум, або безпосередньо у асфальтозмішувач. Існує три основні технології виготовлення WMA шляхом введення спеціальних добавок: **технологія спінювання бітуму, додавання синтетичних восків, введення хімічних добавок.** Технологія застосування хімічних добавок під час приготування WMA вимагає мінімальних додаткових витрат для доукомплектування асфальтобетонного заводу, і з цієї причини вона стає все більш популярною, порівняно з іншими. Однак, швидке збільшення асортименту хімічних добавок, доступних на ринку, ускладнює вибір більш ефективного продукту для кожного конкретного випадку. Попри обнадійливі переваги технології WMA, теплі асфальтобетонні суміші виготовляють за більш низьких температур, порівняно з гарячими асфальтобетонними сумішами, що викликає занепокоєння щодо достатньої тривалої водостійкості теплового асфальтобетону, адже нижчі температури під час змішування бітуму з мінеральною частиною суміші, можуть вплинути на погіршення зчеплюваності бітуму з поверхнею мінеральних заповнювачів.

Метою цього дослідження є встановлення ефективності впливу найбільш поширених на ринку України хімічних енергоощадних добавок до бітуму на його адгезійні властивості шляхом виконання лабораторних випробувань.

Для експериментальних досліджень був прийнятий нафтовий дорожній бітум марки БНД 70/100, який за основними властивостями відповідав вимогам національного стандарту [5], окрім показника зчеплюваності з поверхнею скляних пластин, який становив всього 12,3 %. Як енергоощадні добавки до бітуму були прийняті доступні на ринку України Адбіт-Н, Evotherm і Lowtherm. Для зручності порівнянь їхню концентрацію у складі бітуму було прийнято 0,4 % від маси бітуму. Додавання досліджуваних добавок до бітуму здійснювали під час його перемішуванням за температури 150 °С. Дослідження впливу енергоощадних добавок на властивості вихідного бітуму виконували стандартними методами за показниками пенетрації, температури розм'якшення і дуктильності, а адгезійні властивості за показником зчеплюваності плівки бітуму з поверхнею зерен гранітного щебеню та скляних пластин, а також за показником адгезійної активності досліджуваних енергоощадних добавок по відношенню до бітуму [6-8].

Результати досліджень основних властивостей вихідного і модифікованих енергоощадними добавками бітумів вказують на те, що показник пенетрації, температури розм'якшення та дуктильності є малочутливими параметрами до їхньої присутності у складі бітуму. Експериментально встановлено, що досліджувані добавки покращують опір плівок бітуму відшаровуючій дії води на поверхні зерен гранітного щебеню. Серед експериментально визначених показників зчеплюваності з поверхнею зерен щебеню найменше значення притаманне вихідному бітуму без добавок, а найбільше бітуму з 0,4 % енергоощадної добавки Evotherm. Найменше зростання показника зчеплюваності з поверхнею зерен щебеню властиве бітуму з 0,4 % енергоощадної добавки Lowtherm, порівняно з вихідним бітумом. Добавка Адбіт-Н за вказаним показником є дещо більш ефективною, порівняно з енергоощадною добавкою Lowtherm.

Експериментально встановлено, що за введення досліджуваних енергоощадних добавок до складу бітуму опір його плівок відшаровуючій дії води на поверхні скляних пластин теж зростає, порівняно з вихідним бітумом. Це добре підтверджує результати визначення показника зчеплюваності бітуму, модифікованого досліджуваними добавками, з поверхнею зерен гранітного щебеню. Вихідному бітуму властивий найменший показник зчеплюваності з поверхнею скляних пластин - 12,3 %. Додавання до складу вихідного бітуму БНД 70/100 0,4 % енергоощадної добавки Lowtherm викликає зростання показника зчеплюваності бітуму з поверхнею скляних пластин до 36,5 %. За концентрації 0,4 % енергоощадної добавки Адбіт-Н показник зчеплюваності плівки бітуму з поверхнею скляних пластин зростає до 37,2 %. За аналогічної концентрації добавки Evotherm показник зчеплюваності плівки бітуму з поверхнею скляних пластин зростає до 89,8 %. Порівняння значень показників зчеплюваності плівок бітуму з поверхнею скляних пластин вказує на те, що додавання до бітуму добавок Evotherm, Адбіт-Н та Lowtherm, за їхньої концентрації 0,4 % від маси бітуму, забезпечує зростання цього показника, відповідно, у 7,30 рази, у 3,02 рази та у 2,97 рази, порівняно з вихідним бітумом без енергоощадних добавок. Порівняльний аналіз бітумів, модифікованих досліджуваними добавками, за показником адгезійної активності вказує на те, що найбільше його значення притаманне бітуму з 0,4 % енергоощадної добавки Evotherm (193,8), а найменше (60,5) властиве енергоощадній добавці Lowtherm за аналогічної її концентрації у складі бітуму. За показником адгезійної активності енергоощадна добавка Адбіт-Н за концентрації 0,4 % від маси бітуму перевищує добавку Lowtherm всього на 2,9 %.

Висновки. Експериментально встановлено, що додавання до нафтового дорожнього бітуму енергоощадних добавок Evotherm, Адбіт-Н, або Lowtherm сприяє зростанню його адгезійних властивостей. Серед досліджених енергоощадних добавок найбільш ефективною щодо підвищення адгезійних властивостей бітуму є добавка Evotherm. Добавкам Адбіт-Н та Lowtherm властива значно менша адгезійна ефективність, порівняно з добавкою Evotherm. Експериментально встановлений різний рівень адгезійної активності досліджуваних добавок може бути пов'язаний з різним вмістом у їхньому складі аміновміщуючих груп. Це необхідно враховувати під час проєктування складу теплих асфальтобетонних сумішей для конкретних

умов експлуатації шляхом застосування додаткових заходів для більш суттєвого підвищення показника зчеплюваності бітуму з поверхнею мінеральних складників суміші.

Література

1. M.C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, F. Moreno, Warm mix asphalt: an overview, *J. Clean. Prod.* 24 (2012) 76–84, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>.
2. Y. Tan, M. Guo, H. Xu, R. Zhang, Comparative study on laboratory performance of hot- and warm-mix asphalt mixtures, Article ID 20120056, *J. Test. Eval.* 40 (5) (2012).
3. A. Almeida-Costa, A. Benta, Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 2308–2317.
4. G. Ferrotti, E. Mancinelli, G. Passerini, F. Canestrari, Comparison of energy and environmental performance between warm and hot mix asphalt concrete production: a case study, *Constr. Build. Mater.* 418 (2024) 135453.
5. ДСТУ 4044:2019 Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови.
6. ДСТУ 8787:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення зчеплюваності зі щебенем.
7. ДСТУ 9169:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення зчеплюваності з мінеральним матеріалом.
8. ВБН В.2.7-219-176-2003 Будівельні матеріали. Застосування поверхнево-активних речовин в дорожніх технологіях з використанням бітумів.

Олена Фоменко

*асистент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: lensanfom@ukr.net, тел. +380501070802

РОЗРОБКА ГРУНТІВ ПРИ ВІД'ЄМНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ПОВІТРЯ

Анотація. У статті наведено інформацію щодо розробки ґрунтів при від'ємних температурах повітря. Необхідність розробки ґрунтів викликана збільшенням тривалості будівельного періоду з переходом в певних умовах на цілорічне будівництво автомобільних доріг.

Ключові слова: від'ємна температура, промерзання ґрунтів.

Можливості дорожньо-будівельних організацій по нарощуванню річних об'ємів будівництва, як правило, обмежені. Це вимагає шукати додаткові резерви шляхом вдосконалення технології і організації робіт, а також застосування сучасної техніки.

При виконанні земляних робіт в зимовий період необхідно враховувати наступне: можливість збільшення будівельного сезону, повніше і рівномірніше використання дорожньо-будівельні машини протягом всього року, можливість постійного закріплення кадрів кваліфікованих робітників, прискорення будівництва і зменшення накладних витрат.

Ведення земляних робіт в зимовий період здійснюється з урахуванням складу і стану ґрунту, температури повітря, наявності засобів механізації.

При виконанні робіт взимку виконують загальні вимоги до влаштування земляного полотна і спеціально встановлені правила для робіт в зимових умовах.

Щоб уникнути промерзання ґрунтів, що укладаються в насип в талому стані, період часу від розробки до остаточного ущільнення в насипу не повинен перевищувати 2-3 години при температурі повітря до мінус 10 °С, а при температурі до мінус 20 °С цей період скорочується до 1-1,5 години.

Автомобілі-самоскиди в зимовий час обладнають утепленими кабінами. Щоб уникнути примерзання талого ґрунту кузова змазують розчином хлористого кальцію або підігривають дно відпрацьованими газами двигуна. При розробці виїмок або ґрунтових кар'єрів приймають необхідні заходи по збереженню ґрунту в талому стані.

У зв'язних ґрунтах взимку доцільно виконувати лише зосереджені земляні роботи, в тому числі розробку виїмок екскаваторами з укладанням ґрунту у відвали. У зимовий час не виконують лінійні роботи з відсіпанням невисоких насипів з'єднувальних ґрунтів і розробкою дрібних резервів великої протяжності.

Роботи взимку проводять з концентрацією машин на малому фронті та безперервно високими темпами. Висота забою в ґрунтових кар'єрах повинна бути не менше п'яти товщин замерзлого ґрунту. Розпушування мерзлого ґрунту виконують дробленням; при товщині замерзлого ґрунту до 0,6 м його спускають за допомогою вільно падаючого молота клиноподібної або кулястої форми масою 2,0-2,5 т.

При великому обсязі робіт найбільш ефективна розробка мерзлих ґрунтів потужними розпушувачами, а в виїмках – масовими вибухами на викид (при глибині промерзання більше 1,5 м) або дрібними вибухами шпурових зарядів з транспортуванням мерзлого ґрунту у відвал (при глибині промерзання 0,6-1,5 м).

У всіх випадках розробки в зимовий час виїмок і ґрунтових кар'єрів ще восени, до настання морозів, виконують підготовчі роботи: ділянки, намічені до розробки, оберігають від промерзання шляхом оранки і боронування, а також утеплюють теплоізоляційними матеріалами (шаром пini, листям, тирсою соломкою, торфом, шлаками). Зазвичай всі ці матеріали, як і зораний ґрунт, добре захищають від промерзання і обходяться відносно дешево

в порівнянні з електро-, паро- або водо відтаванням, або подрібненням мерзлого ґрунту молотами, вибухами, прорізанням.

На ділянках, намічених для розробки в останню третину зими, попередньо проводять роботи, охороняючи ґрунт від промерзання затверділим шаром піни або місцевими теплоізоляційними матеріалами; при наявності джерела водопостачання на зв'язних водонепроникних ґрунтах намерзає лід шаром до 60 см з подальшим видаленням при розробці. Поверхню виїмки або резерву, що розробляється, очищають від снігу і льоду не більше ніж на одну зміну вперед і надалі площа очищення перед початком робіт визначають за добової продуктивності землерийної машини.

Розробку ведуть екскаватором з місткістю ковша не менш 0,65 м³ безперервно; тільки при сильних снігопадах і завірюхах припиняють роботу і починають знову лише після повного видалення снігу і льоду з ґрунту насипу, що відсипається. Довжину захватки визначають виходячи з необхідності закінчити ущільнення талого ґрунту до того моменту, коли його температура знизиться до плюс 2 °С. Довжина захватки не повинна перевищувати 100 м. Сусідні захватки відсипають уступами шириною 2-3 м.

Ґрунт в насип укладають горизонтальними шарами, щоб уникнути утворення площин ковзання. Товщина шару залежить від наявних котків ущільнення.

Хімічний спосіб захисту від промерзання ґрунтів проводиться до настання морозів розливом технічних хлористих солей (кальцієвих, натрієвих, магнієвих та ін.) по зораному ґрунту. Сіль вводять у вигляді водяного розчину з концентрацією до 20 %. Витрата розчину залежить від температури повітря і застосовується в кількості 1-5 кг на 1 м² поверхні ґрунту. Розробка мерзлого ґрунту проводиться траншейними екскаваторами, бульдозерами. При механічному способі розробки мерзлого ґрунту довжину захватки визначають з урахуванням часовий продуктивності розпушувачами, температури повітря і швидкості вітру.



Рис.1. Класифікація машин для розробки мерзлих ґрунтів

РОЛЬ СУЧАСНОГО ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Анотація. У роботі проаналізовано роль сучасного обладнання у процесі формування професійних компетентностей студентів закладів вищої освіти. Розглянуто методику інтеграції автоматизованого випробувального комплексу C104-03N+C096F Matest S.p.A. та відповідного програмного забезпечення у лабораторний практикум із дисципліни «Опір матеріалів» для технічних спеціальностей. Висвітлено переваги використання цифрових технологій для розуміння фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів, фізичних процесів та підвищення якості підготовки інженерів у контексті повоєнного відновлення інфраструктури України.

Ключові слова: опір матеріалів, лабораторне обладнання, освітній процес, випробовування, дослідження міцності.

Відновлення та модернізація дорожньої інфраструктури України у повоєнний період вимагає від інженерів-будівельників досконалого володіння методами контролю якості та випробування матеріалів. Дисципліна «Опір матеріалів» є фундаментом інженерної освіти для технічних спеціальностей, оскільки саме на цьому етапі студенти опановують розрахункові моделі міцності, жорсткості та стійкості елементів конструкцій.

Дефіцит сучасного лабораторного інструментарію в освітньому процесі суттєво обмежує можливості для повноцінної практичної підготовки та експериментальної верифікації теоретичних знань здобувачів вищої освіти. Невідповідність матеріально-технічної бази актуальним галузевим стандартам призводить до зниження точності навчальних досліджень та заважає формуванню необхідних професійних компетентностей у майбутніх фахівців. У підсумку це негативно позначається на якості кваліфікаційних робіт та загальному рівні готовності випускників до вирішення складних інженерних завдань у реальних виробничих умовах [1].

Використання сучасного обладнання C104-03N+C096F Matest S.p.A. (рис.1) [2] дозволить автоматизувати процес навантаження зразків, що мінімізує вплив людського фактору на результати експерименту. Програмне забезпечення цього комплексу дозволяє здійснювати побудову графіків «навантаження-деформація» у реальному часі, що є надзвичайно важливим для розуміння студентами стадій пружності, текучості та руйнування матеріалів.



Рис. 1. Загальний вигляд випробувальної установки Matest C104-03N+C096F [2]

Інтеграція такого лабораторного обладнання в освітній процес дозволяє:

- проводити порівняльний аналіз міцності будівельних матеріалів (бетон, цегла, сталь);
- вивчати вплив дефектів структури на несну здатність елементів;
- набувати практичних навичок роботи з сертифікованим обладнанням європейського зразка.

Впровадження програмного комплексу Matest SmartLab суттєво трансформує роль студента в експерименті. Замість ручної фіксації показників манометрів, система автоматично реєструє дані та виводить на екран динамічний графік залежності між навантаженням і деформацією, а також залежності між іншими показниками (рис. 2) [3].

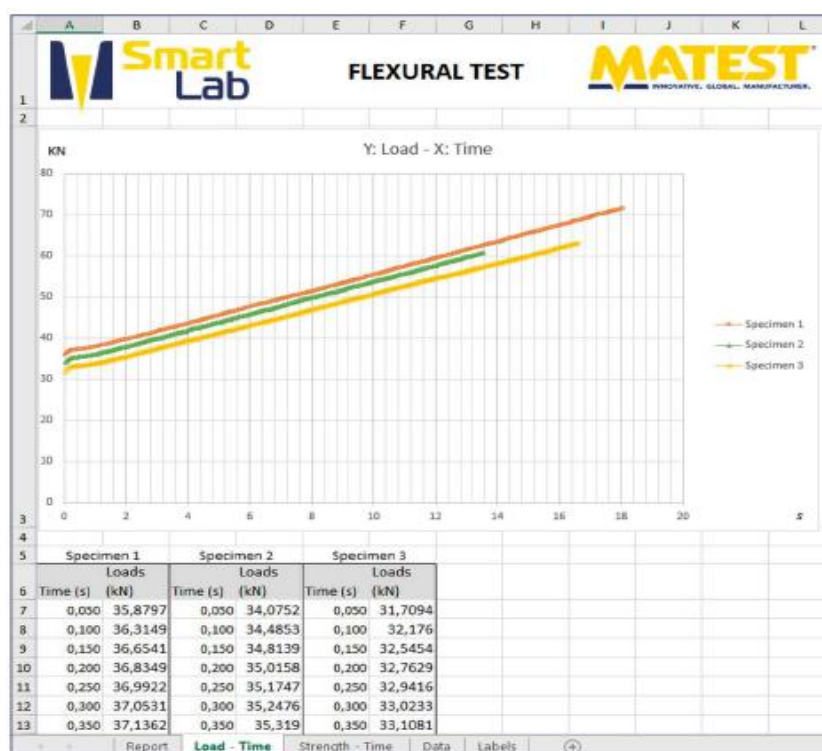


Рис. 2. Результати випробування зразків на згин у програмному комплексі Matest SmartLab [3].

Цифрова обробка результатів дозволяє студентам швидше виконувати статистичний аналіз даних, що відповідає сучасним вимогам до інженерної освіти.

Практична підготовка здобувачів вищої освіти із застосуванням випробувального комплексу Matest S.p.A. дозволить досягти якісно нового рівня засвоєння матеріалу завдяки наступним аспектам:

1. Експериментальній верифікації теоретичних положень. Використання автоматизованого обладнання забезпечує наочну візуалізацію складних фізичних процесів, зокрема переходу матеріалу із зони пружних деформацій у пластичну стадію та подальшого руйнування. Це сприяє глибинному розумінню механіки деформування конструкційних матеріалів, що є базовим для дисципліни «Опір матеріалів».

2. Забезпеченню метрологічної точності. Завдяки автоматизації циклу навантаження та виключенню суб'єктивних похибок оператора, результати лабораторних досліджень характеризуються високою відтворюваністю та повною відповідністю вимогам ДСТУ й міжнародних стандартів EN.

3. Формування цифрових компетентностей. Опанування навичок роботи з професійним програмним забезпеченням (зокрема комплексом SmartLab) інтегрує освітній процес у сучасне цифрове середовище проектних та експертних організацій, підвищуючи конкурентоспроможність випускників на ринку праці.

Окрему увагу в межах навчального процесу може бути приділено аналізу факторів ризику в дорожній інфраструктурі. Враховуючи статистичні дані, згідно з якими стан дорожнього покриття та якість будівельних матеріалів є критичними чинниками забезпечення безпеки експлуатації споруд, робота з обладнанням Matest S.p.A. дозволяє майбутнім фахівцям об'єктивно оцінювати вплив технічних умов на виникнення аварійних ситуацій та прогнозувати довговічність транспортних об'єктів.

Висновки. Впровадження комплексу Matest S.p.A C104-03N+C096F у навчальну лабораторію кафедри опору матеріалів та машинознавства НТУ суттєво підвищує якість практичної підготовки майбутніх фахівців. Студенти матимуть змогу отримати навички роботи з інструментарієм, що використовується провідними дорожньо-будівельними компаніями, що сприятиме їх подальшій адаптації на виробництві під час повоєнної відбудови України.

Література

1. Fajrin, S., & Hakim, D. L. (2023). Implementation of low-cost laboratory in education: A systematic literature review. *JIPTEK: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik dan Kejuruan*, 16(2), 163-175. DOI: <https://doi.org/10.20961/jiptek.v16i2.74489> (дата звернення: 27.3.2026).
2. HIGH STIFFNESS FLEXURAL MACHINE, 360 KN. URL: <https://www.matest.com/en/product/c096n-high-stiffness-flexural-machine> (дата звернення: 27.3.2026).
3. INNOVATIVE SOFTWARE PLATFORM FOR MATERIAL TESTING EQUIPMENT. URL: https://www.matest.com/contents/media/brochure-smartlab-concrete_en.pdf (дата звернення: 27.3.2026).

Наталія Яреценко

*к.т.н., доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Бірулі,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: netyasin4@gmail.com, тел. +380973075216

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ПО ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ ПАСИВНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Анотація. У статті наведено інформацію щодо впливу дорожніх умов на питомі показники аварійності. Методи запобігання дорожньо транспортним пригодам та зниженню тяжкості їх наслідків, які використовує дорожня служба. Заходи по забезпеченню пасивної безпеки автомобільної дороги.

Ключові слова: пасивна безпека, аварійна ситуація, дорожні умови, організація дорожнього руху.

Методи запобігання дорожньо транспортним пригодам та зниженню тяжкості їх наслідків, які використовує дорожня служба, по характеру будівельних робіт та конструктивних рішень поділяють на планувальні, конструктивні та організаційні.

Перша група методів передбачає раціональні з точки зору забезпечення безпеки дороги планування дорожньої мережі, призначення розмірів елементів дороги, компоновку перехресть, автобусних зупинок, автозаправочних станцій та інше.

Друга група методів пов'язана з проектуванням таких конструкцій штучних споруд, елементів обстановки дороги та архітектурного її оформлення, яке виконує свої функції, не створює перешкод руху та не сприяє збільшенню частоти та тяжкості дорожньо транспортних пригод.

Третя група методів включає виховальну роботу, примусові заходи та покарання винуватців дорожньо транспортних пригод та людей, халатно ставилися до своїх обов'язків.

Подібна класифікація приймається для заходів по забезпеченню пасивної безпеки дороги.

Інженерне облаштування автомобільних шляхів відіграє велику роль для забезпечення функціонування транспортних магістралей. Ця інфраструктурна складова являє собою сукупність технічних систем і пристроїв, необхідних для функціонування вантажних та пасажирських перевезень, що створює умови забезпечення життєдіяльності економіки та суспільства в цілому. Інфраструктура шляхів – це доповнення до транспортної мережі, яка використовується для перевезень вантажів і пасажирів, що забезпечує ефективне та безпечне використання транспортних засобів. Об'єкти транспортної інфраструктури містять у собі залізничні, трамвайні шляхи, естакади, мости, автобусні станції, об'єкти систем зв'язку, а також пристрої й устаткування. Проектування та виготовлення якісної інфраструктури шляхів створює передумови для безпечного користування транспортом, що відповідає стандартам, прийнятим у Європейському союзі.

Статистичні дані свідчать, що перекидання транспортних засобів, наїзд їх на перешкоди в сукупності складають майже 50 % від загального числа дорожньотранспортних пригод. Зниження ваги наслідків таких ДТП може бути досягнуто шляхом підвищення пасивної безпеки доріг, одним з ефективних способів забезпечення якої є дорожні огороження. Основні функції огорожень – створити перешкоду для запобігання аварійному з'їзду з дороги транспортного засобу, що рухається, та обмежити наступне ушкодження людей всередині цього засобу та інших осіб на дорозі. Огороження дорожні – пристрої, призначені для запобігання з'їзду транспортного засобу з земляного полотна дороги та мостової споруди (моста, шляхопроводу, естакади тощо), переїзду через розділювальну смугу, зіткнення із зустрічним транспортним засобом, наїзду на масивні перешкоди і споруди, розташовані на узбіччі і в смугі відведення дороги, на розділовій смузі (огороження для автомобілів), падіння

пішоходів із мостової споруди або насипу (огородження для пішоходів), а також для впорядкування руху переходів і запобігання виходу тварин на проїжджу частину (огородження для тварин).

Огородження має стримувати транспортний засіб з допустимими ваговими параметрами, який рухаючись проїзною частиною дороги з дозволеною швидкістю змінив напрямок руху.

Під час контакту транспортного засобу з огородженням повинні виконуватись такі вимоги, згідно з [1] - автомобіль не повинен перевертатись через огородження; - автомобіль не повинен переміщатися в бік небезпечної зони понад 0,6 м (якщо це не передбачено для певного огородження); - автомобіль не повинен проривати огородження; - не повинна існувати можливість проникнення матеріалу огородження до салону транспортного засобу; - під час контакту з транспортним засобом огородження не повинно нахилитись, відриватись, руйнуватись. Взаємодія транспортного засобу з огородженням повинна завершитись його зупинкою або виїздом у бік смуги руху під кутом до огородження та із швидкістю, які є меншими ніж під час первинного контакту.

Якісне вуличне освітлення автомобільних доріг і вулиць суттєво впливає на зниження числа аварій. Встановлено, що при використанні яскравого і природного світла на вулицях і дорогах загальна кількість ДТП може бути зменшена на 30%, а число дорожньо-транспортних пригод на дорогах державного значення та в зонах особливої небезпеки (наприклад, на перехрестях) – на 45%. За характером вимог до освітлення всі вулиці і площі міст поділяються на три категорії : А – швидкісні дороги, магістралі загальноміського значення тощо; Б – магістральні вулиці районного значення, дороги вантажного руху тощо; В – вулиці і дороги місцевого значення. [2]

До елементів примусового зниження швидкості відносяться: «Лежачий поліцейський» (штучна дорожня нерівність) – призначений для обмеження швидкості руху автотранспорту біля навчальних установ, лікарень, ринків, торгових центрів тощо. Конструкція являє собою монолітний виріб із чорної гуми з протекторами для кращого зчеплення з шинами автотранспорту. У спеціальні виїмки, які розташовані на поверхні лежачого поліцейського, наклеюється жовта світловідбивна розмічальна стрічка для кращої видимості в нічних умовах. Температура експлуатації: від – 50°C до + 60°C. При установці штучної дорожньої нерівності рекомендується використовувати знаки безпеки дорожнього руху.

Пішохідні переходи є одними з найбільш небезпечних ділянок на автомобільних дорогах і вулицях населених пунктів. Застосування звичайних методів, зокрема нанесення горизонтальної дорожньої розмітки, встановлення дорожніх знаків не завжди забезпечує належні умови безпеки руху пішоходів. Своєю чергою, улаштування переходів на різних рівнях – підземні та надземні – у багатьох випадках не можуть бути реалізовані з ряду причин. Серед них, насамперед, необхідно відзначити високу вартість і тривалість робіт, а, отже, створення перешкод на тривалий період. В умовах планування міст також необхідно згадати проблему виділення необхідного для будівництва місця.

Ще одним важливим моментом є певна складність користування підземними та надземними пішохідними переходами для літніх людей і пішоходів з обмеженими фізичними можливостями. Виходячи з особливостей функціонування пішохідних переходів на одному рівні — безпечний перетин транспортних і пішохідних потоків у різних умовах експлуатації (денний і нічний час доби, наявність опадів, туману і т.д.) розроблений ряд методів підвищення інформативності та безпеки в цілому. Напрями підвищення безпеки дорожнього руху можна розділити на такі:

- 1) Підвищення інформативності шляхом застосування нетрадиційних вискоефективних матеріалів і виробів, вживаних для стандартних технічних засобів організації дорожнього руху (насамперед дорожніх знаків і розмітки);

- 2) Підвищення інформативності шляхом застосування нестандартних технічних засобів організації дорожнього руху;

- 3) Покращення горизонтальної освітленості в темний час доби;

4) Поліпшення параметрів дорожніх покриттів на пішохідних переходах та в безпосередній близькості від них.

Статистика свідчить, що близько 95% часу кожен автомобіль перебуває на парковці. Але в останні роки у великих містах спостерігається дефіцит місць для паркування, особливо в районах великого скупчення людей: торгових центрах, ринках, аеропортах, вокзалах, стадіонах та ін. Нестача вільних територій для автостоянок призвела до створення автоматизованих систем паркінгу, завданням яких є забезпечення ефективного використання простору для зберігання транспортних засобів на високотехнологічному рівні. [3]

Актуальною в Європі є автоматизована система паркування Parkit G2FB. Використання гідравлічних приводів сприяє мінімізації рівня шуму. Система забезпечує безшумне і швидке піднімання/опускання автомобіля, не створюючи дискомфорту для мешканців.

Конструкція цієї системи паркування створює «ілюзію наземного паркінгу», не порушуючи гармонії з навколишніми будівлями. В умовах сьогодення найбільш оптимальним рішенням щодо збільшення місць для паркування є застосування багаторівневих паркувальних систем зберігання автомобілів.

Метою заходів по забезпеченню пасивної безпеки автомобільної дороги є усунення тяжких тілесних ушкоджень, виникнення яких сприяють незадовільні дорожні умови. Для досягнення цієї мети необхідно збирати дані, які характеризують вплив дорожніх умов на питомі показники аварійності. Такі дані можуть бути отримані тільки при статистичних дослідженнях. Їх результати можуть використовуватися в якості прямих показників для оцінки тяжкості травмування та економічного обґрунтування проектних рішень. Збір та систематизація даних про дорожньо транспортні пригоди дають можливість встановити аварійну ситуацію та оцінити характеристики руху автомобіля по слідам, які залишаються на місці дорожньо транспортних пригод, деформаціям автомобіля та характерним травмам людей.

Література

1. ДБН В.2.3-4-2015. Автомобільні дороги. Держком будівництва, архітектури та житлової політики України.- Київ, ООО, Алефа, 2015. – 117 с.
2. Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф. (2007) Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху. Вид-во Знання України, -450 с.
3. Поліщук В.П., Дзюба О.П. (2008) Теорія транспортного потоку. Методи і моделі організації дорожнього руху. Вид-во Знання України. -175 с.
4. В Україні за рік суттєво побільшало ДТП і зріс рівень смертності. URL: <https://life.pravda.com.ua/society/2024/01/27/259076/> (дата звернення: 20.4.2025).
5. Найпоширеніші причини ДТП. URL: <https://narscars.com.ua/ua/blog/nuzhnoznat/samye-rasprostranennye-prichiny-dtp> (дата звернення: 21.4.2025).
6. Бондар Т.В Беленчук О.В.Оцінка ролі дорожніх умов у виникненні дорожньотранспортних подій на ділянках їх концентрації. URL: http://dorogimosti.org.ua/files/upload/r4_5.pdf (дата звернення: 20.4.2025).

Відновлення і розвиток мостів та транспортних тунелів

Олександр Барिश
викладач відділення «Будівництво будівель і споруд та землевпорядкування»,
ВСП КФК СумДУ, Україна
e-mail: albar80801983@gmail.com, тел. +380674618294

КАПІТАЛЬНИЙ РЕМОНТ МОСТУ ЧЕРЕЗ РІЧКУ БАЛАКЛІЙКА НА АВТОМОБІЛЬНІЙ ДОРОЗІ О-210103 БАЛАКЛІЯ – ЯКОВЕНКОВЕ КМ 3+155

Анотація. У роботі наведено результати технічного обстеження мосту через річку Балаклійка, пошкодженого внаслідок бойових дій, та обґрунтовано комплекс технологічних рішень з його капітального ремонту. Запропоновано підхід до демонтажу зруйнованих конструкцій, відновлення несучих елементів та модернізації мостового полотна з урахуванням сучасних нормативних вимог.

Ключові слова: міст, відновлення, капітальний ремонт, прогонові будови, опори, гідроізоляція, водовідведення.

Мости є ключовими елементами транспортної інфраструктури держави, що забезпечують безперервність транспортних потоків, економічні зв'язки та соціальну стабільність регіонів. Руїнування мостових споруд унаслідок бойових дій створює суттєві перешкоди для логістики, гуманітарного забезпечення та розвитку територій. У зв'язку з цим особливого значення набуває відновлення пошкоджених штучних споруд із використанням сучасних технологій ремонту та підвищення довговічності конструкцій.

Міст через річку Балаклійка розташований на км 3+155 автомобільної дороги загального користування місцевого значення О-210103 Балаклія – Яковенкове на межі м. Балаклія та с. Вербівка Харківської області. Автомобільна дорога належить до IV технічної категорії та забезпечує транспортне сполучення між населеними пунктами регіону.

Споруда побудована у 1973 році та zaproєктована для пропуску двох смуг руху автомобільного транспорту і пішоходів. Міст має схему 3×12 м, довжину 36 м і ширину 10,15 м. Ширина проїзної частини становить 7,75 м, передбачено два тротуари шириною 1,11 м. Розрахункові навантаження мосту відповідали схемам Н-30 та НК-80.

За результатами натурного обстеження встановлено, що внаслідок бойових дій споруда зазнала значних руйнувань, у зв'язку з чим рух транспорту і пішоходів повністю припинено. Вантажопідйомність мосту визначити неможливо через пошкодження основних несучих елементів. Залишковий ресурс споруди становить 0 років.

Прогонові будови мосту виконані зі збірних залізобетонних плит довжиною 12 м, об'єднаних методом шпонкового омонолічування. У поперечному перерізі кожна прогонова будова складається з десяти плит. Опори мосту – залізобетонні стійкові дворядні, об'єднані монолітними ригелями.

Під час обстеження встановлено повне руйнування мостового полотна на прогонах №1–2 та №2–3. Конструкції прогонових будов частково обвалені у підмостовий простір, спостерігається оголення арматури та інтенсивна корозія бетону. Гідроізоляція повністю втратила функціональні властивості, а деформаційні шви пропускають воду.

На опорах зафіксовано руйнування ригеля опори №2, утворення тріщин шириною до 20 мм, вилуговування цементного каменю та сліди біологічної корозії. Підмостове русло засмічене уламками конструкцій, що ускладнює гідравлічні умови роботи споруди. Підходи до мосту мають численні дефекти дорожнього покриття.

Комплекс відновлювальних робіт передбачає виконання підготовчого етапу, який включає розмінування території та розчищення підмостового простору. Це є обов'язковою умовою безпечного виконання подальших будівельних робіт.

Демонтажні роботи передбачають видалення зруйнованих конструкцій мостового полотна, плит прогонових будов і частини опори №2. Особливу увагу приділено поетапності

демонтажу для запобігання додатковим пошкодженням конструкцій, що зберегли працездатність.

Відновлення опор включає ремонт ригелів і стійок, відновлення захисного шару бетону та нанесення сучасних гідроізоляційних покриттів. Використання нових матеріалів дозволяє підвищити довговічність конструкцій та зменшити вплив агресивних факторів навколишнього середовища.

Відновлення прогонових будов передбачає встановлення нових балок за модернізованою конструктивною схемою. Передбачається улаштування монолітної об'єднувальної температурно-нерозрізної плити, що підвищує просторову жорсткість споруди та покращує її експлуатаційні характеристики.

Важливою складовою ремонту є улаштування нового мостового полотна з сучасною гідроізоляцією, деформаційними швами та системою водовідведення. Впровадження ефективної системи водовідведення дозволяє запобігти зволоженню конструкцій та розвитку корозійних процесів.

Також передбачено встановлення бар'єрного та перильного огороження, відновлення підходів до мосту та забезпечення належного сполучення споруди з автомобільною дорогою.

Реалізація запропонованих заходів дозволить відновити експлуатаційну придатність мосту та забезпечити пропуск транспортних навантажень відповідно до чинних нормативів. Крім того, застосування сучасних технологій захисту конструкцій сприятиме збільшенню терміну служби споруди.

Таким чином, капітальний ремонт мосту через річку Балаклійка є комплексним інженерним завданням, спрямованим на відновлення транспортної інфраструктури регіону. Реалізація проекту забезпечить безпечний рух транспорту та підвищить надійність мостової споруди в довгостроковій перспективі.

Література

1. Проміжний звіт про виконану роботу «Науково-технічний супровід виконання робіт на об'єкті: Капітальний ремонт мосту через р. Балаклійка на автомобільній дорозі О-210103 Балаклія-Яковенкове, км 3+155». – Харків: ХНАДУ, 2023. – 90 с..
2. ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016. Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб. – К.: Мінрегіон України, 2016..
3. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009..
4. Кваша В. Г. Продвинуті методи підсилення залізобетонних мостів / В. Г. Кваша, В. П. Коваль. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021.
5. Radomski W. Bridge Rehabilitation / W. Radomski. – London: ImperialCollegePress, 2022.
6. Бугаєвський С. О. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів після бойових пошкоджень / С. О. Бугаєвський, К. В. Бережна // Вісник ХНАДУ. – 2023. – № 102..

СИСТЕМНІ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГІДРОІЗОЛЯЦІЇ МОСТІВ: ІНЖЕНЕРНІ ТА НОРМАТИВНІ АСПЕКТИ

Анотація: У статті розглянуто проблеми забезпечення надійності гідроізоляції мостів, що пов'язані з невідповідністю між експлуатаційними умовами роботи конструкцій, методами випробування матеріалів та розвитком нормативної бази. Показано необхідність узгодження інженерних, нормативних та експериментальних підходів для підвищення довговічності мостових споруд.

Ключові слова: гідроізоляція мостів, надійність, експлуатаційні впливи, методи випробування, системність.

Гідроізоляція є одним із ключових елементів забезпечення довговічності мостових споруд, оскільки визначає рівень захисту конструкцій від впливу води, агресивних середовищ і температурних коливань. Виконуючи функцію забезпечення довговічності несучих конструкцій, гідроізоляція відноситься до елементів недовговічних і тому дослідження питань щодо покращення конструктивних рішень та матеріалів для неї тривають в Україні протягом багатьох років [1-8]. Ремонт та відновлення гідроізоляції при втраті нею захисних властивостей, вимагають значних матеріальних та трудових витрат, пов'язаних з видаленням пошкоджених шарів дорожнього одягу, з обмеженням руху по споруді в період ремонту, з заміною на новий варіант та з улаштуванням комплексу шарів дорожнього одягу та дренажних пристроїв.

Незважаючи на розвиток матеріалів і технологій гідроізоляції, проблема забезпечення її надійності залишається актуальною. Критерії вибору матеріалів для гідроізоляції мостів, які пропонуються в сучасній нормативній літературі, не враховують комплексного впливу зовнішніх факторів на етапі експлуатації на неї при сумісній роботі з мостовими конструкціями, що ускладнює обґрунтований вибір матеріалу.

Аналіз експлуатації мостів свідчить про наявність системних недоліків, що проявляються у передчасному руйнуванні гідроізоляційних шарів. Однією з основних причин є невідповідність між реальними умовами роботи конструкцій та підходами до оцінювання властивостей матеріалів. Існуючі методи випробувань, як правило, орієнтовані на визначення окремих характеристик і не відображають комплексного впливу експлуатаційних факторів, таких як температурні деформації, вологість, дія солей та динамічні навантаження. Це призводить до скорочення терміну служби конструктивних елементів мостового полотна. Важливою особливістю є те, що гідроізоляція функціонує не як окремий матеріал, а як елемент конструктивної системи, во взаємодії з покриттям проїзної частини та несучими елементами. У зв'язку з цим оцінювання її ефективності повинно базуватися на врахуванні роботи в складі конструкції.

Ще на початку 2000-х років у наукових дослідженнях було обґрунтовано необхідність урахування роботи гідроізоляції в складі конструкції та впливу реальних експлуатаційних факторів на її довговічність. Зокрема, відповідні підходи були сформульовані у дисертаційних дослідженнях, присвячених удосконаленню гідроізоляції проїзної частини залізобетонних мостів [8].

У попередніх нормативних документах (до 2020 р) були спроби врахування особливостей роботи гідроізоляції в складі конструкції. Так, у ВБН В.2.3-218-197:2005 (розробники-кафедра будівництва та експлуатації доріг та кафедра мостів ХНАДУ), акцентовано увагу на необхідності врахування роботи гідроізоляції в системі конструкції при визначенні критеріїв вибору, та на обмеженості існуючих методів випробувань [9]. У

відповідному Звіті до вказаної роботи наводились приклади зарубіжних стандартів та приладів щодо методів випробування гідроізоляційних матеріалів згідно з подальшими їх умовами роботи сумісно з конструкцією.

Однак у подальших вітчизняних нормативних документах [10] ці підходи не отримали розвитку, що свідчить про відсутність наступності у формуванні нормативної бази. Це, у свою чергу, зумовлює повторне виникнення питань, зокрема в статті [7], що вже були предметом наукових досліджень.

Таким чином, проблема забезпечення надійності гідроізоляції мостів має системний характер і пов'язана з необхідністю узгодження інженерних рішень, методів експериментальних досліджень та нормативної бази.

Висновки: Забезпечення надійності гідроізоляції мостів потребує переходу від фрагментарного підходу до системного, що передбачає:

- врахування роботи матеріалу в складі конструкції;
- удосконалення методів випробувань з урахуванням експлуатаційних впливів;
- забезпечення наступності та узгодженості нормативної бази.

Література.

1. Джигіт С.Г., Родін Ю.А., Кузьміна Н.А., Гнатюк Е.М., Джигіт А.Д. Надійний гідроізоляційний захист-запорука довговічності транспортних споруд. *Автошляховик України*. 2001. №2. С.39-41.
2. Назаренко Б.П., Безбабічева О.І. До питання про вплив деяких елементів проїзної частини мостів на їх довговічність. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1982. вип. 31. С. 107-109.
3. Безбабічева О. І., Бережна К. В., Жданюк К. В. Сучасні конструктивні і технологічні рішення мостового полотна автодорожніх мостів із ефективними варіантами гідроізоляційного захисту. *Вісник ХНАДУ*. Харків. 2002. С. 142-144.
4. Поживотько О.М. Проектування і розрахунок покриття проїзної частини автодорожніх мостів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2004. вип.69. С.199-202.
5. Коваль П.М., Бабяк І.П., Мозговий В.В., Онищенко А.М. Дослідження властивостей гідроізоляційних матеріалів для плит мостів на експериментальному об'єкті. *Дороги і мости*. Київ, 2009. Вип. 11. С. 146-156.
6. Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Методика визначення втрати міцності зчеплення гідроізоляційного матеріалу між асфальтобетоном і цементобетонною основою при зсуві після впливу водоморозних факторів. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2013. Вип. 50. С. 103–106.
7. Бабяк І. П. Гідроізоляція проїзної частини автодорожніх мостів — важливий елемент забезпечення надійності. *Дороги і мости*. Київ, 2026. Вип. 33. С. 190–201.
8. Безбабічева О. І. Удосконалення гідроізоляції проїзної частини залізобетонних мостів на автомобільних дорогах : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.11. Харків, 2005.
9. ВБН В.2.3-218-197-2005 Споруди транспорту. Проектування та влаштування гідроізоляції залізобетонних мостових споруд (початок дії 01.07.2005; дата скасування 01.10.2020)
10. ДСТУ 8904:2019 Настанова з улаштування гідроізоляції проїзної частини автодорожніх мостів(Дата прийняття: 15.10.2019)

Сергій Бугаєвський
д.т.н., професор кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки
ім. В.О. Російського
ХНАДУ, Україна
Андрій Алексєєв
голова Служби відновлення та розвитку інфраструктури
у Харківській області
e-mail: bugaevskiysa@gmail.com, тел. +3805093790165

ТИМЧАСОВІ МОСТИ КОМПАНІЇ JANSON BRIDGING (США)

Анотація. У роботі розглянуто аналіз сучасних конструкцій тимчасових мостів виробництва компанії Janson Bridging (США). Конструктивні рішення тимчасових мостів прийняти з урахуванням особливостей конкретних матеріалів та за вимогами STANAG 2021.

Ключові слова: тимчасовий міст, довжина прогону, компанії Janson Bridging, STANAG 2021.


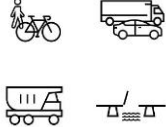

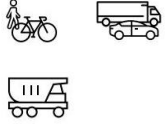









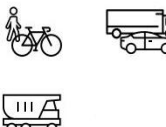

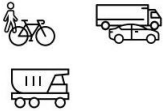
Тимчасові мости набули широкого застосування в Україні після початку повномасштабного вторгнення Російської Федерації на нашу територію. Різні конструкції тимчасових мостів широко застосовуються для відновлення сполучення через водні перешкоди після руйнації постійних мостів у ході чотирьох річної війни з агресором. Більшість країн світу разом з військовою допомогою передають до нашої країни тимчасові збірно-розбірні мости різних компаній виробників (Франція, Німеччина, Чехія, Норвегія тощо). Тимчасові мости мають різні роз'ємні монтажні з'єднання (болтові, шарнірні, замкові тощо) та їх можна багаторазово використовувати, як інвентарні, протягом визначеного терміну експлуатації [1-4].

Типові конструкції тимчасових мостів компанії Janson Bridging (США) можуть бути запропоновані для використання при різних проблемах. Всі тимчасові мости компанії Janson Bridging розроблені та створені досвідченими інженерами відповідно до стандартів Єврокоду. З моменту заснування в 1972 році компанія Janson Bridging надала тисячі рішень для клієнтів по всьому світу [5].

Завдяки можливості багаторазового застосування модульних тимчасових мостів, компанія працює в циклічному процесі виробництва вже більше 50 років. По-перше, все починається з підготовки пропозиції, яка розробляється і розраховується інженерами компанії на основі вимог замовника. По-друге, обов'язково виконується попереднє збирання обраних конструкцій для забезпечення ефективної, економічної та безпечної установки на місці. Для орендованих тимчасових мостів періодично надаються послуги з інспекції та, за необхідності, технічного обслуговування. Після закінчення терміну оренди мостова конструкція демонтується, а її деталі повертаються на склад для ретельної інспекції та необхідного ремонту перед повторним використанням.

Компанія Janson Bridging має відповідне модульне рішення для мостів для будь-якої ситуації. Огляд показує, що їх рішення для тимчасових мостів можуть бути адаптовані до різних вимог. Покажемо можливість застосування різних конструкцій тимчасових мостів для оптимізації рішень та додати цінності виконаному проєкту (табл. 1). Компанія пропонує асортимент мостів на основі STANAG 2021, завдяки якому військові завжди мають у своєму розпорядженні потрібний міст у потрібний час. Забезпечують підтримку в галузі інженерії, технічного обслуговування, інспекції та навчання (рис. 1).

Таблиця 1. Характеристики тимчасових збірно-розбірних мостів компанії Janson Bridging (США)

Тип мосту	Зображення	Довжина прогону, м	Вид навантаження	Тип мосту	Зображення	Довжина прогону, м	Вид навантаження
JMB		20		JGB		60	
JSK-JBB		24		JPB-P		61	
JFB		40		JPB-T		70	
JSB		54		JTB		100	

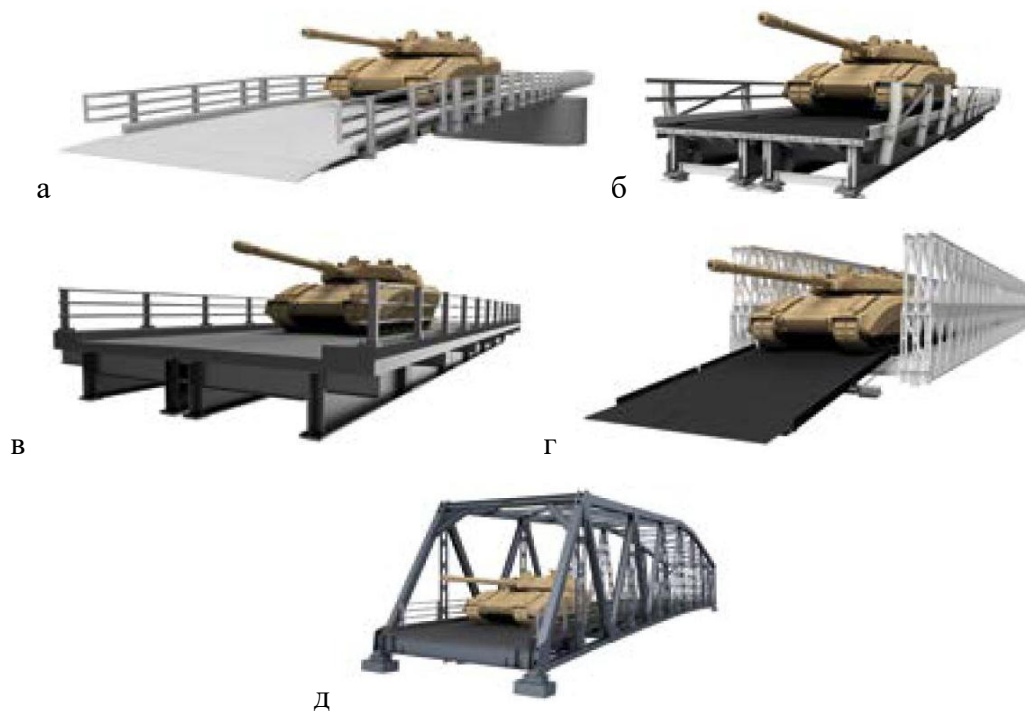


Рис. 1. Типи військових мостів компанії Janson Bridging (США)

JANSON DEFENCE SERVICES пропонує військовим унікальну пропозицію з навчання та тренування у використанні новітніх мостів.

Проведено аналіз сучасних конструкцій тимчасових мостів виробництва компанії Janson Bridging (США). Конструктивні рішення тимчасових мостів прийняти з урахуванням особливостей конкретних матеріалів. Ці конструкції мають великий потенціал і можуть знаходити застосування для тимчасових пішохідних й автодорожніх мостів у нашій країні для цивільного та військового призначення. Для створення типових конструкцій тимчасових мостів вітчизняного виробництва необхідно урахування всебічного досвіду провідних компаній світу. Для прогонової будови тимчасового мосту найбільш раціонально застосування металевих двотаврових балок в умовах військової агресії Російської Федерації проти України.

Література

1. Рекомендації щодо конструктивних рішень для відбудови пошкоджених мостів і труб. К.: ДерждорНДІ, 2022. 167 с.
2. Сайт Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. <http://ukravtodor.gov.ua/> .
3. Бугаєвський С.О. Відновлення мостів і труб після пошкодження. Аварії мостів : навчальний посібник / С.О. Бугаєвський, Т.О. Ненастіна, К.В. Бережна, С.М. Краснов, В.О. Бугаєвський. Кременчук: NOVABOOK, 2024. 252 с.
4. МР В.2.3-37641918-940:2024. Методичні рекомендації щодо проектування та влаштування тимчасових автомобільних доріг і мостів. К. : 2024. 58 с.
5. Сайт компанії Janson Bridging (США). URL: <https://www.jansonbridging.com/en/home> (дата звернення 12.04.2026 р.)

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-АніЗОТРОПНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. У статті наведено чисельне дослідження НДС захисної підземної споруди, виконаної у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки 9 м х 9 м з полістирольними вкладишами та з металевим листом у нижньому поясі $\delta=10$ мм.

Ключові слова: чисельне дослідження, НДС, захисна підземна споруда.

В ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного призначення» зазначають, що захисні споруди та споруди подвійного призначення проєктуються та будуються таким чином, щоб протягом певного часу (до 48 годин) створити належні умови для перебування людей, що підлягають укриттю, та забезпечити їх захист шляхом виключення або зменшення прогнозованих впливів небезпечних чинників, які можуть виникнути як складова частина небезпечних явищ надзвичайної ситуації, воєнних (бойових) дій та терористичних актів.

Ступінь захисту характеризується захисними властивостями захисних споруд, що для небезпечних чинників застосування зброї масового та загального ураження передбачають послаблення радіаційного впливу та захисту від впливу прогнозованого вибуху шляхом забезпечення механічного опору та стійкості конструкцій від ураження уламками та дії рівномірно-розподілених навантажень:

- для зброї масового ураження – надмірний тиск вибухової хвилі, що положеннями норм приводяться до квазістатичного (еквівалентного) рівномірно-розподіленого тиску від 100 кПа до 500 кПа (залежно від класу або групи захисної споруди або споруди подвійного призначення);

- для засобів звичайного ураження (засоби повітряного ураження, що включають ракети різних типів та боеприпаси реактивних систем залпового вогню та артилерійських снарядів) – надмірний тиск вибухової хвилі, що положеннями цих норм приводяться до квазістатичного (еквівалентного) рівномірно-розподіленого навантаження 100 кПа.

Згідно ДБН В.2.6-160:2010 (зі змінами 2020) при розрахунку конструкцій необхідно розглядати такі розрахункові ситуації:

- стала (постійна), яка має тривалість того ж порядку, що і строк служби будівельного об'єкта;

- перехідна (тимчасова), яка має невелику у порівнянні зі строком служби будівельного об'єкта тривалість;

- особлива (аварійна), яка має невелику ймовірність появи та невелику тривалість, але є важливою з точки зору досягнення граничних станів, що можуть виникнути у цьому разі.

Мета - розробити розрахунки напружено-деформованого стану конструктивно-анізотропних підземних конструкцій у вигляді оболонки 9м х 9м від дії зосередженого навантаження 1 т/м^2

Раніше в процесі дослідження визначено, що, якщо висота оболонки $H \approx 3,8$ м (для розглянутих конкретних умов), потенційна енергія деформації (ПЕД) досягає нижньої межі, враховані дослідження, що взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропній оболонці між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів за величини кроку ребер орієнтовно до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі.

Методи дослідження – метод скінчених елементів у процесі чисельного моделювання роботи конструкції, класичні та чисельні методи механіки твердого тіла, що деформується.

Розрахунки проводились у програмному комплексі «Ansys» з використанням модуля «Static Structural». Побудовано тривимірну кінцево-елементну модель, яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан конструкцій. Модель оболонки налічує 45644 вузлів і 7484 кінцевих елементів. Реалізоване 3D-моделювання арочної конструкції (рис. 1, 2) та приведені результати чисельного експерименту в таблиці 1.

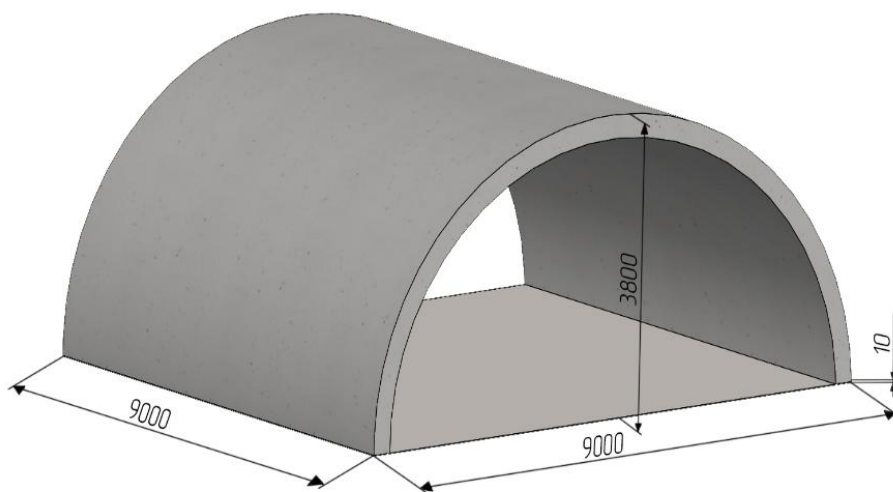
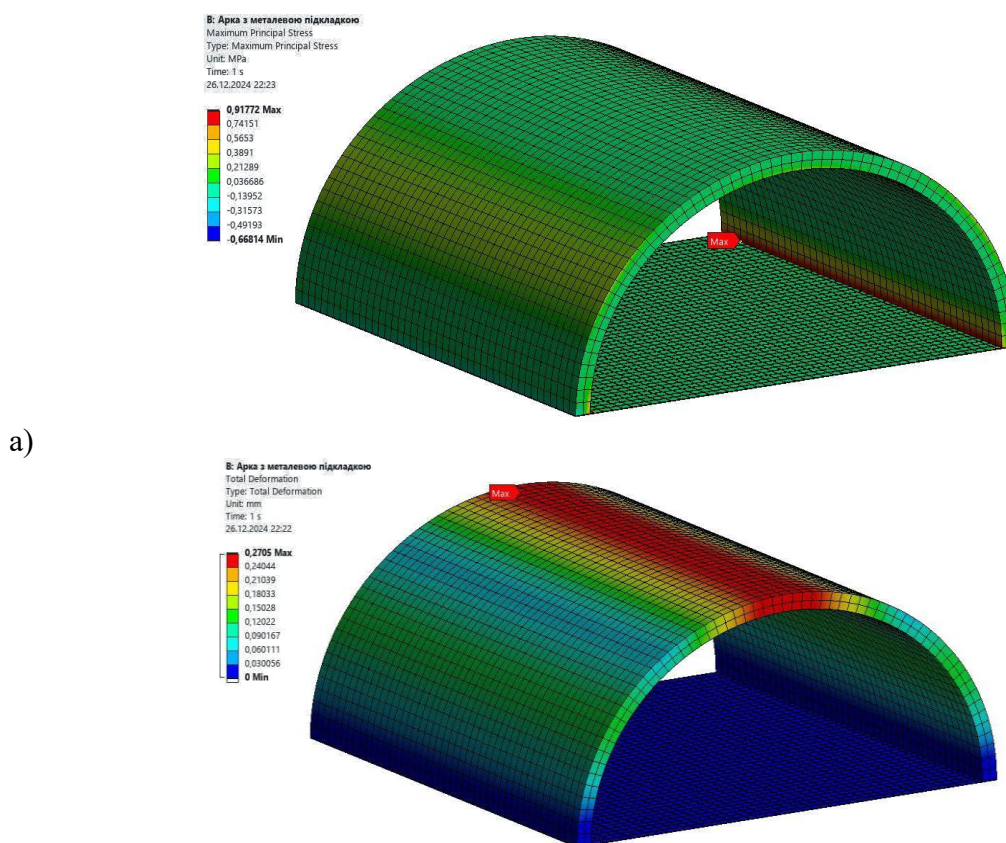


Рис. 1. Конструктивно-анізотропна підземна захисна споруда.



б) Рис. 2. Напруги(а) та деформація (б) підземної споруди від дії зосередженого навантаження 1 т/м^2

Таблиця 1. Зведена таблиця одержаних результатів.

Параметри	Конструктивно-анізотропна оболонка 9мх9м з полістирольними вкладишами та з металевим листом у нижньому поясі $\delta=10$ мм.
Геометрія (довжина, ширина, висота), м	9х9х3,8
Максимальні напруги від власної ваги, МПа	0,831 МПа
Максимальні напруги від власної ваги та снігового покриву, МПа	1,033 МПа
Максимальні деформації від власної ваги, мм	0,24 мм
Максимальні деформації від власної ваги та снігового покриву, мм	0,3 мм
Максимальні деформації від зосередженого навантаження 1 т/м ²	0,271 мм
Максимальні напруги від зосередженого навантаження 1 т/м ²	0,917 МПа

Висновки. Проведено чисельне дослідження НДС захисної підземної споруди, виконаної у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки 9мх9м з полістирольними вкладишами та з металевим листом у нижньому поясі $\delta=10$ мм. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів (МСЕ) в спеціалізованих програмних комплексах «Autodesk Inventor» та «Ansys» з використанням модуля «Static Structural».

ІНТЕГРАЦІЯ BrIM-ПІДХОДІВ ДО ПРОЄКТУВАННЯ МОСТОВИХ СПОРУД В КОНТЕКСТІ BIM-МЕНЕДЖМЕНТУ ТА НАЦІОНАЛЬНОЇ СТАНДАРТИЗАЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто особливості узгодження технології Bridge Information Modeling (BrIM) із сучасними підходами BIM-менеджменту та чинною нормативною базою України у сфері інформаційного моделювання. Актуальність теми зумовлена потребою у відновленні та модернізації мостових споруд, підвищенні якості проектних рішень, а також необхідністю впорядкування інформаційних процесів протягом усього життєвого циклу інфраструктурних об'єктів. На основі матеріалу дослідження щодо BrIM, BIM-менеджменту та положень ДСТУ ISO/TS 12911:2020, ДСТУ ISO 19650 і ДСТУ 9339:2025 встановлено, що ефективне впровадження BrIM потребує не лише спеціалізованого програмного забезпечення, а й формалізованих правил управління інформацією, структурування даних, використання Common Data Environment та стандартизації спільної роботи. Обґрунтовано, що BrIM доцільно розглядати як галузеву інтерпретацію BIM для мостових споруд, а національні стандарти — як основу переходу від локального цифрового моделювання до системного управління даними, рішеннями та експлуатаційною інформацією.

Ключові слова: BrIM, BIM, мостові споруди, BIM-менеджмент, CDE, управління інформацією, життєвий цикл, стандартизація.

Мостові споруди є критично важливими елементами транспортної інфраструктури, від стану яких залежить безперервність перевезень, економічна стійкість регіонів та обороноздатність держави. В Україні значна кількість мостів потребує реконструкції, підсилення або повного відновлення, що особливо загострилося внаслідок воєнних руйнувань та тривалого фізичного зносу існуючих конструкцій. За таких умов традиційні підходи до проєктування та супроводу інфраструктурних об'єктів виявляються недостатньо ефективними, оскільки не забезпечують належного рівня координації даних, прозорості рішень і безперервності інформації між стадіями життєвого циклу споруди.

Одним із перспективних рішень є використання технології BrIM як спеціалізованого напрямку інформаційного моделювання для мостових споруд. У поданому дослідженні BrIM розглядається як цифрова модель мосту, що містить геометричні, конструктивні, технологічні та експлуатаційні дані й забезпечує їхнє використання під час проєктування, будівництва, експлуатації та обслуговування споруди. Такий підхід особливо важливий для мостів зі складною геометрією, великим строком служби та необхідністю накопичення історії змін у конструкції. Водночас практика впровадження BIM свідчить, що сама наявність цифрової моделі ще не гарантує ефективного результату. BIM — це не лише тривимірна модель, а насамперед організований процес управління інформацією, який потребує технічної інфраструктури (програмних засобів, серверів, хмарних сервісів), якісних вихідних даних, компетентних фахівців і чітких правил організації спільної роботи. Саме тому питання узгодження BrIM із сучасними стандартами BIM-менеджменту є актуальним як у науковому, так і в прикладному аспекті. BrIM є логічним розвитком BIM-технологій для сфери мостобудування. На відміну від універсальних BIM-підходів, орієнтованих переважно на будівлі, BrIM враховує специфіку лінійних інфраструктурних об'єктів, для яких визначальними є осі, траси, поверхні, прольоти, опори, деформаційні шви, зв'язок із дорожнім полотном та складні просторові форми. BrIM забезпечує кращий доступ до інформації,

інтеграцію даних та прозорість процесів прийняття рішень, а також створює передумови для формування цифрового двійника мостової споруди.

Особливий акцент постає на проблемі відсутності стандартів навіть на базовому рівні: назви файлів, внутрішня структура даних, правила обміну моделями та контроль змін часто залишаються неуніфікованими. Для мостових проєктів така ситуація є критичною, оскільки тут взаємодіє значна кількість дисциплін, а помилки в даних можуть призводити до серйозних технічних і фінансових наслідків.

У цьому контексті важливим є узгодження BrIM із ДСТУ ISO/TS 12911:2020. Цей стандарт задає рамкову структуру для розроблення BIM-стандартів і настанов, тобто дозволяє формувати системні вимоги до моделі, складу даних, рівня деталізації, координації та перевірки інформації.

Для BrIM це означає можливість переходу від окремих цифрових рішень до галузево орієнтованої BIM-настанови для мостових споруд, яка б визначала вимоги до геометрії, класифікації елементів, атрибутів, стадійності моделювання та подальшого використання інформації в експлуатації. Це особливо важливо в умовах, коли типові BIM-рішення для будівель не повністю відповідають специфіці мостів.

Стандарти серії ДСТУ ISO 19650 уточнюють цей підхід на процесному рівні. Вони орієнтують на управління інформацією протягом життєвого циклу активу та вимагають організованого середовища спільної роботи (Common Data Environment). Для мостових споруд це має особливе значення, оскільки саме CDE дозволяє поєднати в єдиному інформаційному просторі проєктні рішення, результати обстежень, моделі конструкцій, креслення, специфікації, зауваження та дані подальшого моніторингу.

Важливим кроком для національної практики є також ДСТУ 9339:2025, який конкретизує методи організації структури інформаційних контейнерів, спільної роботи та процесів керування даними з використанням BIM.

У застосуванні до BrIM це означає можливість впорядкувати файли, моделі, креслення, звітність, дані технічних оглядів і дефектні відомості в єдиній структурі, придатній для перевірки, передачі та повторного використання. Таким чином, ДСТУ 9339:2025 можна розглядати як практичний інструмент реалізації положень BIM-менеджменту та стандартів ISO в українських умовах.

Отже, проведений аналіз дає підстави стверджувати, що BrIM, BIM-менеджмент і національна стандартизація не є відокремленими напрямками, а формують єдину логіку цифрової трансформації мостобудування. BrIM визначає предметну специфіку моделі для мостів, BIM-менеджмент забезпечує організацію інформаційних процесів, а ДСТУ ISO/TS 12911:2020, ДСТУ ISO 19650 і ДСТУ 9339:2025 створюють нормативну основу для впорядкування цих процесів у проєктній і експлуатаційній практиці.

Поєднання BrIM, принципів BIM-менеджменту та вимог національних стандартів створює передумови для більш ефективного проєктування, будівництва, реконструкції та експлуатації мостових споруд в Україні, що є особливо важливим у контексті післявоєнного відновлення транспортної інфраструктури.

Література

1. Безбабічева, О., Вербицький, К., & Розенфельд, М. (2023). УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ ВІДНОВЛЕННЯ МОСТІВ В СУЧАСНИХ УМОВАХ. *Grail of Science*, (29), 404–408. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.07.2023.069>

2. Безбабічева, О., Вербицький, К., (2024). BIM-технології: перспектива та можливості для студентів напряму «мости і транспортні тунелі». Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції

“INNOVATIVE DEVELOPMENT OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND EDUCATION”, (11-13.04.2024, Ванкувер, Канада), 137-139. URL:<https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovative-development-of-science-technology-and-education-11-13-04-2024-vankuver-kanada-arhiv/>.

3.ДСТУ ISO/TS 12911:2020. Структура стандартів будівельного інформаційного моделювання (BIM).

4.ДСТУ ISO 19650-1:2020. Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням BIM. Частина 1. Концепції та принципи.

5.ДСТУ ISO 19650-2:2020. Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням BIM. Частина 2. Стадія delivery активів.

6.ДСТУ 9339:2025. Настанова щодо методів організації структури інформаційних контейнерів, спільної роботи та процесів з використанням будівельного інформаційного моделювання (BIM). Керування даними.

7.Білов, В., & Левченко, О. (2024). BIM ЯК АНАТОМІЯ ДЛЯ БУДІВЛІ. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування, (70), 32–45. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2024.70.32-45>

8.Bartholomew M., Blasen B., Кос А. Bridge information modeling (BrIM) using open parametric objects. USA: Federal Highway Administration. Oce of Infrastructure, 2015. No. FHWA-HIF-16-010.

9.Dhvani Badheka. Changing the game with BIM for Bridges – BrIM. (2024). Вилучено з <https://www.bimservicesindia.com/blog/changing-the-game-with-bim-for-bridges-brim/>

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ОБГРУНТУВАННЯ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО МОСТУ ЧЕРЕЗ Р. В. БУРЛУК

Анотація. У роботі проведено комплексний аналіз технічного стану залізобетонного мосту, що потребує капітального ремонту внаслідок тривалої експлуатації та деградації конструктивних елементів. На основі результатів натурних обстежень систематизовано критичні дефекти тримальних конструкцій та оцінено ступінь їхнього впливу на безпеку експлуатації. Визначено перспективні напрями проведення капітального ремонту, орієнтовані на ліквідацію конструктивних недоліків розрізних систем та подовження безремонтного терміну служби споруди.

Ключові слова: капітальний ремонт мосту, технічний стан, залізобетонні конструкції, температурно-нерозрізна плита, науково-технічний супровід.

На сьогоднішній день значна частина мостових споруд на автомобільних дорогах загального користування України перебуває у стані, що потребує невідкладного технічного переоснащення. Тривала експлуатація залізобетонних мостів, збудованих у другій половині минулого століття, призвела до накопичення критичних дефектів, викликаних карбонізацією бетону, корозією арматури та невідповідністю фактичних навантажень проектним нормам. Мости через малі річки, як-от В. Бурлук, відіграють ключову роль у сполученні населених пунктів, проте їхній технічний стан часто не відповідає вимогам безпеки через деградацію залізобетону. [4].

Мета дослідження полягає у проведенні детального аналізу технічного стану мосту через р. В. Бурлук, виявленні закономірностей руйнування його елементів та обґрунтуванні концептуальних напрямів капітального ремонту для відновлення експлуатаційної придатності споруди.

Аналіз технічного стану проводився шляхом візуально-інструментального обстеження основних конструктивних вузлів. Проведене натурне обстеження виявило глибоку деградацію всіх основних конструктивних вузлів мосту, що зумовлено як тривалим терміном експлуатації, так і наслідками бойових дій. Фактичний стан споруди не відповідає чинним нормативним вимогам, що створює пряму загрозу для безпеки руху та критично знижує тримальну здатність об'єкта [1].

Систематизація результатів обстеження дозволила виділити шість ключових груп пошкоджень та оцінити експлуатаційний стан елементів мосту у відповідності до ДСТУ 9181:2022 [2]:

1. Мостове полотно та елементи безпеки. Спостерігається тотальна деструкція конструктивних шарів полотна, особливо на ділянках прогонів №1-2 та №2-3. Гідроізоляційний бар'єр проїзної частини повністю вичерпав свій ресурс, що робить споруду вразливою до атмосферних опадів. Металеві елементи перил мають ознаки глибокої корозії та механічних деформацій, а на окремих ділянках огороження повністю відсутнє, що є критичним порушенням норм безпеки. Оцінка: Стан 5 – непрацездатний.

2. Несучі прогонові будови. Технічний стан прогонів характеризується як критичний. Прогонова будова №1-2 зруйнована повністю, а на ділянці №2-3 зафіксовано пошкодження більшості плит. На фасадних гранях плит (зокрема П7) виявлено вертикальні силові тріщини з розкриттям до 5 мм. Наявні численні сліди замокання бетону, що супроводжуються активною біологічною корозією. Оцінка: Стан 5 – непрацездатний.

3. Опори та опорні частини Зафіксовано серйозні морфологічні зміни тіла опор: ригельні блоки опори №2 мають ознаки фізичного руйнування, а конструкція опори №1 повністю похована під завалами/грунтом. По всій площі залізобетонних елементів (особливо на ригелях)

спостерігається капілярне підняття вологи, що призводить до хімічного розкладання структури бетону. Оцінка: Стан 5 – непрацездатний.

4. Фундаменти опор мосту Оскільки прямий візуальний доступ до фундаментів обмежений, аналіз проводиться за непрямыми ознаками — станом надфундаментних частин та ригелів. Відсутність специфічних похилих тріщин у тілі опор та збереження вертикальності стійок свідчить про стабільність основ. Ознак нерівномірного просідання чи зсувів фундаментів не виявлено. Оцінка: Стан 3 – працездатний.

5. Підмостовий простір та регуляційні споруди Гідротехнічний стан об'єкта ускладнений захаращенням русла р. В. Бурлук уламками зруйнованих конструкцій мосту, що створює штучні перепони для вільного пропуску води. Льодорізи біля опор №2 та №3 зруйновані, що в період весняного паводку може призвести до непередбачуваних пошкоджень стійок опор льодовими масами. Оцінка: Стан 3 – працездатний (із зауваженнями щодо пропускну здатності).

6. Дорожні підходи та бар'єрне огородження Стан підходів з боку магістралі М-03 є незадовільним: дорожнє покриття вкрите глибокими вибоїнами та тріщинами, що спричиняє значні динамічні навантаження на споруду при в'їзді транспорту. Відсутність частини бар'єрного огородження на підходах не забезпечує нормативного рівня безпеки для утримання автомобілів у межах полотна. Оцінка: Стан 4 – обмежено працездатний.

На основі інтегрального рейтингу за ДСТУ 9181:2022 [2], стан мосту в цілому класифікується як 5 (непрацездатний), а його подальша експлуатація без капітального ремонту є неможливою.

Для відновлення транспортного сполучення та гарантування безпеки руху рекомендовано проведення капітального ремонту, який передбачає повний демонтаж непридатних конструкцій, посилення існуючих опор та влаштування сучасної монолітної температурно-нерозрізної плити [3]. Це дозволить ліквідувати слабкі місця споруди – деформаційні шви над проміжними опорами, які є головним джерелом руйнування ригелів.

Таким чином, впровадження запропонованих інженерних рішень дозволить не лише відновити геометричні параметри мосту, а й значно підвищити його енергоефективність та стійкість до агресивних факторів довкілля завдяки застосуванню сучасних гідроізоляційних матеріалів. Очікується, що модернізована споруда забезпечить безперешкодний пропуск великогазового транспорту за схемами Н-30 та НК-80. Крім того, створення монолітної об'єднуючої конструкції мінімізує витрати на майбутнє утримання об'єкта, оскільки суттєво уповільнює деградаційні процеси в несучих елементах. Реалізація даного підходу є критично важливою для стабілізації логістичних маршрутів регіону та гарантування довгострокової експлуатаційної надійності штучної споруди в межах дорожньої мережі О-212648.

Література

1. Проміжний звіт про НДР «Науково-технічний супровід виконання робіт на об'єкті: Капітальний ремонт мосту через р. В. Бурлук на км 20+057 автомобільної дороги О-212648». – Харків: ХНАДУ, 2023. – 77 с.

2. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Чинний від 01.01.2023. 2023.– К.: ДП «УкрНДНЦ», 2023.

3. Кваша В. Г. Технічні рішення реконструкції моста із збірними залізобетонними попередньо напруженими прольотними будовами / В. Г. Кваша, Л. В. Салійчук, В. Т. Котенко. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 135-140. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2015_823_24

4. Ненастіна Т. О., Бережна К. В., Сахненко М. Д., Бугаєвський С. О. Деградація залізобетонних конструкцій мостових споруд: корозійний аспект. Міжнародний науково-технічний журнал «Фізико-хімічна механіка матеріалів», Том 59, №5, 2023. С. 24-31. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2023_59_5_6

Олександр Забіяка
к.т.н., викладач відділення «Транспортного будівництва»,
ВСП КФК СумДУ, Україна
e-mail: zabiayaka08051979@gmail.com, тел. +380635488625

СТАН МОСТУ ЧЕРЕЗ Р. БАЛАКЛІЙКА НА АВТОМОБІЛЬНІЙ ДОРОЗІ БАЛАКЛІЯ-ЯКОВЕНКОВЕ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ТА ЙОГО ВІДНОВЛЕННЯ НА СТАРІЙ ОСІ

Анотація. У роботі проведено аналіз технічного стану трипрогонового залізобетонного мосту, пошкодженого внаслідок бойових дій. Розглянуто його стан під час обстеження та як відбувалось відновлення мосту.

Ключові слова: обстеження моста, технічний стан, залізобетонні конструкції, відновлення мосту.

Під час війни мости залишаються однією з першочергових мішеней для обох сторін конфлікту. Тому їх руйнування, повне або часткове, лише справа часу. Після визволення Харківщини, в 2022 році, залишились частково, або повністю зруйновані мости та шляхопроводи. На початок січня 2023 року, внаслідок бойових дій, в Харківській області було зруйновано 25 мостів [1, с. 89].

Метою дослідження є, на основі конкретного об'єкту, зруйнованого в ході бойових дій, проаналізувати наслідки пошкоджень та перспективу відновлення мостів при схожих обставинах.

Аналізуючи результати обстеження мосту через річку Балаклійка на км 3+155 м автомобільної дороги загального користування місцевого значення О210103 Балаклія – Яковенкове [3, с. 8-17] можна зазначити, що пошкодженням, яке призвело до неможливості експлуатації в нормальному режимі стало руйнування ригеля опори №2. Пошкодження прогонових будов відбулося при їх пониженні. Хоча споруда призначена для пропуску двох полос руху автомобільного транспорту та двох пішохідних тротуарів (у поперечному перерізі кожна прогонова будова складається з 10 плит) на момент обстеження, через пошкодження елементів споруди внаслідок військових дій, рух будь-якого виду транспорту та пішоходів був повністю неможливий.

Щоб відновити тимчасове сполучення між населеним пунктами, з низової сторони моста, було влаштовано тимчасовий об'їзд у вигляді насипу в якому улаштовано 3 металеві труби $d = 1,2$ м для пропуску водної маси [4, с. 120]. Але це короткотермінове рішення, тому що заміна моста водопропускною трубою можлива лише при незначних об'ємах водяних мас. При сезонному піднятті рівня води – це може призвести до розмиву насипів підходу та розмиву навколо водопропускних труб.

В кінці 2023 року співробітниками Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) на замовлення державного підприємства «Дороги Харківщини» було проведено науково-технічний супровід виконання робіт на об'єкті «Капітальний ремонт мосту через р. Балаклійка на автомобільній дорозі О-210103 Балаклія - Яковенкове, км 3+155». З цього звіту нас цікавить інформація про дефекти, які були виявлені при обстеженні мосту та яке проектне рішення прийняте для його відновлення.

В результаті обстеження виявлено ряд дефектів, але найбільш значними з них були:

- на мостовому полотні - руйнування конструкцій мостового полотна на прогонах №1-2, №2-3;
- на прогонових будовах - руйнування прогонових будов №1-2, №2-3 із завалюванням у підмостовому руслі;
- на опорах та опорних частинах мосту - руйнування ригеля опори №2 між стійками С7/С14, С2/С9; локальне руйнування захисної шару бетону з оголенням та корозією арматури

ригелів та стійок опор; тріщини розкриттям до 5 мм на сколювання захисної шару бетону ригелів опор №1 та №3; похилі тріщини розкриттям до 20 мм ригеля опори №1;

- фундаменти опор мосту приховані від огляду. Технічний стан фундаментів визначався непрямими методами, що полягають у виявленні пошкоджень ригелів та інших конструктивних елементів споруди. Оскільки характерних дефектів у тілі опор мосту, які б свідчили про можливість нерівномірних деформацій основи, під час обстеження не було виявлено, то можна стверджувати, що осадок або інших негативних процесів у фундаментах не відбувається.

За рейтингом основних конструктивних елементів міст знаходиться у стані 5 – непрацездатний.

При огляді опор не було виявлено дефектів які знижували вантажопідйомність їх фундаментів, тому при відновленні споруди використовувались існуючі фундаменти. Так як були пошкоджені плитні прогонові будови №1-2, №2-3, а прогонова будова №3-4 не отримала ушкоджень і мала достатню вантажопідйомність (розрахункове навантаження прогонових будов згідно з типовим проектом Вип. 384/43 складає Н-30 та НК-80) було прийнято рішення по їх демонтажу. Відновлення відбувалось на старій осі мосту та використовувались фундаменти всіх опор.

Згідно проектного рішення усі будівельно-монтажні роботи (БМР) з капітального ремонту мосту планувалось здійснити за два етапи з використанням необхідної будівельної техніки (гусеничних кранів необхідної вантажопідйомності, авто міксерів-бетоновозів, а також іншої спеціальної техніки).

I етап – будівництво стоянів та проміжних опор автодорожнього мосту та монтаж балок прогонових будов;

II етап – облаштування мостового полотна.

Організаційно-технологічна послідовність будівництва розроблена з урахуванням використання при установці плит прогонових будов у проектне положення та облаштуванню мостового полотна, стрілових, гусеничних кранів необхідної вантажопідйомності, а також бетононаосу та іншої автомобільної техніки. Виконання БМР передбачається здійснити потоковим методом з максимальним сполученням виконання окремих видів робіт із залученням комплексних бригад, забезпечених удосконаленим інструментом і пристосуваннями. До початку виконання основних робіт з будівництва автодорожнього мосту проектними рішеннями передбачене виконання підготовчих робіт. [3, с. 46]

Підсумовуючи результати обстеження пошкодженого мосту та результати відновлення зазначу, що використання існуючих фундаментів пришвидшує відновлення та здешевлює його. Завдяки тому, що тимчасове відновлення руху було організоване за допомогою насипу та улаштуванням водопропускних труб, а не надбудовою на пошкоджених прогонових будовах тимчасових прогонів, роботи з відновлення могли проводитись без припинення руху транспорту. Також нарощення водопропускних труб та створення дамби дозволило будівництво тіла проміжних опор проводити з насипного ґрунту. Тому відновлення мостів краще проводити на старій осі, використовуючи вцілілі фундаменти, а тимчасове відновлення руху проводити на обході.

Література

1. Бугаєвський С.О. Відновлення мостів і труб після пошкодження : конспект лекцій(частина 1) / С.О. Бугаєвський, К.В. Бережна, С.М. Краснов, Ю.В. Бугаєвська. Харків: ХНАДУ, 2023. 178 с.
2. ДСТУ 9123:2021. Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. Київ : Держспоживстандарт України, 2021. 78 с.
3. Проміжний звіт про НДР «Науково-технічний супровід виконання робіт на об'єкті: Капітальний ремонт мосту через р. Балаклійка на автомобільній дорозі О-210103 Балаклія-Яковенкове, км 3+155». Харків: ХНАДУ, 2023. 90 с.
4. Рекомендації щодо конструктивних рішень для відбудови пошкоджених мостів і труб. Київ: ДП. ДерждорНДІ, 2022. 167 с.

Задорожний Д. А.
аспірант кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського,
Овчаренко О. А.
к.т.н., доцент, завідувач кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О.
Російського,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), Україна
e-mail: zadorozhnyi.dmytro1@gmail.com, тел. +380668607779

ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ В ЖИТТЄВОМУ ЦИКЛІ МОСТОВИХ СПОРУД

Анотація. У роботі проведено комплексний аналіз впровадження технологій штучного інтелекту на всіх етапах життєвого циклу мостів. Деталізовано архітектуру інтелектуальних SHM-систем, використання Edge AI для миттєвої детекції ударів та методику 4K-моніторингу із застосуванням техніки SAHI. Особливу увагу приділено концепції Digital Twin та вирішенню проблеми пояснюваності ШІ-моделей.

Ключові слова: штучний інтелект, життєвий цикл мосту, SHM, цифровий двійник, Edge AI, предиктивне обслуговування, SAHI.

Abstract. The paper provides a comprehensive analysis of the implementation of artificial intelligence technologies at all stages of the bridge life cycle. The architecture of intelligent SHM systems, the use of Edge AI for instantaneous impact detection, and 4K monitoring methodology using the SAHI technique are detailed. Special attention is paid to the Digital Twin concept and solving the problem of AI model explainability.

Keywords: artificial intelligence, bridge life cycle, SHM, digital twin, Edge AI, predictive maintenance, SAHI.

Актуальність автоматизації процесів управління мостовим господарством зумовлена глобальною кризою старіння інфраструктури та стрімким зростанням експлуатаційних навантажень. Станом на 2024–2025 роки, за даними аналізу Національної бази даних мостів (NBI) та звітів ARTBA, близько третини мостового фонду провідних країн світу (що становить понад 220 тисяч споруд) перебуває у незадовільному стані, вимагаючи невідкладної реконструкції або повної модернізації [2]. Для України ця проблема є надкритичною у повоєнний період відновлення, коли тисячі споруд мають пошкодження внаслідок бойових дій. Традиційні методи моніторингу, засновані на ручних оглядах, є занадто повільними, суб'єктивними та економічно неефективними, оскільки дозволяють виявляти дефекти переважно на стадіях, коли ремонт вимагає значних капіталовкладень. Перехід від реактивного підходу «ремонт після відмови» до проактивної стратегії предиктивного обслуговування (predictive maintenance) стає можливим лише завдяки інтеграції дешевих IoT-датчиків, зростання обчислювальних потужностей та розвитку методів глибокого навчання, здатних обробляти масиви гетерогенних даних [1; 6]. Хоча перші концепції впровадження інтелектуальних алгоритмів у мостобудування з'явилися ще в середині минулого століття, їхнє повноцінне практичне втілення відбулося лише з появою надпотужних обчислювальних засобів та інноваційних нейромережових структур [5]. Одним з аспектів актуальності є цифровізація етапу проектування: сучасні алгоритми генеративного дизайну та генетичної оптимізації дозволяють за короткий час проаналізувати тисячі варіантів геометрії мосту, знаходячи найбільш стійкі до аеродинамічних навантажень та економічно вигідні рішення, що раніше було недосяжним для традиційних інженерних методів.

Постановка завдання дослідження полягає у систематизації та інтеграції сучасних AI-доменів у єдиний апаратно-програмний комплекс, що супроводжує міст протягом усього життєвого циклу. Задача охоплює не лише розробку систем збору даних, а й створення надійних алгоритмів ідентифікації прихованих пошкоджень у реальному часі. Важливим аспектом є подолання дефіциту даних про аварійні стани та розробка методів адаптивної навігації БПЛА у складних просторових умовах без сигналу GPS. Кінцевою метою є створення системи, яка здатна автоматично генерувати прогнози залишкового ресурсу (RUL) та

пріоритезувати ремонтні роботи на рівні цілої мережі споруд [4; 7]. Окремим викликом є інтелектуальна обробка неструктурованої інформації, накопиченої за десятиліття експлуатації. Впровадження моделей обробки природної мови (NLP) дозволяє автоматизувати аналіз текстових звітів минулих інспекцій. ШІ здатний конвертувати суб'єктивні описи інженерів (наприклад, «тріщина середнього розміру») у чіткі числові бали стану, що забезпечує об'єктивність баз даних Bridge Management Systems (BMS) та дозволяє враховувати історичний контекст при прогнозуванні деградації споруди [7].

Виклад результатів дослідження свідчить, що основою інтелектуалізації галузі є системи Structural Health Monitoring (SHM) на базі глибокого навчання. На відміну від класичного спектрального аналізу, використання згорткових (CNN) та рекурентних (RNN) нейромереж дозволяє автоматично виділяти складні ознаки пошкоджень із «сирих» вібраційних сигналів, компенсуючи вплив температури та трафіку [6; 7]. Яскравим прикладом є кейс залізничного мосту KW51 у Бельгії, де для ідентифікації пошкоджень ефективність продемонстрував підхід, за якого нейромережа тренувалася на результатах моделювання методом скінченних елементів (MSE), що забезпечило виявлення дефектів навіть при інтенсивних шумових перешкодах із показником точності понад 95% [4]. Подібні системи розгорнуті на об'єктах типу мосту Гонконг-Чжухай-Макао, де понад 1200 сенсорів утворюють ієрархічну IoT-мережу, що забезпечує кореляційний аналіз вітру, трафіку та структурних реакцій у реальному часі [7]. Надійність таких масштабних сенсорних мереж прямо залежить від енергонезалежності вузлів. Розробка методів енергохарвестингу (energy harvesting), де датчики отримують живлення від вібрацій самої споруди або сонячної енергії, дозволяє забезпечити автономний моніторинг протягом десятиліть без необхідності заміни батарей у важкодоступних зонах мосту [6].

Окремим технологічним вектором виступає Edge AI (периферійні обчислення). Виконання ML-моделей безпосередньо на бортових обчислювачах дозволяє виявляти критичні події, такі як удари транспортних засобів, із латентністю менше 1 мс [7]. Для візуального моніторингу ефективним є перехід до 4К-зйомки з використанням техніки SANI (Slicing Aided Hyper Inference), що дозволяє виявляти мікродефекти на кадрах великої роздільної здатності без втрати контексту. Використання трансформерів (Vision Transformers) замість стандартних CNN дозволяє системі через self-attention аналізувати зображення глобально, не плутаючи тріщини зі слідами вологи чи бруду [3]. Додатково інтегровані методи неруйнівного контролю (NDT), такі як ультразвукове та інфрачервоне сканування, дозволяють виявляти приховані відшарування бетону, недоступні для візуальних камер [7]. Зокрема, використання інфрачервоної термографії, підсиленої алгоритмами комп'ютерного зору, дозволяє сегментувати термозображення та виявляти внутрішні порожнини або відшарування бетону, які не проявляються візуально. Застосування ультразвукових хвиль Лемба у поєднанні з глибинними нейромережами (CNN) відкриває можливості для діагностики композитних елементів мостів, де традиційні методи часто є малоефективними [7].

Центральним елементом управління є концепція Цифрового Двійника (Digital Twin), що синхронізує статичну BIM-модель із динамічними потоками даних [1]. Кейс мосту Stavå (Норвегія) доводить, що така інтеграція дозволяє вчасно виявити аномальний розвиток пошкоджень та запобігти обваленню шляхом оперативного закриття руху [1]. Водночас впровадження ШІ стикається з проблемою «чорної скриньки». Розвиток пояснюваного ШІ (XAI) є необхідною умовою для забезпечення довіри інженерів до алгоритмів та збереження принципу Human-in-the-loop в управлінні критичною інфраструктурою [6]. Важливо також враховувати «упередженість базового рівня» (base rate bias), оскільки рідкісність серйозних пошкоджень може генерувати велику кількість хибних тривог, що потребує впровадження робастних методів фільтрації аномалій [6]. Це дозволяє нівелювати ефект «втоми від тривоги» (alarm fatigue).

Висновки. Інтеграція інтелектуальних систем у життєвий цикл мостів є безальтернативним шляхом розвитку галузі. Конвергенція глибокого навчання, Edge AI та цифрових двійників дозволяє не лише знизити витрати на обслуговування, а й радикально

підвищити безпеку транспортної інфраструктури України у повоєнний період. Це створює передумови для створення стійких та адаптивних систем, здатних функціонувати в умовах мінливого клімату та екстремальних навантажень.

Література

1. Araya-Santelices P., Grande Z., Atencio E., Lozano-Galant J. A. Bridge management with AI, UAVs, and BIM. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 175. 106170.
2. ARTBA. 2024 Annual Bridge Report: State of the Nation's Bridges. Washington, DC: American Road & Transportation Builders Association, 2024.
3. Panigati T., Zini M., Striccoli D., et al. Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 173. 106101.
4. Qiu Y., Ahmed B., Abueidha D. W., et al. Damage identification for bridges using machine learning: Development and application to KW51 bridge. *ArXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.03002.
5. Reich Y. Artificial intelligence in bridge engineering. *Microcomputers in Civil Engineering*. 1996. Vol. 11, No. 6. P. 433–445.
6. Spencer B. F., Sim S.-H., Kim R. E., Yoon H. Advances in artificial intelligence for structural health monitoring: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2025. Vol. 29, No. 3. 100203.
7. Zinno R., Haghshenas S. S., Guido G., et al. The state of the art of artificial intelligence approaches and new technologies in structural health monitoring of bridges. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 97.

Сергій Краснов

*к.т.н., доцент кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О.Російського,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: krasnov0256@gmail.com тел. +380972145409

ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ БУДІВНИЦТВІ ПІШОХІДНИХ МОСТІВ

Анотація. У статті наведено інформацію щодо використання дерев'яних елементів в конструкції прогонової будови пішохідних мостів. Основна система прогонової будови прийнята у вигляді просторової структури. Наведено найбільш раціональні співвідношення довжин прольотів і висоти конструкції. Виконаний аналіз впливу параметрів конструкції на величину власних коливань прогонової будови.

Ключові слова: пішохідний міст, прогонова будова, просторова конструкція, власні коливання.

Актуальність теми. Зростання інтенсивності автомобільного транспорту, з одночасним затриманням будівництва та реконструкції автомобільних доріг та вулиць у містах, понукає шукати заходи для забезпечення безпечного руху, транспорту і пішоходів. Існує декілька способів безпечного перетину пішоходами транспортних магістралей: будівництво підземних або надземних пішохідних переходів. Кожна з цих споруд має свої недоліки і переваги. Основним недоліком підземних переходів є те, що при їх будівництві передбачається розташування його несучих конструкцій під існуючими автошляхами на деякій глибині, що, в свою чергу, передбачає розробку значного об'єму ґрунту і використання великої кількості будівельних матеріалів та конструкцій. Все це впливає на вартість будівництва. В містах, при щільній забудові, виникають додаткові питання з переносу або демонтажу існуючих комунікацій. Конструкції пішохідного мосту розташовані над перешкодою. Вони мають менші витрати матеріалу і не вимагають великих земляних робіт. Але треба відзначити, що в сучасному будівництві до цих споруд висувуються нові конструктивні, експлуатаційні та архітектурні вимоги. Пішохідні мости повинні гармонійно вписуватися в архітектуру міста. При влаштуванні пішохідних мостів над існуючими залізницями або автомобільними дорогами виникають вимоги до будівництва таких об'єктів без припинення руху. Під час воєнного стану, в місцях зруйнованих споруд, мають бути розроблені конструкції легких тимчасових мостів з застосуванням сучасних будівельних матеріалів, монтаж яких би здійснювався в самі крайні терміни.

Зараз будівельні конструкції з деревини переживають друге народження. Поряд з традиційними технологіями, використовуються новітні сучасні технології виготовлення та обробки дерев'яних виробів. У зв'язку з цим виникає можливість у використання дерев'яних елементів у будівництві пішохідних мостів.

Треба відзначити, що деревина неоднорідний матеріал, тому в даній роботі приділяється увага прогоновим будовам пішохідних мостів, з комбінованою металево - дерев'яною структурною конструкцією. До переваг такої конструкції є економічність, міцність, швидкість виготовлення і зведення. Слід відзначити, що мостовим спорудам з такими конструкціями не приділяється достатньої уваги. Тому подальший детальніший аналіз і вивчення згаданих конструкцій, вимагає особливих досліджень.

Мета дослідження – обґрунтування доцільності використання дерев'яних елементів при будівництві прогонових будов пішохідних мостів.

Об'єкт дослідження – комбінована металево-дерев'яна конструкція прогонової будови пішохідного мосту.

Метод дослідження – теоретичний, в першу чергу, метод скінченних елементів (МСЕ).

Практична значимість отриманих результатів полягає у створенні раціональної конструкції прогонової будови пішохідних мостів з використанням дерев'яних елементів.

Сучасні будівельні елементи з деревини, які піддані спеціальній обробці, мають кращі експлуатаційні властивості (міцність, вологостійкість тощо), вони меншою мірою **анізотропні**. порівняно з натуральною деревиною. До дерев'яних матеріалів належать: лісоматеріали, пресована деревина, модифікована деревина, шарувата клеєна деревина та деревинні композити [1, 3, 4].

У процесі експлуатації дерев'яних конструкцій найбільшої шкоди завдає волога. Для подовження служби деревини її декілька разів просочують, антисептиком для захисту дерева від плісняви, синяви, термітів та вогнезахисту.

Останнім часом широке впровадження у будівництво промислових і цивільних об'єктів отримали просторові конструкції [2, 5, 6]. Застосування структур дає виразне архітектурне рішення і значну економію матеріалів. До недоліків структурних конструкцій відносять підвищену трудомісткість їх виготовлення.

Використання структурних конструкцій в мостобудівництві не отримало широкого впровадження. Однак окремі спроби їх застосування відбуваються при будівництві, в основному, пішохідних мостів.

Запропонована конструкція прогонової (структурної) будови пішохідного моста включає в себе одночасне використання металевих і дерев'яних елементів. Елементи нижнього розтягнутого пояса виконані з металевих кутиків, а верхній пояс і розкоси виконані з клеєних дерев'яних елементів (рис. 1).

Основною метою дослідження є створення раціональної, рівно міцної конструкції в межах кожного елемента прогонової будови пішохідного мосту. Критерієм раціональності конструкції є нижня границя величини потенціальної енергії деформації [7].

У свою чергу, внутрішні параметри дозволяють оцінити несучу здатність системи при заданій витраті матеріалів. Запропонована конструкція пішохідного мосту розрахована на використання її для прогонів від 6 м до 24 м, що дає можливість виконувати стандартні модульні елементи в промислових умовах, а об'єднувати їх на будівельному майданчику.

Розрахунок зусиль і деформацій в елементах запропонованої конструкції прогонової будови виконано з використанням програмного комплексу ПК «ЛІРА-САПР».

Аналіз результатів розрахунку конструкцій прогонових будов пішохідних мостів наведено на рисунках 2.

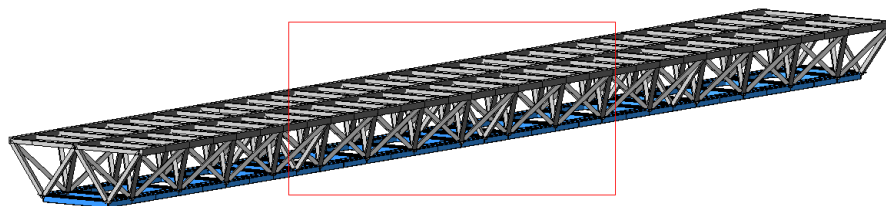


Рис. 1. Схема прогонової будови у ПК «ЛІРА-САПР»

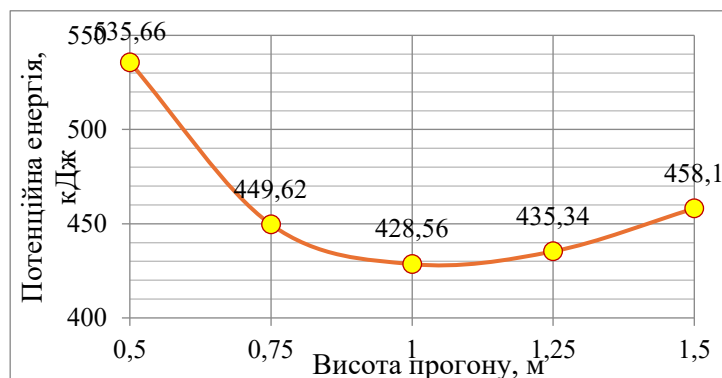


Рис. 2. Залежність потенційної енергії деформації від висоти конструкції

Для пішохідних мостів, крім показників міцності, дуже важливим є частота і період власних коливань. Згідно з нормативними вимогами у прогонових будовах пішохідних мостів розрахункові періоди власних коливань не мають знаходитись в діапазонах від 0,45 с до 0,60 с – у вертикальній та від 0,9 с до 1,2 с – у горизонтальній площинах. Перевірка запропонованої конструкції прогонової будови пішохідного мосту повністю відповідає цим вимогам (рис. 3).

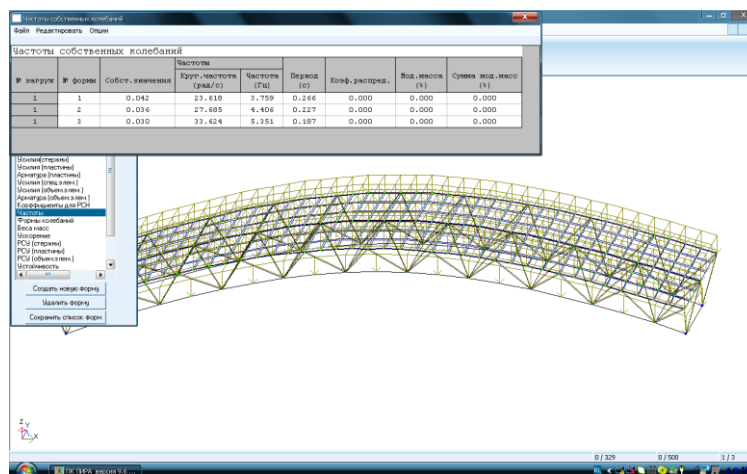


Рис. 3. Періоди власних коливань конструкції прогонової будови

ВИСНОВКИ

1. Застосування дерев'яних елементів з клеєного бруса, попередньо обробленого антисептиками, в конструкціях пішохідних мостів дає можливість збільшити міцність і зменшити витрати матеріалу.
2. При будівництві прогонових будов пішохідних мостів бажано використовувати модульні збірні елементи постійної висоти.
3. Аналіз розрахунків комбінованих прогонових будов пішохідних мостів свідчить про те, що найбільш раціональною висотою для всіх прийнятих прольотів (6,0 м, 12,0 м, 18,0 м, 24,0 м) є висота $h=1,0$ м.
4. Періоди власних коливань запропонованої конструкції прогонової будови не знаходиться в обмежених діапазонах.

Література

1. Дерев'яні конструкції Mitek. <https://pragma.ua/derevjannye-konstrukcii/>.
2. Дослідження і проектування сталі залізобетонних структурних конструкцій: Монографія. / Л.І. Стороженко, В.М. Тимошенко, О.В. Нижник, Г.М. Гасій, С.О. Мурза. – Полтава: АСМІ, 2008. – 262 с.
3. Клеєний конструкційний брус та дерев'яні конструкції. <https://www.sddu.com.ua/uk/statti/>.
4. Мости і труби: Підручник: У 4 т. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. – Т.1. Дерев'яні мости. – 536 с.
5. Особливості будівництва із просторових металоконструкцій. <https://www.0352.ua/>.
6. Просторові дерев'яні конструкції - основні форми, області застосування і основні розрахунки. <https://helpiks.org/>.
7. Системи прогонових будов пішохідних мостів із раціональними параметрами / Краснова Є.С., Краснов С.М. // Матеріали 78-ї науково-технічної та науково-методичної конференції університету – Харків. ХНАДУ, 2014 – С.132–137.

ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПЕРЕПАДІВ У ПЕРЕРІЗІ ПРОГОНОВИХ БУДОВ МОСТІВ ПІД ДІЄЮ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ

Анотація. В доповіді досліджується формування температурного режиму мостових конструкцій під впливом кліматичних умов та характеристик самої споруди. Аналізуються основні механізми теплообміну, зокрема теплопровідність, конвекція та теплове випромінювання, а також вплив сонячного опромінення на виникнення температурних перепадів у перерізі прогонової будови. Це дозволяє оцінити вплив температури на напружено-деформований стан конструкцій та прогнозувати їхню експлуатаційну надійність та довговічність.

Ключові слова. Вітер, конвекція, міст, прогонова будова, радіація, сонячне випромінювання, температурний перепад, температурний режим, теплопровідність.

З моменту будівництва та протягом усього терміну експлуатації мостові споруди постійно піддаються впливу навколишнього середовища. Змінні кліматичні умови впливають на температуру та її коливання в елементах прогонової будови мостів. Формування температурного режиму мосту зумовлює не тільки поздовжні деформації, але й виникнення складних і нерівномірних температурних полів у його елементах [1-4]. Це, у свою чергу, може призводити до виникнення додаткових напружень, деформацій і, як наслідок, до зниження довговічності споруди. При цьому такий вплив на напружено-деформований стан елементів прогонової будови тим більший, чим більші перепади температури в їх перерізі [3-6].

Температурний режим мостових конструкцій формується під впливом сукупності кліматичних факторів та характеристик самої споруди. До основних зовнішніх чинників, що впливають на перепади температури в перерізі прогонової будови належать час доби і пора року, температура повітря, швидкість і напрям вітру, хмарність та інтенсивність сонячного випромінювання. Додатковий вплив мають відносна вологість, атмосферні опади та особливості навколишнього середовища. Важливими є також геометричні характеристики прогонової будови, її орієнтація, нахил поверхонь, матеріал і колір, що визначають умови сприйняття та перерозподілу тепла.

Передача теплоти в мостових конструкціях відбувається за трьома основними механізмами: теплопровідністю, конвекцією та тепловим випромінюванням [3, 4]. У реальних умовах експлуатації всі ці механізми діють одночасно, формуючи загальний тепловий стан конструкції.

Теплопровідність забезпечує перенесення енергії в об'ємі конструктивних елементів і визначає внутрішній розподіл температури. Цей процес може бути описаний диференціальним рівнянням теплопровідності [7], що встановлює зв'язок між тепловим потоком Q та температурою T залежно від часу t :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (0)$$

Конвекційний теплообмін відбувається між поверхнею конструкції та навколишнім повітрям і залежить від різниці температур та швидкості повітряного потоку. Інтенсивність цього процесу значною мірою визначається швидкістю вітру: зі зростанням швидкості повітряного потоку збільшується тепловіддача елементів прогонової будови, що призводить до прискореного охолодження поверхні. Вплив вітру, хоча і поступається за значущістю сонячному випромінюванню у формуванні температурних перепадів, суттєво впливає на

динаміку теплового стану конструкцій. Теоретично цей процес описується рівнянням що встановлює залежність між густиною теплового потоку q та різницею між температурою елемента T_s і температурою навколишнього середовища T_∞ [8, 9]:

$$q = h_c (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Теплове випромінювання реалізується у вигляді електромагнітних хвиль між поверхнями з різною температурою.

Основним джерелом теплової енергії для мостових конструкцій є сонячне випромінювання. Кількість сонячного випромінювання, що поглинається конструкцією G_{abs} залежить від коефіцієнта поглинальної здатності поверхні α_{sc} [8-10]:

$$G_{abs} = \alpha_{sc} G \quad (3)$$

Сонячне випромінювання безпосередньо впливає на зовнішні поверхні елементів, причому найбільше навантаження припадає на верхні горизонтальні площини, які зазнають прямого опромінення. Частина падаючої енергії поглинається матеріалом, а частина відбивається залежно від його оптичних властивостей, зокрема кольору та коефіцієнта відбиття. Нижні та бокові поверхні отримують значно меншу кількість енергії, переважно за рахунок відбитої та розсіяної радіації. Така нерівномірність надходження тепла зумовлює виникнення температурних перепадів в залізобетонних конструкціях прогонової будови мосту.

Інтенсивність сонячного випромінювання визначається астрономічними, геометричними та атмосферними параметрами [9, 10]. Вона залежить від положення Землі на орбіті та нахилу її осі, що зумовлює сезонні та добові зміни висоти Сонця над горизонтом і тривалості світлового дня. Положення Сонця відносно точки спостереження описується географічною широтою, кутом схилення Сонця та годинним кутом, на основі яких визначаються кут зеніту, кут висоти підйому Сонця та азимут Сонця. Для інженерних розрахунків важливим є також кут падіння сонячних променів на поверхню, який залежить від її орієнтації та нахилу і визначає ефективність поглинання енергії.

Додатково на цей процес впливають температура повітря та відносна вологість, які визначають умови як конвекційного, так і радіаційного теплообміну. Наявність опадів або вологи на поверхні змінює тепловий баланс через ефекти випаровування та додаткового поглинання теплової енергії.

Такий підхід дає змогу теоретично моделювати основні кліматичні фактори та досліджувати їхній вплив на формування температурних перепадів у перерізі прогонової будови, а також оцінювати їхній вплив на напружено-деформований стан конструкції [9, 11]. Виникнення найбільших температурних перепадів у перерізі прогонової будови мосту зумовлюється високою інтенсивністю сонячної радіації, безхмарністю неба, значною тривалістю світлового дня, незначними коливаннями температури повітря та малою швидкістю вітру [4]. Моделювання та аналіз таких впливів на мостові конструкції в умовах клімату України, з урахуванням глобальних кліматичних змін, є важливими для прогнозування та забезпечення надійної експлуатації дорожньої інфраструктури й потребують подальшого вивчення.

Таким чином, температурний режим мостових конструкцій формується внаслідок складної взаємодії кліматичних умов і фізичних процесів теплообміну, серед яких визначальну роль відіграє сонячне випромінювання. Нерівномірність теплового впливу зумовлює виникнення температурних перепадів у перерізі прогонової будови, що безпосередньо впливають на її напружено-деформований стан. Урахування цих особливостей

при теоретичному моделюванні та інженерних розрахунках є необхідною умовою для забезпечення надійності, довговічності та безпечної експлуатації мостових споруд.

Література

1. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-5:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-5. Загальні дії. Теплові дії (EN 1991-1-5:2003, IDT). Зміна № 1. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. 59 с.
2. Wang, Y. G., He, X. J., Ouyang, F., He, J., Wu, W. W., & Wu, C. (2023). New method for fine calculation of bridge temperature field based on BIM solar radiation analysis. *Advances in Civil Engineering*, 2023(1), 6855116.
3. Chen, C., & Zhang, K. (2011). Research on temperature field and temperature stress of prestressed concrete girders. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 3(1), 25.
4. Potgieter I. C., Gamble W. L. Response of Highway Bridges to Nonlinear Temperature Distributions. *Civil Engineering Studies, Structural Research Series N. 505*. Illinois, 1983. 320 p.
5. Raghav Mahto. Thermal stress analysis in pre-stressed concrete bridges using COMSOL Multiphysics. *International Journal of Surveying and Structural Engineering*. 2025; Vol. 6(1), P. 27-32. DOI: <https://doi.org/10.22271/2707840X.2025.v6.i1a.36>.
6. Radolli, M., & Green, R. (1975). Thermal stresses in concrete bridge superstructures under summer conditions. *Transportation Research Record*, (547), pp 23-36.
7. Zhou G. D., Yi T. H. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. Vol. 9(12), 217983. P. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/217983>.
8. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2020. – 992 p.
9. Лукін Д. О. Моделювання впливу добових температурних коливань на залізобетонний міст в умовах клімату України. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 32. С. 283–301.
10. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar engineering of thermal processes* – 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 936 p.
11. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. In *AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, p. 020033. DOI: <https://doi.org/10.1063/12.0038623>.

Олександр Лукін

*к.ф.-м.н., доцент кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: lukin.ptp@gmail.com, тел. +380501495134,

Станіслав Біндюг

*аспірант, асистент кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О.
Російського,*

ХНАДУ, Україна

e-mail: stasbin72@gmail.com, тел. +380990628974

Олег Голеско

*аспірант кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського,
ХНАДУ, Україна*

e-mail: golesko87@gmail.com, тел. +380669563959

ЕКСПЛУАТАЦІЙНЕ УТРИМАННЯ МОСТІВ І ПОДОВЖЕННЯ ЇХ РЕСУРСУ

Анотація. Стан мостових споруд в Україні з кожним роком погіршується [1], що проявляється у зростанні частки мостів, у четвертому (обмежено працездатному) та п'ятому (непрацездатному) станах, відносно кількості всіх споруд. Тому є багато причин, основною з яких є систематичне недофінансування галузі. Визначальні елементи (прогонові будови, опори та фундаменти) сильно залежать від стану мостового полотна, яке відремонтувати не так дорого, порівняно з ремонтом визначальних елементів.

Ключові слова: автодорожній міст, визначальний елемент, дефекти, обстеження, утримання

В Україні налічує приблизно 15,7 тисяч автодорожніх мостів [1]. 5770 з них належать державному агентству відновлення та розвитку інфраструктури України, інші розташовані на місцевих дорогах та міських вулицях, і на даний час є на балансі військових адміністрацій.

Нажаль, мости старіють. Так, за [1] 47% мостів в Україні побудовані ще до 1964 р. (для залізниць цей показник дорівнює 80%). Іноді мости потребують заміни, але частіше ремонту або реконструкції. З 1991 р. побудовано та реконструйовано тільки 15% мостів. Видно дуже велике відставання відновлення мостів в Україні з їх старінням.

Зрозуміло, що зараз йде війна і мости, що знаходяться в зоні бойових дій та близько до неї, іноді підриваються, руйнуються, да і просто до них важко та небезпечно доїхати, щоб щось зробити. Але ж кількість мостів в цій зоні не така вже й велика, порівняно з загальною кількістю споруд в Україні. Та й почалося прискорення дисбалансу у відновленні мостів вже давно.

На початок 2025 р. мостів в стані 4 (обмежено працездатний стан) та 5 (непрацездатний стан) налічувало 24,2% [1]. З кожним роком ситуація погіршується – кількість мостів в станах 4 та 5 збільшується. Ще по 35,5% мостів інформація зовсім відсутня [1].

Експлуатаційне утримання є найдовшим і, мабуть, найвідповідальнішим етапом «життя» автодорожніх мостових споруд. Якщо проектування та будівництво мосту триває від місяців до декількох років, то подальша експлуатація споруди триває десятиліттями. Таким чином, виконання належного утримання мостів є дуже важливою роботою, яка повинна виконуватись систематично.

Враховуючи стан більшості автодорожніх мостів України можна помітити такі закономірності:

- з року в рік частка автодорожніх мостів, що мають експлуатаційний стан чотири (обмежено працездатний) та 5 (непрацездатний) зростає [1];
- в більшості випадків деградація споруд починається з погіршення стану мостового полотна.

Основною причиною деградації мостів є систематичне недофінансування. Особливо, це стосується споруд на місцевих дорогах. Крім цієї є інші причини:

- старіння парку мостів та застосування збірних балок прогонових будов з 60-х років минулого сторіччя (особлива у 80-ї роки);

- виконання ремонтів мостів без попереднього обстеження і без відповідної документації;

- виконання поточних ремонтів замість капітальних;

- відсутність достатньої кількості кваліфікованих спеціалістів;

- відсутність структур у більшості балансоутримувачів, яка б займалася тільки експлуатацією мостових споруд та багато інших причин.

На останній з причин хотілося б зупинитися окремо. На сьогодні в Службах відновлення та розвитку інфраструктури в областях у відділах, що займаються експлуатаційним утриманням, частіше всього застосовується наступна схема: дороги закріплюються за кураторами (дорожниками по освіті), які одночасно слідкують і за мостами. Декілька спеціалістів-мостовиків є в кожній Службу відновлення та розвитку, але їх мало і займаються вони частіше капітальними ремонтами, реконструкцією та новим будівництвом. Приблизно такі ж схеми утримання і на місцевих дорогах.

Є і експлуатуючі організації, які виграли тендер на утримання конкретних доріг. Це все частіше приватні організації, в яких мости також стоять не на першому місці.

І виходить, що мостами всі займаються в останню чергу.

Згідно [2, с 4], при утриманні автодорожніх мостів виконуються наступні роботи: постійний догляд, постійний нагляд, постійний та періодичний огляди, діагностика та обстеження. За потреби може виконуватись випробування.

Ці всі роботи потрібно виконувати систематично. Наприклад, постійний нагляд – система спостережень при якій візуально виявляються дефекти споруд, повинен виконуватись мостовим майстром один раз на 10 днів. Хоча на практиці, про 35,5% мостів інформація зовсім відсутня [1], документація, яка є, іноді зовсім не відповідає дійсності. Відсутня систематична паспортизація, обстеження виконуються не за нормативними термінами.

Ще хочеться зупинитися на дуже важливій темі по утриманню мостів, а саме, на стані мостового полотна та наслідках його руйнування.

Згідно [3] мостові споруди мають 7 елементів: прогонові будови, опори, фундаменти, мостове полотно, підходи, підмостова зона та регуляційні споруди. Перші три елементи названі визначальними, і не дарма. Серйозні дефекти прогонових будов, опор та фундаментів достатньо важко і дорого відремонтувати, а іноді й неможливо без заміни елемента. В такому випадку частіше всього, будують новий міст.

Як приклади, на рис. 1, 2 наведено дефекти прогонових будов мостових споруд на автодорозі М-05 Київ – Одеса (рис. 1) та Т-07-24 Синевир – Синевирська Поляна (рис. 2). Видно, як вода зверху руйнує попередньо напружені балки



Рис. 1. Сліди затікання води крізь шви між плитними балками та з краю прогону шляхопроводу на автодорозі М-05 Київ – Одеса, вилугування бетону, особливо вздовж швів

На рис. 3 показано мостове полотно мосту через р. Голятинка на автодорозі Т-07-24 Синевир – Синевирська Поляна після ремонту (виконано нову монолітну плиту та мостове полотно). Роботи виконувались без проєкту і по поточному ремонту замість капітального. Будівельники зробили як їм простіше. Відсутність борта між тротуаром та проїзною частиною дає змогу воді безперешкодно литися донизу і руйнувати прогонові будови і опори.

Ще приклад (рис. 4): міст через р. Тростяниця на автодорозі М-21 в Житомирській області. Міст побудований у 2023 р. після підриву у 2022 р., і через півтора роки деформаційні шви та їх перехідні ділянки мають суттєві дефекти, що веде до затікання води на нижні визначальні елементи мосту і, відповідно, на появу на них дефектів.



Рис. 2. Міст на автодорозі Т-07-24 Синевир – Синевирська Поляна через р. Теремля. Просочування води крізь плитну балку вздовж робочої арматури. Висоли, поверхня замочена



Рис. 3. Мостове полотно мосту через р. Голятинка на Закарпатті. Відсутній борт між тротуаром та проїзною частиною



Рис. 4. Дефект деформаційного шва нового мосту через р. Тростяниця на автодорозі М-21 на Житомирщині. Вода затікає на шафову стінку та торці балок

Висновки. При відсутності належного фінансування стан автодорожніх мостів буде пришвидшено деградувати, доля мостів в станах 4 та 5 буде збільшуватися. Але, навіть при відносно невеликому фінансуванні можна б було уповільнити розвиток дефектів мостів сконцентрувавшись, в основному, на їх мостовому полотні (на тих мостах, де це раціонально). Також є необхідність в серйозній реорганізації експлуатуючих служб, в частині експлуатації мостів.

Література

1. Аналітичний звіт «Мости в Україні: криза, проблеми, рішення» (Policy Paper). Огляд стану мостового господарства України й аналіз державної політики України щодо планування, проектування, будівництва та експлуатаційного утримання мостів – Віктор Загреба, 2025.– 58с.
2. ДСТУ 8989:2020. Настанова з утримання автодорожніх мостів. Чинний від 2021-07-01. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 42 с.
3. ДСТУ 9181:2022 Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – Київ: Мінрегіон України, 2022. – 28 с.

ЗАСТОСУВАННЯ НАДЛЕГКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УЛАШТУВАННЯ НАСИПУ ПІДХОДІВ ДО МОСТІВ

Анотація. У роботі розглянуто проблему стабілізації насипу підходів до мосту за рахунок використання блоків спіненого пінополістиролу (EPS-геопіни). Застосування надлегких матеріалів сприятиме створенню надійних конструкцій сполучення мосту з насипами підходів та мінімізації витрат на ремонт та відновлення при повоєнній відбудові України.

Ключові слова: міст, насип підходів, осідання насипу, екструдований пінополістирол, EPS-геопіна, крайня опора мосту.

Одним з найбільш критичних елементів конструкції мостового переходу є сполучення мосту з насипами підходів. Традиційній конструкції сполучення із застосуванням залізобетонних перехідних плит часто демонструють передчасний вихід з ладу, що призводить до значних витрат на експлуатаційне утримання. Впровадження надлегких матеріалів дозволяє вирішити проблему осідання насипу підходів на етапі зведення та подальшої експлуатації мосту, що є критично важливим для стабільності відбудованих маршрутів.

Згідно з аналізом експертних опитувань, ключовими факторами формування передмостової ями є внутрішня компресія ґрунту засипки та осідання природної основи під вагою насипу та тимчасовим автомобільним навантаженням. Метою даної роботи є аналіз технології EPS-геопіни як методу, що дозволяє зменшити осідання через зміну фізико-механічних параметрів масиву засипки насипу підходів до мосту.

Внаслідок великої різниці в осіданнях між жорсткою залізобетонною конструкцією крайньої опори мосту та насипом було впроваджено елементи сполучення, що мають забезпечувати поступову зміну величини осідання. Фахівцями рекомендується використання спіненого пінополістиролу як конструкційного матеріалу в геотехнічній інженерії [1, 2].

Однією з найпрогресивніших сучасних технологічних рішень є часткова або повна заміна ґрунту насипу на блоки екструдованого пінополістиролу (EPS) (рис. 1).

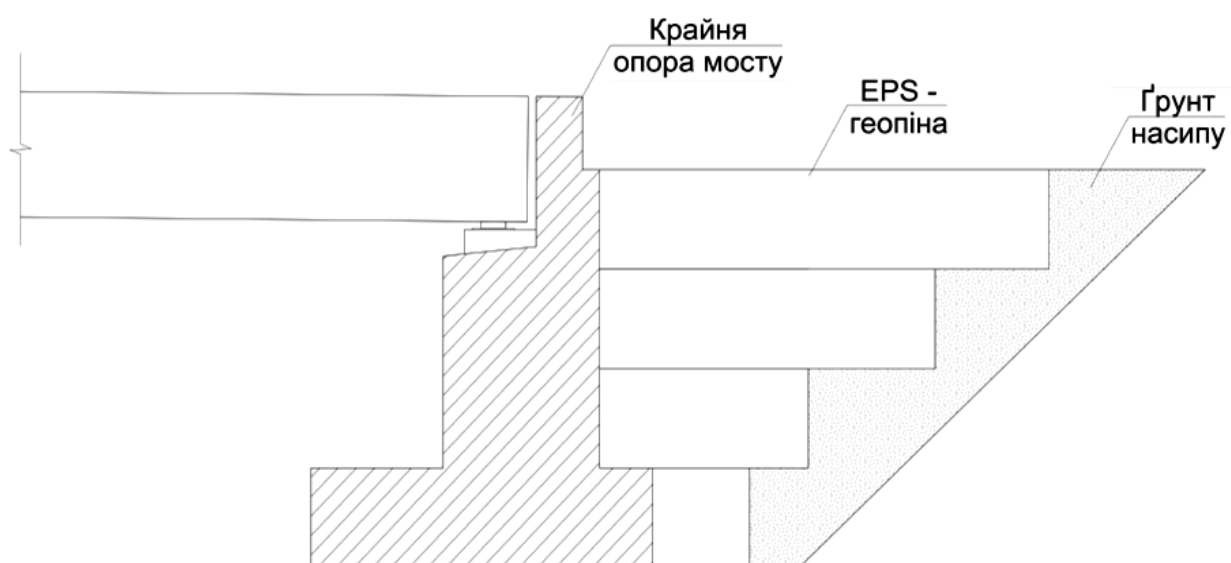


Рис. 1. Блоки EPS в тілі насипу підходу до мосту

Технологія передбачає використання блоків спіненого пінополістиролу (EPS) з об'ємною вагою 20–30 кг/м³, що становить лише близько 1% від щільності традиційних ґрунтів. Завдяки наднизькій вазі матеріалу сильно зменшується осідання основи. Оскільки статичне навантаження на ґрунти мінімізується, це дозволяє повністю виключити довготривалі осідання насипу підходу, які є основною причиною деформацій. Водночас жорсткі блоки EPS, на відміну від сипучих ґрунтів, не створюють активного бічного тиску на шафову стінку стояну. Це запобігає горизонтальним зміщенням опори та дозволяє значно полегшити конструкцію крайніх опор мосту.

Технологія улаштування насипу підходів з використанням екструдованого пінополістиролу набагато простіша за рахунок ручного укладання блоків та не потребує залучення важкої ґрунтоущільнювальної техніки. Така технологія дозволяє гарантовано уникнути типових дефектів, пов'язаних із незадовільним ущільненням ґрунту в обмеженому просторі безпосередньо за крайньою опорою мосту, де маневреність котків є мінімальною. Крім того, суттєвою перевагою є скорочення строків улаштування насипу підходів. Відсутність потреби в очікуванні технологічних перерв для стабілізації масиву, а також повна незалежність процесу від погодних умов дозволяють додатково скоротити терміни введення об'єктів в експлуатацію, що є критично важливим для відновлення логістичних маршрутів у повоєнний період [3].

Варто наголосити, що функціональні можливості EPS-геопіни не обмежуються лише роллю легкого заповнювача для зменшення навантаження на основу. Сучасні інженерні підходи дозволяють розглядати масиви блоків як повноцінну конструктивну систему, здатну виступати альтернативою традиційним глибоким фундаментам. Зокрема, у світовій практиці набуває поширення концепція влаштування берегових опор безпосередньо на масивах з EPS, що є особливо перспективним для будівництва тимчасових мостових споруд, де швидкість зведення та можливість подальшого повторного використання матеріалів є критичними факторами.

Яскравим прикладом такої реалізації є проєкт тимчасового сталевго мосту Грімсойвеген (Grimsøyvegen Bridge) в Норвегії через магістраль Е6 (рис. 2).



Рис. 2. Влаштування крайніх опор мосту Grimsøyvegen безпосередньо на масиві з EPS-геопіни

При будівництві тимчасового мосту прогоном 30 м замість традиційних пильових фундаментів було обрано інноваційне рішення – спирання крайніх опор безпосередньо на масивах з EPS-геопіни висотою 4,5 м. Через низьку несну здатність ґрунтів та прогнозовані значні осідання, використання надлегкого засипного матеріалу стало технічною необхідністю. Особливістю проєкту стало використання відновлених EPS-блоків, демонтованих з іншого

об'єкта, що доводить не лише конструктивну надійність методу, а й його високу економічну ефективність та екологічність [4].

Незважаючи на те, що через складність геотехнічних процесів універсального ідеального рішення проблеми перехідних зон наразі не існує, технологія EPS-геопіни є значним кроком вперед у порівнянні з традиційними конструкціями. Вона дозволяє безпосередньо впливати на головні причини формування деформаційного уступу – компресію та осідання основи. Застосування надлегких матеріалів при повоєнній відбудові України сприятиме створенню надійної транспортної інфраструктури з мінімальними витратами на майбутні ремонти.

Література

1. Stark, T. D., Arellano, D., Horvath, J. S., & Leshchinsky, D. (2004). Guideline and recommended standard for geofoam applications in highway embankments (NCHRP Report 529). Transportation Research Board.
2. Khajeh A, Jamshidi Chenari R, Payan M. A Review of the Studies on Soil-EPS Composites: Beads and Blocks. *Geotech Geol Eng* 2020;38:3363–83. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01252-2>.
3. Malai, A., Youwai, S., Watcharasawe, K., & Jongpradist, P. (2022). Bridge approach settlement mitigation using expanded polystyrene foam as light backfill: Case study and 3D simulation. *Transportation Geotechnics*, 35, 100794. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100794>
4. Aabøe, R. (б. д.). 40 years of experience with the use of EPS Geofoam blocks in road construction.

*Тетяна Ненастіна,
д.т.н., завідувач кафедри хімії та хімічної технології,
Катерина Бережна,
к.т.н, мостів, конструкцій та будівельної механіки ім. В.О. Російського.
ХНАДУ, Україна
e-mail: nenastina@ukr.net, тел. +380509719415*

ЗАХИСТ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ МОСТІВ: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто актуальні питання підвищення довговічності сталевих мостових споруд за рахунок застосування передових антикорозійних технологій. Доведено, що комплексний підхід до вибору захисних систем дозволяє забезпечити надійну експлуатацію критичної інфраструктури в умовах техногенних та кліматичних викликів.

Ключові слова: антикорозійний захист, гаряче цинкування, сталеві конструкції мостів, інтерметалічні фази Fe-Zn, корозійний потенціал.

В умовах воєнного стану в Україні питання збереження цілісності та забезпечення функціональної надійності транспортної інфраструктури набуває особливої стратегічної важливості. Порушення традиційних логістичних ланцюгів, зокрема обмеження авіаційного та морського сполучення, зумовили різке зростання навантаження на автомобільні дороги, які фактично стали основними артеріями постачання товарів, гуманітарної допомоги та військових ресурсів. У цих умовах безперебійне функціонування дорожньої мережі є критично важливим фактором економічної стабільності та обороноздатності держави.

Разом із тим результати технічного обстеження дорожньої інфраструктури свідчать про її значний ступінь зношеності, причому найбільш вразливою складовою залишаються штучні споруди, зокрема мостові споруди. Саме мости є ключовими елементами транспортних систем, від яких залежить безперервність руху, однак вони одночасно піддаються інтенсивному впливу експлуатаційних та природно-кліматичних факторів.

Одним з важливих конструкційних матеріалів більшості мостових споруд є сталь, яка в процесі експлуатації зазнає дії агресивних середовищ. До таких чинників належать підвищена вологість, циклічні температурні коливання, використання протижеледних реагентів (зокрема хлоридів), а також вплив промислових викидів. У сукупності ці фактори спричиняють розвиток електрохімічної корозії, що призводить до поступового руйнування металу, зменшення ефективного перерізу конструкцій та зменшення їх несучої здатності.

Корозійні процеси не лише знижують експлуатаційну надійність мостів, але й обумовлюють значні економічні витрати, пов'язані з необхідністю проведення ремонтів, реконструкцій або навіть повної заміни конструкцій. У сучасних умовах це є особливо критичним, враховуючи обмежені ресурси та потребу у швидкому відновленні інфраструктури.

У зв'язку з цим актуальним науково-технічним завданням є розроблення та впровадження ефективних систем захисту сталевих конструкцій від корозії. Сучасні підходи передбачають не лише забезпечення тривалого терміну служби покриттів (понад 50 років), але й відповідність екологічним стандартам, зниження токсичності матеріалів, а також оптимізацію витрат протягом усього життєвого циклу споруди. Особлива увага приділяється використанню інноваційних покриттів, композиційних матеріалів і електрохімічних методів захисту, здатних забезпечити комплексний вплив на процеси корозії.

На сучасному етапі розвитку матеріалознавства та електрохімії виділяють кілька основних напрямків захисту металевих конструкцій мостів. Кожен з них має свої переваги та обмеження (табл. 1).

Табл. 1. Порівняльна характеристика методів захисту мостових конструкцій

Метод захисту	Термін служби (роки)	Захист стиків та порожнин	Особливості механізму	Складність впровадження
Гаряче цинкування ДСТУ EN ISO 1461:2024 [1]	65–120	100%	Катодний та бар'єрний захист	Середня (потребує заводських умов, транспортування конструкцій)
Холодне цинкування ДСТУ EN 17059:2019 [2]	10-25	~70–85%	Гальванічний та бар'єрний захист; залежить від товщини шару і якості нанесення	Низька (можливе нанесення в польових умовах)
Термічне напилення ДСТУ EN ISO 12671:2018 [3]	20–40	~95%	Формування металевого шару (Zn, Al); висока стійкість у морських і агресивних середовищах	Висока (потребує спеціального обладнання та підготовки поверхні)
Лакофарбові системи (Епоксидні, алкідні, полівінілові) ISO 12944 [4]	10–25	~80–90%	Бар'єрний захист; потребує регулярного оновлення та контролю стану покриття	Низька–середня (відносно просте нанесення, але вимогливе до підготовки поверхні)
Катодний захист ДСТУ EN 12954 [5]	30+	Залежить від схеми	Електрохімічний захист (протекторний, катодний або анодний); потребує постійного моніторингу, обслуговування та джерела живлення	Висока (складне проектування, монтаж і експлуатаційний контроль)

Окрім класичних методів, перспективними є нанопокриття з властивостями самовідновлення та інокерамічні системи, які наразі перебувають на стадії активних лабораторних випробувань.

Аналіз сучасних методів антикорозійного захисту мостових конструкцій показав, що їх ефективність в умовах України суттєво визначається кліматичними факторами, зокрема сезонними коливаннями температури, підвищеною вологістю та інтенсивним використанням хлоридних протижелезних реагентів у зимовий період. Базуючись на цьому, найбільш надійний та довготривалий захист сталевих мостових конструкцій забезпечує гаряче цинкування, яке поєднує бар'єрний і катодний механізми, що гарантує повне покриття поверхонь, включаючи стики і порожнини. Разом із тим, максимальна ефективність і довговічність досягаються при застосуванні комбінованих систем типу «duplex» (гаряче цинкування у поєднанні з лакофарбовими покриттями), що дозволяє суттєво підвищити стійкість конструкцій до дії хлоридів та атмосферних впливів.

Термічне напилення доцільно розглядати як ефективний метод для реконструкції та захисту великогабаритних конструкцій, тоді як лакофарбові системи можуть застосовуватися як самостійне рішення лише за умови регулярного технічного обслуговування. Холодне

цинкування та катодний захист мають обмежену сферу застосування і рекомендуються переважно як допоміжні або спеціалізовані методи.

Таким чином, для мостових споруд в Україні найбільш раціональним є використання системного підходу до захисту, що передбачає поєднання металевих покриттів із додатковими захисними шарами, що забезпечує підвищення довговічності, надійності та зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі.

Література

1. Покриття, нанесені методом гарячого цинкування на вироби із заліза та сталі. Технічні вимоги та методи випробування : ДСТУ EN ISO 1461:2024 (EN ISO 1461:2022, IDT; ISO 1461:2022, IDT). [Чинний від 2024-01-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2024.

2. Лінії для нанесення покриттів. Вимоги щодо безпеки : ДСТУ EN 17059:2019 (EN 17059:2018, IDT). [Чинний від 2019-11-01]. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2019.

3. Термічне напilenня. Покриття, одержані термічним напilenням. Символи на креслениках : ДСТУ EN ISO 12671:2018 (EN ISO 12671:2014, IDT; ISO 12671:2012, IDT). Київ : ДП УкрНДНЦ, 2018.

4. Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами : ISO 12944 (усі частини).

5. Катодний захист заглиблених або занурених металевих конструкцій. Загальні принципи та їх застосування для трубопроводів : ДСТУ EN 12954:2022 (EN 12954:2019, IDT). Київ : ДП УкрНДНЦ, 2022.

ЗАХИСТ МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ МОСТІВ ВІД КОРОЗІЇ

Анотація. Існує значний перелік захисних матеріалів від корозії і від вірного вибору, яких залежить життєвий цикл мостової споруди. В статті представлено та проаналізовано основні методи та матеріали для захисту металевих конструктивних елементів.

Ключові слова: корозія, протикорозійний захист, термічного напilenня, холодне цинкування, Гаряче цинкування, фарби для захисту від корозії

Згідно ДСТУ Б В.2.3:193-2013 [1], вимоги до системи протикорозійного захисту металевих елементів мостових споруд повинні передбачати безпеку, надійність та ефективність засобів та методів захисту від корозії на всіх стадіях життєвого циклу мостових споруд. Показники якості заходів захисту від корозії визначаються відповідними нормами або проектами, що крім захисту від корозії забезпечують охорону навколишнього середовища та виконання інших особливих умов, що встановлені замовником у завданні на проектне рішення. Для цього необхідно задатися параметрами системи протикорозійного захисту конструкцій [1]:

- довговічність конструкції;
- класифікаційні ознаки при дії агресивного середовища за зонами розташування конструкцій;
- характеристики конструктивної пристосованості і технологічної раціональності заходів захисту від корозії;
- показники засобів і методів первинного і вторинного захисту;
- технологічні вимоги до відновлення (виконання) захисту від корозії;
- методи управління та оцінки якості;
- вимоги до технічного обслуговування і ремонту;
- вимоги до охорони здоров'я та техніки безпеки;
- вимоги до захисту навколишнього середовища.

Так згідно з [1], система захисту від корозії повинна бути обрана з урахуванням вимог до технічного обслуговування. А за відсутності доступу задля огляду та ремонту елементів конструкцій довговічність заходів первинного та вторинного захисту повинна відповідати строку служби споруди без технічного обслуговування.

Відмітимо, що сьогодні існує значний перелік захисних матеріалів від корозії і від вірного вибору залежить життєвий цикл мостової споруди.

Найбільш простий і поширений спосіб захисту від корозії – це нанесення фарби на поверхню металу. Непроникне цільне покриття достатньої товщини запобігає попаданню іонів на поверхню металу і таким чином зменшить утворення локальних пар. Лакофарбові покриття, захисні властивості яких ґрунтуються на принципі непроникуваності, називають бар'єрними, прикладом таких покриттів є епоксидні матеріали.

Фарби для захисту від корозії, які застосовують проти атмосферних впливів, використовують антикорозійні захисні пігменти, які уповільнюють відділення іонів металу з анодних ділянок. Різні фосфати і борати, наприклад, використовуються як антикорозійні захисні пігменти, які, потрапляючи разом з водою в покриття, утворюють захисні шари на анодних ділянках.

Класифікація фарб, які застосовуються при захисті від корозії. Фарби можуть бути класифіковані різноманітними способами, наприклад (рис. 1):

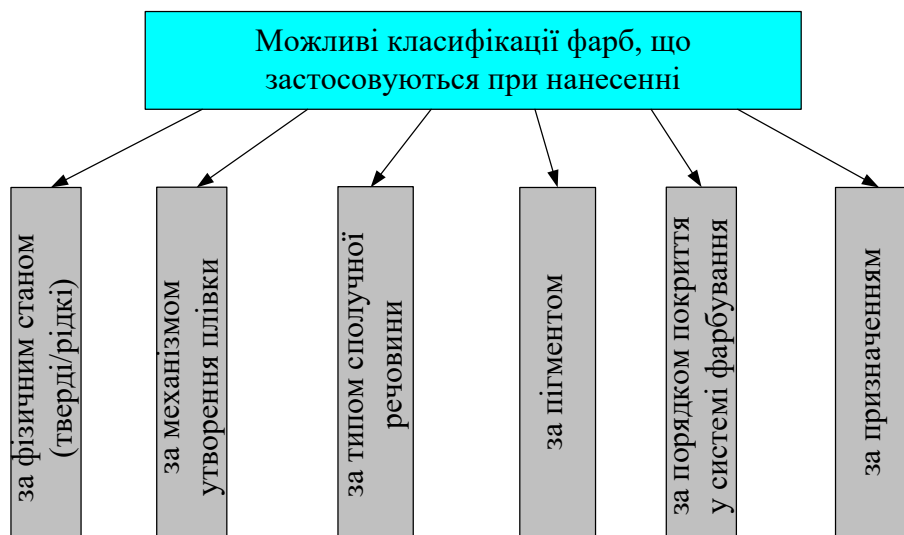


Рис. 1. – Класифікація фарб, які застосовуються при захисті від корозії

Відмітимо, що сьогодні існує дуже різноманітний перелік фарб. Представимо лакофарбові матеріали для захисту сталевих конструкцій від корозії згідно з ДСТУ Б В.2.6.193:2013 [1] (рис. 2).

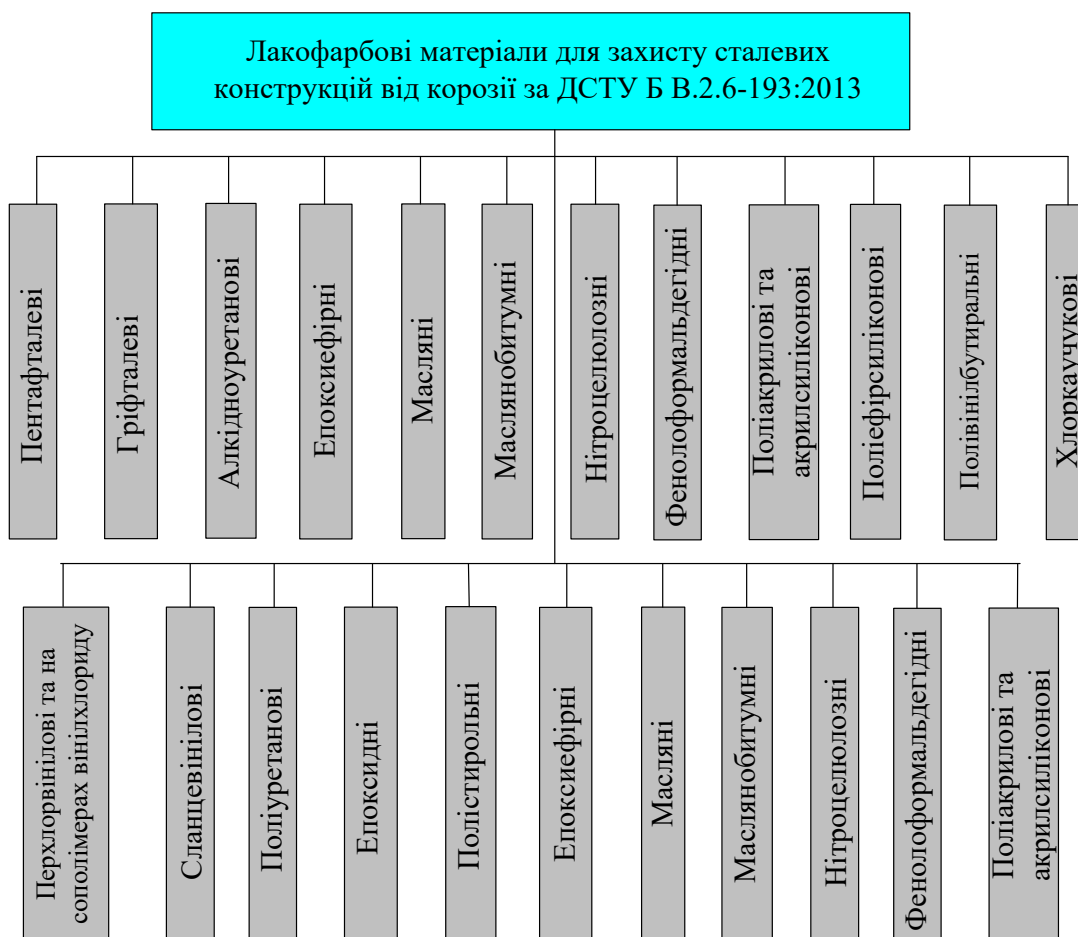


Рис. 2. Лакофарбові матеріали для захисту сталевих конструкцій від корозії згідно з ДСТУ Б В.2.6.193:2013 [1]

Ще одним з розповсюджених методів захисту металоконструкцій від корозії є нанесення металевих покриттів. Три найбільш часто використовуваних методи нанесення металевих

покриттів на конструкційну сталь - це термічне (металеве) напилення, холодне та гаряче цинкування (рис. 3). Загалом, захист від корозії, що забезпечується металевими покриттями, значною мірою залежить від вибору металу покриття та його товщини, і на нього не сильно впливає спосіб нанесення.

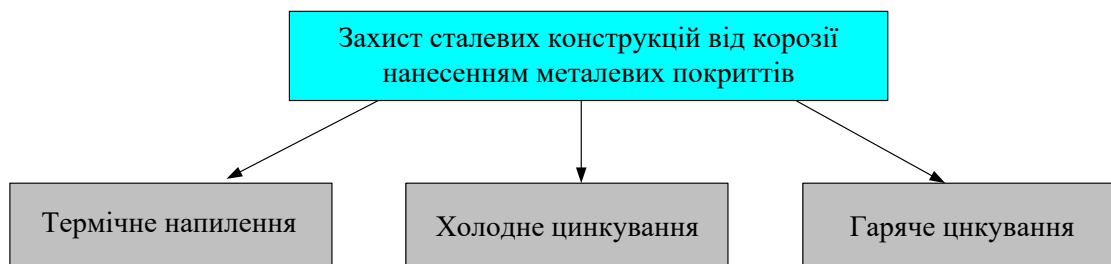


Рис. 3. Методи нанесення металевих покриттів на конструкційну сталь

Для термічного напилення можна використовувати цинк або алюміній. Розплавлені кулі металу наносяться струменем стисненого повітря на поверхню сталі.

Захист сталевих конструкцій від атмосферної корозії за допомогою термічного напилення алюмінієвих або цинкових покриттів описано в BS EN 2063:2005, а вказівки щодо конструкції виробів, що підлягають термічному напилюванню, можна знайти в [2].

Метод холодного цинкування – це спосіб фарбування металоконструкцій спеціальною фарбою, яка на 89-95% складається з цинку. Суть методу в тому що, покрита поверхня після висихання створює міцне покриття, яке забезпечується катодним захистом яке перешкоджає розвитку корозії та руйнування металеві основи. Важлива особливість у тому, що холодне цинкування можна проводити на місці, не демонтуючи деталі.

Гаряче цинкування – це процес, який включає занурення сталевих компонентів, який буде покритий, у ванну з розплавленим цинком після травлення та флюсування, а потім його вилучення. Занурені поверхні рівномірно покриті цинковим сплавом і шарами цинку, які утворюють цілісний зв'язок з підкладкою.

Для багатьох застосувань гаряче цинкування використовується без додаткового захисту. Однак для забезпечення додаткової міцності або там, де є декоративні вимоги, наносяться лакофарбові покриття. Поєднання металевих і лакофарбових покриттів зазвичай називають «дуплексним» покриттям. При нанесенні фарб на оцинковані покриття слід використовувати спеціальні обробки для підготовки поверхні для забезпечення гарної адгезії.

Викривлення виготовлених сталевих конструкцій може бути викликано різним тепловим розширенням і стисненням, а також зняттям незбалансованих залишкових напружень під час процесу цинкування. Специфікації гарячеоцинкованих покриттів для конструкційних сталевих конструкцій в даний час охоплюються стандартом BS EN ISO 1461:2009 [2].

Література

1. ДСТУ Б В.2.6-193:2013 Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування: [Чинний з 2014-01-01]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 70с.

2. Надточій Г.А. Аналіз методів захисту мостових елементів від корозії: квал. роб. магістра: 192 Будівництво та цивільна інженерія. Х.: ХНАДУ, 2021. 89 с.

Ярослав Смагло
аспірант кафедри кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
e-mail: smahlo91yaroslav@gmail.com

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИМОГ ТА РЕКОМЕНДАЦІЙ НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТІВ УКРАЇНИ, ЩО ВИСУВАЮТЬСЯ ДО ПОСТІЙНИХ ТА ТИМЧАСОВИХ МОСТІВ

Анотація. У роботі проаналізовано сучасні вимоги та рекомендації, які висуваються до постійних та тимчасових мостів нормативними документами України. Обґрунтовується доцільність використання тимчасових інвентарних мостів для відновлення пошкоджених та зруйнованих споруд.

Ключові слова: тимчасовий міст, постійний міст, транспортна інфраструктура.

Руйнівна дія збройної агресії російської федерації, існуючі природні та техногенні впливи, недостатнє експлуатаційне утримання та інші фактори значно впливають на руйнування транспортної інфраструктури України, зокрема мостів на автомобільних дорогах. Існує нагальна потреба у відновленні пошкоджених та зруйнованих мостових споруд. В умовах дефіциту фінансування, матеріальних ресурсів та кваліфікованих фахівців, з яким країна може зіткнутися в повоєнний період, одночасна робота по капітальному будівництву великої кількості мостових споруд може бути неможливою.

Використання інвентарних тимчасових мостів може стати основним способом влаштування переправ через перешкоди шириною до 40 м особливо на дорогах місцевого значення. Застосування цих конструкцій через високий ступень заводської готовності елементів забезпечує мінімізацію витрат часу на транспортування складових частин мосту та часу на спорудження, створює економічну вигоду через можливість повторного використання мосту в іншому місці, гарантує міцність і надійність, які не поступаються постійним мостам.

Процес проектування, влаштування та експлуатації мостів в Україні має належне нормативно-правове супроводження [1, 2], яке розвивається та в останні роки зазнало змін. Зокрема, набув чинності ДБН В.2.3-22:2025 «Мости і труби. Основні вимоги проектування» [3] та введено в дію МР В.2.3-37641918-940:2024 «Методичні рекомендації щодо проектування та влаштування тимчасових автомобільних доріг і мостів на них» [6].

Основні тренди розвитку та ключові положення українських мостобудівельних норм висвітлювалися у роботах фахівців ДП «НІРІ» та інших авторів [4, 5, 7, 8].

Метою цієї роботи є проведення порівняльного аналізу основних нормативних вимог та рекомендацій, що висуваються до постійних та тимчасових мостів.

Основні відмінності нормативних вимог та рекомендацій, що висуваються до постійних та тимчасових мостів наведено у таблиці 1.

Табл. 1. Основні відмінності вимог та рекомендацій щодо постійних та тимчасових мостів (початок таблиці)

Категорія	Постійні мости	Тимчасові мости
Рішення щодо застосування конструкції	Приймається за ТЕП варіантів	Обґрунтовується виходячи з ТЕП із капітальною спорудою
Склад проекту	Повний обсяг проектної документації згідно з ДБН А.2.2-3	Не потребують складу проекту у повному обсязі
Розрахунковий строк експлуатації відповідальних елементів моста	Від 50 до 100 років	До 10 років (до 5 років - рекомендований строк)
Клас наслідків (відповідальності)	СС2 та СС3	СС1
Коефіцієнт надійності за відповідальністю моста	1,00 та 1,05	1,00

Закінчення табл. 1

Категорія	Постійні мости	Тимчасові мости
Ймовірність перевищення паводків для гідрологічних розрахунків на дію водного потоку	0,33...2% ймовірності (залежно від категорії дороги)	10% ймовірності (якщо строк служби мосту > 1 року)
Ширина проїзної частини	min 3,25 м в населених пунктах та min 4,5 м для V-ї категорії дороги	Рекомендовано 2,75...9,8 м за STANAG 2021
Мінімальний габарит по висоті	5,5 м	4,5 м
Геометрія та план	Проектуються з урахуванням перспективи розвитку транспортної мережі. Поздовжні ухили та радіуси кривих за вимогами ДБН В.2.3-4:2015	Розташовуються переважно на прямих і горизонтальних ділянках доріг. Допускаються криві в плані не < 180...250 м та поздовжні ухили не >50 ‰ у залежності від додаткових умов
Габарити наближення конструкцій, ширина проїзної частини, розрахункова швидкість руху	Суворе дотримання вимог норм	Можливі обмеження за швидкістю руху, інтервалами між транспортними одиницями, шириною проїзду та підмостовим габаритом
Матеріали	Пріоритет залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій	Пріоритет швидкозбірних сталевих та дерев'яних елементів, матеріалів повторного використання
Перевищення елементів мостів над рівнями води	0,25...1,5 м в залежності від додаткових умов	Не менше 0,75 м та 1,0 м при відсутності чи наявності корчеходу та селю
Мінімальна ширина пішоходної зони тротуарів	Залежно від максимальної розрахункової інтенсивності руху пішоходів, але не менше ніж 1,5 м (у стислих умовах 1,0 м), для службових проходів – 0,75 м	Залежно від максимальної розрахункової інтенсивності руху пішоходів, але не менше ніж 0,75 м

До постійних та тимчасових мостів нормативними документами висувається низка спільних вимог та рекомендацій описаних у табл. 2.

Табл.2. Спільні вимоги та рекомендації, що висуваються до постійних та тимчасових мостів

Категорія	Спільний зміст вимог та рекомендацій
Надійність та безпека	Тимчасові мости за показниками міцності та надійності не повинні поступатися постійним спорудам
Методологія розрахунку	Перевірці підлягають дві групи граничних станів: на міцність/стійкість та на жорсткість/тріщиностійкість
Безпека руху	Проектні рішення повинні гарантувати безпеку руху всіх учасників
Класифікація за довжиною	Малі – не більше ніж 25 м; середні – 25...100 м включно; великі – понад 100 м або з прогонами понад 60 м
Нормативна база навантажень	Розрахунки виконуються на дію постійних та несприятливих комбінацій тимчасових навантажень відповідно до ДБН В.1.2-15:2009 [1]
Тимчасові навантаження від рухомого складу	Смугове А11 чи А15, одиночний екіпаж НК-80 або НК-100 в залежності від категорії дороги та інших умов
Геотехнічні вимоги	Проектування опор регулюється положеннями ДБН В.2.1-10:2018 та іншими галузевими стандартами щодо пальових фундаментів
Організація дорожнього руху	На підходах до мостів споруди мають бути обладнані дорожніми знаками згідно з ДСТУ 4100:2021 для гарантування безпеки всіх учасників руху
Обстеження та випробування	Оцінювання технічного стану та приймання в експлуатацію здійснюється згідно з вимогами ДБН В.2.3-6-2009 та ДСТУ 9123:2021
Охорона довкілля	Проектування має враховувати заходи з оцінки впливу на навколишнє середовище (ОВНС) за ДБН А.2.2-1:2021
Гідрологічні розрахунки	Параметри споруд на перетині з водотоком визначаються на основі гідравлічних вишукувань

Для об'єктів класу наслідків ССЗ розрахунки відповідальних елементів мають виконуватися двічі без імпорту схеми конструкції із первинного розрахунку в повторний. Різниця у результатах розрахунків має бути не більше ніж 10%. **Особливі вимоги та рекомендації**, що висуваються нормативними документами до постійних та тимчасових мостів описано у табл. 3.

Табл. 3. Особливі вимоги та рекомендації, що висуваються нормами до тимчасових мостів

Категорія	Зміст особливих вимог та рекомендацій до тимчасових мостів
Складність монтажних робіт	Стислі строки складання та розбирання із застосуванням нескладного обладнання
Ресурсомісткість	Мінімальні трудові та матеріальні витрати
Оборотність конструкцій	Багаторазове використання конструкцій
Транспорتابельність	Конструкції повинні допускати перевезення залізницею або автотранспортом
Військова класифікація (MLC)	Для використання у військовий цілях рекомендовано класифікувати за STANAG 2021: MLC4... MLC150
Моніторинг з'єднань	Під час експлуатації особлива увага приділяється штирьовим та болтовим з'єднанням прогонових будов і опор. Перевіряють наявність та правильність встановлення шайб, запірних шпильок та достатність зусилля затягування болтів

В результаті проведеного порівняльного аналізу нормативних документів України, які стосуються постійних та тимчасових мостів, встановлено принципові відмінності у вимогах та рекомендаціях до них, окреслено загальні положення та виокремлено специфічні вимоги. Наведений перелік порівняльних характеристик не є вичерпним і може бути доповнений.

Широке застосування сучасних тимчасових мостів із високим ступенем заводської готовності в умовах повоєнної відбудови є перспективним рішенням, що має сучасне нормативно-правове супроводження, яке гарантує необхідну міцність та надійність мостів при суттєвій мінімізації часу на відновлення пошкоджених та зруйнованих мостових споруд.

Література

- ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Вантажання та впливи. Мости та труби. На заміну ДБН В.2.3-14:2006 (глава 2 та додатки Л, Д, Ж, П, К, Р, С) ; чинний від 2010-03-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон-буд України, 2009. 70 с. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/7299b7d3f1d2de9eca295ae82374cf6e> (дата звернення: 06.04.2026).
- ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. На заміну СНиП 2.05.03-84* ; чинний від 2007-02-01. Вид. офіц. Київ : М-во буд-ва, архітектури та житлово-комун. госп-ва, 2006. 357 с. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/BN01:5073-0364-0832-5487?doc_type=2. (дата звернення: 10.04.2026).
- ДБН В.2.3-22:2025. Мости і труби. Основні вимоги проектування. На заміну ДБН В.2.3-22:2009 ; чинний від 2026-01-01. Вид. офіц. Київ : М-во розвитку громад та територій України, 2025. 40 с. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/5eb2526fb4f14e3fec932e4fa83a1c16> (дата звернення: 09.04.2026).
- Каськів В.І. Тренди розвитку мостобудівельних норм: новації українських ДБН у контексті Єврокодів. *Доповідь на V-й міжнар. наук.-практ. конф. ім. П.М. Коваля «Відновлення та розвиток мостів: виклики, тренди, новації»*, м. Славськo, Львівська обл., 10–12 груд. 2025. URL: <https://shorturl.at/hFEQP> (дата звернення: 09.04.2026).
- Концептуальні засади та ключові положення ДБН В.2.3-22:2025 Мости і труби. Основні вимоги проектування. Презентація, м. Київ: ДП «НІПІ». 01 січ. 2026 р. URL: <https://nidi.org.ua/files/upload/Presentation.pdf> (дата звернення: 09.04.2026).
- МР В.2.3-37641918-940:2024. Методичні рекомендації щодо проектування та влаштування тимчасових автомобільних доріг і мостів. Чинний від 2025-01-03. Вид. офіц. Київ, 2024. 58 с.
- Мусурівський О.Б. Методичні рекомендації щодо проектування та влаштування тимчасових автомобільних доріг і мостів на них для транспортної інфраструктури України. *Відновлення транспортної інфраструктури України: світовий досвід* : Програма міжнар. наук. конф., м. Харків, 22 січ. 2025 р. С. 47. URL: <https://shorturl.at/Lw4gQ> (дата звернення: 09.04.2026).
- Рекомендації щодо конструктивних рішень для відбудови пошкоджених мостів і труб/ Безулий А.О. та ін. Київ: ДП ДерждорНДІ, 2022. 167 с. URL: <https://shorturl.at/kYjBa> (дата звернення: 11.04.2026).

ВРАХУВАННЯ РИЗИКІВ ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА ПІДЗЕМНИХ СПОРУД: СВІТОВИЙ ДОСВІД ТА РЕАЛІЇ УКРАЇНИ

Анотація. У статті проаналізовано методики оцінки геотехнічних ризиків при спорудженні тунелів та метрополітенів. Розглянуто досвід впровадження міжнародних стандартів (ITA-AITES, FIDIC), специфічні загрози воєнного стану та ресурсозберігаючі технології проходки.

Ключові слова: підземне будівництво, геотехнічний ризик, метрополітен, ресурсозберігаючі технології.

Освоєння підземного простору є стратегічним пріоритетом для розвитку великих міст України (Київ, Харків, Дніпро). Проте складні інженерно-геологічні умови та щільна забудова створюють високий рівень ризику. У сучасних реаліях повномасштабної війни підземні споруди набули стратегічного значення як об'єкти цивільного захисту. Це потребує не лише нових підходів до безпеки, а й впровадження ресурсозберігаючих технологій, які дозволяють знизити навантаження на довкілля та підвищити економічну стабільність проектів у кризовий період.

Сучасна методологія оцінки ризиків базується на системному підході, де підземний об'єкт розглядається як частина природно-технічної геосистеми (ПТГС) «масив – конструкція – технологія – навколишнє середовище» (рис.1). Відповідно до [1] процес аналізу повинен бути циклічним і включати ідентифікацію небезпек, оцінку величини ризику та постійне коригування результатів на основі нових даних.



**Рис. 1. Схема взаємодії елементів природно-технічної геосистеми (ПТГС)
(візуалізацію створено за допомогою Gemini за описом автора)**

У вітчизняній практиці особливу увагу приділяють плануванню підземної інфраструктури мегаполісів як складної системи. Як зазначають Н. Панкратова та Г. Гайко, для цього ефективно використовувати морфологічне та когнітивне моделювання, що дозволяє працювати зі слабоструктурованими даними в умовах невизначеності [2]. Це доповнюється міжнародними стандартами ITA-AITES, які передбачають використання «Реєстрів ризиків» для чіткого розподілу відповідальності [3].

Важливим чинником мінімізації ризиків є вибір технологій, що забезпечують стабільність масиву. Так, згідно з дослідженнями [1], при проходці стовбурів у складних гідрогеологічних умовах України для запобігання проривам водонасичених ґрунтів ефективним є застосування методу гідропригрузу, при якому рівень води у виробці підтримується вище рівня ґрунтових вод. Окрім технічної безпеки, ресурсозберігаючий підхід дозволяє знизити екологічні ризики. Зокрема, розроблені при будівництві тунелів спондилі глини та піски харківського і полтавського ярусів можуть бути використані як вторинна сировина для виробництва керамічних виробів та бетонів, що значно зменшує обсяги відвалів у межах міста. Впровадження технологій компенсаційного нагнітання розчинів дозволяє активно керувати напружено-деформованим станом масиву, мінімізуючи ризик осідання існуючої забудови.

Нештатні ситуації в тунелебудуванні призводять до економічних втрат: прямі витрати на ліквідацію аварій (заморожування, цементация) та непрямі втрати від простою транспортної інфраструктури; екологічних – руйнування ландшафтів, забруднення водоносних горизонтів та неконтрольовані просідання ґрунту; соціальних – втрата безпечних укриттів для населення та порушення життєдіяльності цілих районів мегаполісів.

Військові дії на території України додали специфічні ризики: сейсмовібраційні навантаження від ударів, необхідність проектування об'єктів подвійного призначення з підвищеним рівнем автономії (вентиляція, герметизація), а також ризики консервації (необхідність підтримки безпечного стану об'єктів у періоди вимушеного зупинення робіт). Міжнародна практика, зафіксована у FIDIC (Emerald Book), базується на концепції «Базового геотехнічного звіту» (GBR). Це дозволяє встановити допустимі межі параметрів, вихід за які автоматично запускає механізми адаптації бюджету та термінів [4]. Для вирішення цих завдань закордонний досвід пропонує впровадження Штучного Інтелекту (AI) та Цифрових Двійників (Digital Twins) для прогнозованої оцінки ризиків у реальному часі [5].

На основі вищесказаного, сучасний ризик-менеджмент [6] у вітчизняному тунелебудуванні базується на контролі наступних граничних значень.

- геомеханічні: деформації оправи та осідання поверхні не повинні перевищувати розрахункових значень, адаптованих під динамічні воєнні навантаження;
- гідрогеологічні: мінімізування зміни рівнів підземних вод для запобігання суфозії;
- економічні: врахування ризиків здорожчання ресурсів через зміну логістичних ланцюгів.

В таблиці 1 наведено переваги і недоліки існуючих методик оцінки ризиків.

Таблиця 1. Переваги і недоліки існуючих методик оцінки ризиків

Методика	Переваги	Недоліки
Експертний аналіз	Врахування специфіки локальних ґрунтів	Висока частка суб'єктних рішень
Числове моделювання (FEM)	Детальна візуалізація деформацій	Чутливість до похибок у вхідних даних
Цифрові двійники (Digital Twins)	Моніторинг та прогноз у реальному часі	Потребує значних капітальних інвестицій

Побудована залежність «ризик – можливість впливу» (рис.2) наочно демонструє, що точка перетину кривих припадає на перехід від проектування до будівництва (після початку проходки тунелю будь-яке виявлене ускладнення, наприклад, пливун, вимагає величезних ресурсів для подолання, оскільки «можливість впливу» вже на мінімумі). Це підтверджує, що ефективність ризик-менеджменту в підземному будівництві на 70–80% залежить від якості передпроектних досліджень. скільки на етапі будівництва «Можливість впливу» перебуває на мінімальному рівні, єдиним інструментом контролю залишається випереджальний

моніторинг. Це доводить необхідність впровадження систем на основі ШІ (згідно з [5]), які здатні виявляти загрози до того, як вони стануть некерованими.

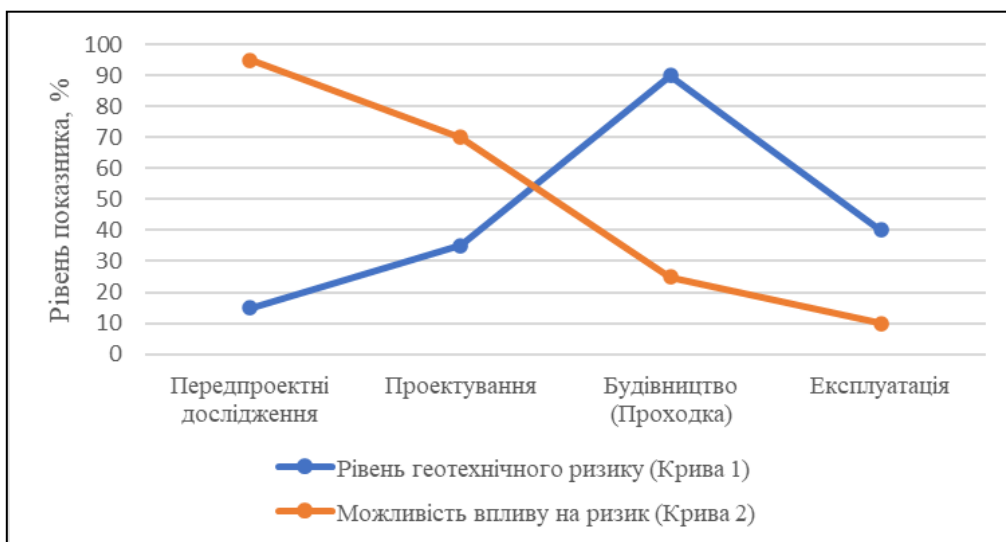


Рис. 2. Динаміка ризиків підземного будівництва та можливості впливу на параметри проекту на різних етапах життєвого циклу споруди.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що врахування ризиків під час спорудження підземних об'єктів в Україні потребує поєднання ресурсозберігаючих методів та сучасних цифрових технологій. Впровадження міжнародних стандартів (ITA-AITES) у вітчизняну інженерну практику забезпечить створення безпечної та екологічно стійкої інфраструктури, що є критично важливим для стабільного функціонування міських систем у сучасних умовах.

Література

1. Розробка та впровадження нових ресурсозберігаючих і техногенно-безпечних технологій будівництва метрополітенів і тунелів в Україні / В. І. Петренко, С. М. Ліхман, В. В. Янікін [та ін.]. Дніпро : ДНУЗТ, 2020. 16 с.
2. Інструментарій планування підземної інфраструктури великих міст для забезпечення мінімізації ризиків її функціонування в умовах мінливого геологічного середовища : звіт про НДР (заключ.) / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» ; кер. Н. Д. Панкратова. Київ, 2021. 257 с. № держреєстрації 0120U104941.
3. Guidelines for Tunnelling Risk Management / ITA-AITES. 2nd ed. Lausanne : International Tunnelling and Underground Space Association, 2024. 45 p.
4. Conditions of Contract for Underground Works (Emerald Book) / FIDIC ; ITA-AITES. 1st ed. Geneva, 2023. 144 p.
5. Alexander L. The Role of Artificial Intelligence in Predictive Risk Assessment for Large-Scale Construction Projects. International Journal of Construction Technology. 2025. Vol. 12, No. 3. P. 45–60.
6. Керування ризиками. Методи оцінки ризиків (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT) : ДСТУ EN IEC 31010:2022. [Чинний від 2023-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 172 с. (Національний стандарт України).

Тетяна Тарасенко
асистент кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського,
ХНАДУ, Україна
e-mail: tanya_tarasenko_dm@ukr.net, тел. +380969789093

ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ МОСТУ ЧЕРЕЗ Р. В. БУРЛУК ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНО- НЕРОЗРІЗНОЇ СХЕМИ

Анотація. У роботі проведено аналіз технічного стану п'ятипрогонового залізобетонного мосту, що зазнав суттєвих руйнувань унаслідок бойових дій. Обґрунтовано вибір технології капітального ремонту, яка передбачає поєднання відновлення опор із влаштуванням температурно-нерозрізної монолітної плити. Запропоновані рішення спрямовані на підвищення довговічності споруди та забезпечення сучасних нормативних вимог щодо вантажопідйомності.

Ключові слова: капітальний ремонт мосту, технічний стан, залізобетонні конструкції, температурно-нерозрізна плита, науково-технічний супровід.

Відновлення транспортної інфраструктури, пошкодженої внаслідок військової агресії, є стратегічним завданням для забезпечення логістики та життєдіяльності регіонів України [6, с. 12-15]. Міст через річку В. Бурлук на автомобільній дорозі О-212648 є критично важливим об'єктом для Харківської області. На момент обстеження споруда знаходилася у 5-му (непрацездатному) стані, що унеможливило її безпечну експлуатацію та потребувало негайного впровадження науково обґрунтованих технологій відновлення [1, с. 8].

Метою дослідження є вибір та опис оптимальної технології капітального ремонту мосту за схемою 5×12 м. Основними завданнями є аналіз дефектів існуючих конструкцій, оцінка їх придатності до подальшого використання та розробка рекомендацій щодо конструктивних рішень, які забезпечать залишковий ресурс споруди понад 50 років [3].

Аналіз технічного стану та дефектів за матеріалами звіту показав, що міст має п'ять прогонів по 12 метрів. Основними пошкодженнями є [1, с. 22-25]:

- повне руйнування прогонової будови №1-2 та часткове руйнування №2-3 із завалюванням балок у підмостовий простір.
- повне засипання берегової опори №1 та руйнування ригельних блоків проміжної опори №2.
- гідроізоляція та мостове полотно повністю зношені, спостерігається корозія арматури та вилуговування бетону.

На основі дефектного акту та результатів лабораторних випробувань міцності бетону (виконаних кафедрою мостів ХНАДУ), обрано технологію комбінованого відновлення з модернізацією статичної схеми.

Основні етапи обраної технології включають:

- демонтаж та розчищення: повне вилучення зруйнованих балок та залишків мостового полотна, які не підлягають відновленню.
- відновлення опор: влаштування нової берегової опори №1 та капітальний ремонт ригелів проміжної опори №2 із посиленням [2].
- влаштування прогонових будов: встановлення нових типових пустотних плит (типу ВТП 21-86) у пошкоджених прогонах.
- модернізація конструкції: впровадження температурно-нерозрізної схеми шляхом влаштування монолітної залізобетонної плити поверх балок по всій довжині мосту (60,7 м).
- захист конструкцій: нанесення вторинного захисного покриття на всі відкриті бетонні поверхні для запобігання біологічній корозії та карбонізації.

За результатами науково-технічного супроводу встановлено, що повне відновлення мосту через р. В. Бурлук можливе лише за умови капітального ремонту з заміною

непрацездатних елементів. Обрана технологія влаштування температурно-нерозрізної монолітної плити забезпечує не лише відновлення геометричних параметрів споруди, але й підвищує її надійність порівняно з початковим проектом. Це дозволяє перевести споруду з 5-го стану в працездатний, забезпечуючи пропуск навантажень Н-30 та НК-80. Основні переваги даної технології поділяються на конструктивні, експлуатаційні та економічні.

Традиційні розрізні системи (де кожен прогін працює окремо) мають суттєвий недолік — концентрацію напружень над опорами. Влаштування монолітної плити, яка об'єднує всі п'ять прогонів (5x12 м) у єдину температурно-нерозрізну систему. Деформаційні шви є «найслабшим місцем» будь-якого мосту [5, с. 112]. У даному проекті їх кількість мінімізується (залишаються лише на берегових опорах). Відсутність швів над проміжними опорами №2, 3, 4 унеможлиблює протікання води, бруду та хлоридів (антижелезних реагентів) на ригелі та опорні частини. Це зупиняє корозію бетону та арматури підферменників, яка була зафіксована у звіті як одна з основних причин деградації конструкцій [4, с. 45]. Відсутність ударних навантажень від коліс автомобілів на шви значно підвищує комфорт руху та зменшує знос підвіски транспортних засобів.

Використання монолітної плити разом із сучасними гідроізоляційними матеріалами створює багатошаровий захисний бар'єр: плита товщиною (зазвичай 12-18 см) ефективно розподіляє локальні навантаження від коліс на більшу кількість балок прогонової будови; оскільки плита бетонується безпосередньо на об'єкті, це дозволяє використовувати бетон з високими показниками за водонепроникністю (W8-W10) та морозостійкістю (F200-F300), що значно перевищує характеристики старих збірних конструкцій [3].

В умовах необхідності швидкого відновлення сполучення в Харківській області, дана технологія має перевагу у темпах робіт – це використання існуючих ресурсів (технологія дозволяє зберегти вцілілі балки прогонів №4 та №5, включивши їх у нову статичну схему разом із новими балками у прогонах №1, 2, 3). Хоча початкові витрати на влаштування монолітної плити дещо вищі за звичайне перекриття швів асфальтобетоном, у довгостроковій перспективі це вигідніше, відбувається: зниження витрат на щорічне обслуговування деформаційних швів; збільшення терміну служби мостового полотна до 15–20 років до наступного середнього ремонту; захист основних несучих конструкцій (опор та балок) від агресивного середовища, що відтерміновує потребу в наступному капітальному ремонті на 40–50 років [5].

Узагальнюючи результати дослідження, слід зазначити, що запропонований комплекс заходів дозволяє не лише відновити транспортне сполучення, а й суттєво модернізувати споруду відповідно до чинних європейських стандартів. Впровадження температурно-нерозрізної системи вирішує ключову проблему деградації залізобетонних мостів — герметичність над опорами. Практична реалізація даної технології гарантує безпечний пропуск сучасних великовагових навантажень Н-30 та НК-80. Даний досвід може бути успішно екстрапольований на інші об'єкти критичної інфраструктури, що потребують якісного відновлення в умовах воєнного стану.

Література

1. Проміжний звіт про НДР «Науково-технічний супровід виконання робіт на об'єкті: Капітальний ремонт мосту через р. В. Бурлук на км 20+057 автомобільної дороги О-212648». – Харків: ХНАДУ, 2023. – 77 с..
2. ДСТУ-Н Б В.2.3-34:2016. Настанова з виконання робіт при будівництві мостів та труб. – К.: Мінрегіон України, 2016..
3. ДБН В.2.3-22:2009. Мости та труби. Основні вимоги проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009..
4. Кваша В. Г. Продвинуті методи підсилення залізобетонних мостів / В. Г. Кваша, В. П. Коваль. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021.
5. Radomski W. Bridge Rehabilitation / W. Radomski. – London: Imperial College Press, 2022.
6. Бугаєвський С. О. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів після бойових пошкоджень / С. О. Бугаєвський, К. В. Бережна // Вісник ХНАДУ. – 2023. – № 102..

Владислав Фітаров

аспірант кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки імені В.О. Російського

ХНАДУ, Україна

e-mail: fitarov24@gmail.com, тел. +380966712312

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ФУНДАМЕНТІВ МОСТІВ

Анотація. У роботі розглянуто критерії вибору сучасного програмного забезпечення для моделювання роботи фундаментів мостів з урахуванням особливостей системи «грунтова основа – фундамент – надфундаментна конструкція», просторової роботи, контактної взаємодії та стадійності зведення. Виконано порівняльний аналіз програмних комплексів PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, Abaqus і RSPile за трьома ключовими критеріями: реалізація моделей ґрунту, можливості моделювання фундаментних систем та урахування будівельної послідовності. Встановлено, що найбільш придатними для комплексного моделювання фундаментів мостів є універсальні геотехнічні програмні комплекси, тоді як універсальні платформи загального призначення та вузькоспеціалізовані програми доцільно застосовувати з урахуванням меж їх функціональної придатності.

Ключові слова: фундаменти мостів, геотехнічне моделювання, програмне забезпечення, моделі ґрунту, контактна взаємодія, стадійність зведення.

Сучасне проєктування фундаментів мостів потребує врахування складної взаємодії системи «грунтова основа – фундамент – надфундаментна конструкція», просторового характеру роботи споруди, контактної взаємодії між ґрунтом і конструктивними елементами, а також впливу стадійності зведення на напружено-деформований стан системи. За таких умов чисельне моделювання є одним із ключових інструментів геотехнічного обґрунтування проєктних рішень. Водночас сучасна інженерна практика пропонує широкий спектр програмних комплексів, що істотно відрізняються за ступенем спеціалізації, складом моделей ґрунту, можливостями просторового моделювання та урахуванням будівельної послідовності. Це зумовлює необхідність обґрунтованого вибору програмного забезпечення для задач моделювання фундаментів мостів на основі чітко визначених критеріїв [1].

Метою дослідження є визначення критеріїв вибору сучасного програмного забезпечення для моделювання роботи фундаментів мостів, порівняльна оцінка придатності програмних комплексів різних класів за цими критеріями та обґрунтування доцільності їх застосування залежно від характеру інженерної задачі.

Програмні засоби, що застосовуються для геотехнічного чисельного моделювання, доцільно поділяти на три основні групи: універсальні геотехнічні програмні комплекси, універсальні платформи чисельного моделювання загального призначення та вузькоспеціалізовані програмні засоби. У межах цього дослідження для порівняльного аналізу обрано PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX, FLAC3D, Abaqus і RSPile. PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і FLAC3D репрезентують клас універсального геотехнічного програмного забезпечення, Abaqus – клас універсальних платформ загального призначення, а RSPile – клас вузькоспеціалізованих програмних засобів для аналізу паль і пальових фундаментів.

У роботі основну увагу зосереджено на трьох ключових критеріях, які є визначальними саме для моделювання фундаментів мостів:

- 1) моделі ґрунту;
- 2) можливості моделювання фундаментних систем, просторової роботи та контактної взаємодії;
- 3) урахування стадійності зведення.

Саме ці критерії безпосередньо впливають на достовірність опису роботи системи «основа – фундамент – споруда» та на обґрунтованість прийнятих проєктних рішень.

Першим ключовим критерієм є склад і рівень реалізації моделей ґрунту. Саме модель ґрунту значною мірою визначає точність прогнозу осідань, характер розподілу напружень і деформацій, а також достовірність оцінки спільної роботи основи та фундаменту. Для задач мостових фундаментів важливо, щоб програмний комплекс давав змогу застосовувати не лише базові пружно-пластичні моделі, а й моделі, що враховують залежність жорсткості від напруженого стану, малі деформації, надконсолідацію, часозалежну поведінку та, за потреби, циклічні впливи. У спеціалізованих геотехнічних програмних комплексах – PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і FLAC3D – реалізовано розвинені бібліотеки моделей ґрунтів і скельних порід. Для PLAXIS 3D документовано, зокрема, моделі Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Hardening Soil small, Modified Cam Clay, Soft Soil, Soft Soil Creep, Hoek-Brown і Jointed Rock [2]. У MIDAS GTS NX подано широкий перелік моделей, зокрема Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Modified Cam Clay, Soft Soil, Soft Soil Creep і Hoek Brown [3]. У FLAC3D доступний набір механічних моделей від пружних до сильно нелінійних пластичних, включно з Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Modified Cam-Clay і Hoek-Brown [4]. Abaqus також містить моделі, придатні для геотехнічного аналізу, однак вони є частиною загальної матеріальної бібліотеки, а не спеціалізованого геотехнічного середовища. RSPile використовує спеціалізовані ґрунтові залежності для аналізу паль, але не орієнтований на повне континуальне моделювання ґрунтового масиву [5].

Другим ключовим критерієм є можливості моделювання фундаментних систем, просторової роботи та контактної взаємодії. Для фундаментів мостів вирішальне значення має здатність програмного комплексу відтворювати роботу системи «основа – фундамент – споруда» в межах єдиної просторової моделі, враховувати контактну взаємодію між ґрунтом і конструкцією, а також забезпечувати коректний опис розподілу навантаження між елементами фундаментної системи. PLAXIS 3D орієнтований на тривимірний геотехнічний аналіз ґрунту, скельних порід і пов'язаних конструкцій; у його довідкових матеріалах окремо наведено структурні елементи, інтерфейси та задачі моделювання фундаментів. MIDAS GTS NX також орієнтований на моделювання системи «ґрунт – споруда» та підтримує відповідні матеріальні, контактні й розрахункові постановки. FLAC3D придатний до складних просторових і нелінійних задач завдяки поєднанню механічних моделей і структурних елементів. Abaqus дає змогу реалізувати складні контактні задачі та тривимірні моделі, однак практична реалізація геотехнічної постановки в ньому зазвичай потребує більшої трудомісткості. RSPile є ефективним для аналізу паль і пальових груп, але не призначений для повного просторового моделювання всієї мостової фундаментної системи.

Третім ключовим критерієм є урахування стадійності зведення. Для мостових фундаментів це має принципове значення, оскільки напружено-деформований стан системи залежить від послідовності виконання робіт, введення та виведення елементів із розрахунку, поетапного прикладання навантажень, зміни граничних умов і перенесення стану між окремими розрахунковими стадіями. У PLAXIS 3D передбачено поетапне моделювання з можливістю зміни геометрії, навантажень, умов водонасичення та активності елементів між стадіями. У MIDAS GTS NX реалізовано аналіз за стадіями зведення та засоби задання стадій, що дають змогу керувати елементами, навантаженнями, граничними умовами й тривалістю окремих етапів [6]. У FLAC3D поетапність забезпечується через послідовну зміну стану моделі, вилучення ґрунту, введення конструктивних елементів і поетапне доведення системи до рівноваги. В Abaqus стадійність може бути реалізована через послідовні розрахункові кроки, а також через вилучення та повторне введення елементів і контактних взаємодій [7]. RSPile не орієнтований на повне поетапне моделювання будівельної послідовності системи «основа – фундамент – споруда».

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що для комплексного моделювання фундаментів мостів найбільш придатними є універсальні геотехнічні програмні комплекси, зокрема PLAXIS 3D, MIDAS GTS NX і FLAC3D. Саме вони найбільш повно охоплюють ключові вимоги таких задач за сукупністю трьох основних критеріїв: моделей ґрунту, моделювання фундаментних систем із урахуванням просторової роботи та контактної

взаємодії, а також стабільності зведення. Abaqus, попри високий рівень гнучкості, є менш придатним для типових задач моделювання мостових фундаментів через відсутність спеціалізованої геотехнічної орієнтації та складнішу реалізацію окремих аспектів моделювання. RSPile є ефективним переважно для розрахунку паль і палювих груп, але не для повноцінного комплексного моделювання системи «основа – фундамент – споруда».

Отже, вибір сучасного програмного забезпечення для моделювання роботи фундаментів мостів доцільно здійснювати не за формальною універсальністю програми, а за її відповідністю критеріям, що є визначальними для конкретної інженерної задачі. При цьому порівняльну оцінку програмних комплексів доцільно проводити насамперед за критеріями реалізації моделей ґрунту, можливостей моделювання фундаментних систем з урахуванням просторової роботи та контактної взаємодії, а також засобів урахування стабільності зведення. Для комплексного аналізу мостових фундаментів найбільш раціональним є використання спеціалізованих універсальних геотехнічних програмних комплексів, тоді як універсальні платформи загального призначення та вузькоспеціалізовані програми слід застосовувати з урахуванням меж їх доцільного використання.

Література

1. Pauselli, D., Salciarini, D., & Ubertini, F. (2022). Three-dimensional modeling of soil-structure interaction for a bridge founded on caissons under seismic conditions. *Applied Sciences*, 12(21), 10904. <https://doi.org/10.3390/app122110904>
2. Bentley Systems. (2025). *Materials models manual*. PLAXIS 3D Help.
3. MIDAS IT. (n.d.-b). *Material*. GTS NX User Manual.
4. Itasca Consulting Group, Inc. (n.d.). *Constitutive models in FLAC3D and 3DEC*. FLAC3D 7.0 Documentation.
5. Rocscience Inc. (n.d.). *Soil properties*. RSPile Documentation.
6. MIDAS IT. (n.d.-a). *Construction stage set*. GTS NX User Manual.
7. Dassault Systèmes. (2024). *Element and contact pair removal and reactivation*. Abaqus Documentation.

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ АРМОВАНИХ НАСИПІВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ШТУЧНИХ СПОРУД ІЗ МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. У тезах розглянуто сучасні проблеми застосування армованих насипів при реконструкції штучних споруд із металевих гофрованих конструкцій. Проаналізовано основні фактори, що впливають на роботу системи «грунт – армування – конструкція», та визначено напрями подальших досліджень у цій сфері.

Ключові слова: металеві гофровані конструкції, армовані насипи, реконструкція споруд, геосинтетичне армування, ґрунтовий масив.

В умовах відновлення транспортної інфраструктури України особливої актуальності набуває реконструкція штучних споруд із використанням сучасних технологічних рішень. Одним із перспективних напрямів є застосування металевих гофрованих конструкцій (МГК), які відзначаються високою технологічністю монтажу, економічністю та довговічністю. Актуальність використання МГК у транспортному будівництві підтверджується низкою досліджень, у яких відзначається їх ефективність при будівництві та ремонті інженерних споруд [1-4; 6-8]. Ефективність роботи таких конструкцій значною мірою визначається взаємодією металевої оболонки з навколишнім ґрунтовим середовищем, особливо в умовах реконструкції, коли конструкція інтегрується в існуючий ґрунтовий масив із неоднорідними характеристиками..

Актуальність проблеми зумовлена тим, що при реконструкції споруд із МГК виникають додаткові складнощі, пов'язані з наявністю залишкових деформацій основи, ослаблених зон ґрунту, нерівномірним ущільненням та зміною фізико-механічних властивостей ґрунтового середовища після тривалої експлуатації. Як показано в роботах, присвячених армованим основам та геосинтетичним матеріалам [2, 3], такі фактори суттєво впливають на напружено-деформований стан конструкцій і можуть призводити до нерівномірних осідань та локальних перевантажень. У таких умовах застосування армованих насипів є ефективним способом підвищення несучої здатності основи та стабілізації роботи системи.

Сучасні дослідження, починаючи з класичних робіт Н. Vidal [4], показують, що армування ґрунту геосинтетичними матеріалами дозволяє зменшити вертикальні та горизонтальні переміщення, покращити рівномірність розподілу навантажень і знизити ризик локальних деформацій. Вітчизняні нормативні документи також підтверджують доцільність застосування геосинтетики у дорожньому будівництві [5]. Водночас більшість існуючих методик розрахунку орієнтовані переважно на нове будівництво та не враховують специфіки реконструкції, де важливим фактором є попередня історія навантаження ґрунтової основи та її структурні порушення.

Особливістю армованих насипів навколо МГК є те, що армуючі прошарки беруть участь у перерозподілі напружень, частково компенсуючи вплив ослаблених зон основи. Це підтверджується результатами чисельних досліджень, наведених у роботах [6; 7], де показано, що армований ґрунт здатен сприймати значну частину навантаження, зменшуючи напруження в металевій оболонці конструкції. Така взаємодія забезпечує більш рівномірний розподіл напружень і підвищує загальну стійкість системи.

Армований насип слід розглядати як складну геотехнічну систему, в якій геосинтетичні матеріали виконують функцію перерозподілу зусиль і обмеження деформацій. При цьому ефективність армування значною мірою залежить від параметрів ґрунту, характеристик армуючих елементів та технології їх улаштування [8]. Особливої уваги потребує врахування

нелінійної поведінки ґрунтів, що дозволяє більш адекватно описати реальні умови роботи системи, зокрема розвиток пластичних деформацій та локалізацію напружень.

Попри значний розвиток теорії армованих ґрунтів, залишаються невирішеними такі питання: недостатнє врахування фізичної нелінійності ґрунтів у розрахункових моделях; відсутність адаптованих підходів до оцінки роботи систем у умовах реконструкції; нестача експериментальних польових досліджень для верифікації чисельних моделей; відсутність єдиної методики оцінки довговічності армованих насипів у складних інженерно-геологічних умовах. У цьому контексті перспективними є дослідження, спрямовані на розробку комплексних чисельних моделей із урахуванням поетапності реконструкції, контактної взаємодії елементів системи та впливу ослаблених зон ґрунтового масиву.

Реконструкція штучних споруд із металевих гофрованих конструкцій із застосуванням армованих насипів є перспективним напрямом розвитку транспортного будівництва, що дозволяє підвищити надійність та довговічність інженерних споруд. Аналіз сучасних досліджень показує, що ключовими проблемами залишаються неоднорідність ґрунтових основ, складність прогнозування їх деформування та недостатня адаптованість нормативної бази до умов реконструкції. Подальший розвиток методів розрахунку має бути спрямований на врахування реальних умов роботи системи «ґрунт – армування – МГК», що дозволить підвищити достовірність інженерних рішень і ефективність впровадження сучасних конструктивних технологій.

Література.

1.Юдін В.О. Актуальність застосування металевих гофрованих конструкцій при будівництві та ремонті транспортних споруд на дорогах України // Збірник тез I Міжнародної науково-практичної конференції ім. П.М. Ковалюка. – Запоріжжя, 2021. – С. 93–95.

2.Усиченко О.Ю., Барабанова Т.Г. Аналіз існуючих методів розрахунків армування основ дорожніх конструкцій // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. – 2010. – Вип. 78. – С. 30–43.

3.Друкований М.Ф., Матвеев С.В., Корчевський Б.Б. Армовані основи будівель та споруд: монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 235 с.

4.Vidal H. The Principle of Reinforced Earth // *Highway Research Record*. – 1969. – № 282. – Р. 1–16.

5.ГБН В.2.3-37641918-544:2014. Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги. – Київ, 2014. – 147 с.

6.Смолянчук Н.В., Більченко А.В. Чисельний аналіз односклепінчастої станції мілкового закладення Харківського метрополітену // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. – 2024. – № 25. – С. 109–116.

7.Юдін В.О., Беззубачева О.І., Титок В.П. Комп'ютерна модель та аналіз застосування армованого ґрунту навколо збірної металевої гофрованої конструкції під залізничними коліями // *Вісник ХНАДУ*. – Харків, 2025. – №108. – С. 276–279.

8.Черний Г.І., Ковальський Р.К., Шаповал А.В. Особливості визначення напружено-деформованого стану армованих ґрунтових основ з використанням методу скінченних елементів // *Будівельні конструкції*. – 2001. – Вип. 55. – С. 159–172.

*Комп'ютерне моделювання будівельних споруд та
промислового дизайну*

Олександр Архінов
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної графіки,
ХНАДУ, Україна
e-mail: alex.khadi.kharkov@gmail.com, тел. +380992456145
Владислав Поторянський
студент, ХНАДУ, Україна
e-mail: potoryanskiy.vlad@gmail.com, тел. +380950248965

ЗАСОБИ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ПРОГРАМИ AUTODESK INVENTOR ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ПРОМИСЛОВОМУ ДИЗАЙНІ

Анотація. В роботі розглядаються питання параметричного комп'ютерного моделювання в програмі Autodesk Inventor окремих побутових та машинобудівних деталей, вузлів та агрегатів, елементи яких адаптивно пов'язані між собою. Запропоновані підходи було апробовано при створенні великої кількості параметричних комп'ютерних моделей побутових виробів, деталей, вузлів та агрегатів автомобілів. Наведено приклади побудованих тривимірних моделей.

Ключові слова: промисловий дизайн, параметризація, Autodesk Inventor, геометричне моделювання.

Нині тривимірне параметричне моделювання відіграє важливу роль у різних напрямках інженерної діяльності. Комп'ютерна параметрична модель виробу дає змогу швидко опрацювати різні варіанти його геометрії, оцінювати всі переваги та недоліки тієї чи іншої конструкції, аналізувати обране композиційне рішення. Водночас під час підготовки фахівців у галузі конструювання та промислового дизайну апарат параметричного моделювання зазвичай не використовують. З іншого боку, дизайн – це завжди нова компоновка вже створеного, відомого, відкритого чи знайденого. Параметричне ж моделювання дозволяє простежити історичні зміни геометрії промислових виробів і прогнозувати перспективні дизайнерські рішення.

Метою роботи стали аналіз та апробація методів та алгоритмів побудови в програмі Autodesk Inventor [1] складних параметричних моделей окремих деталей та виробів, елементи яких геометрично пов'язані, розробка тривимірних моделей ряду складних побутових та машинобудівних виробів та надання рекомендацій щодо можливості їх подальшого застосування.

Параметрична модель виробу допускає адаптивну зміну не лише лінійних параметрів форми окремих його частин і кількості елементів масивів конструктивних елементів, а й дає змогу в межах однієї моделі досить суттєво змінювати геометрію виробу. Можливість створення таких моделей у програмі Autodesk Inventor ґрунтується на таких фактах:

- взаємне розташування робочих площин, що містять геометричну частину визначника поверхонь деталей, може бути параметром, що допускає зміну в межах однієї геометричної моделі;

- сама геометрія утворюючих (або контурів), направляючих, траєкторій видавлювання, використовуваних при кінематичному способі завдання поверхонь деталей, може бути підпорядкована відповідним параметрам (наприклад, дуга кола при збільшенні значення її радіуса наближається до прямої).

Останні ж версії пакету Autodesk Inventor дають істотну перевагу, коли необхідно в рамках однієї параметричної моделі врахувати найнеймовірніші зміни геометрії тіла. Функція Inventor iLogic, що з'явилася в них, дозволяє прописувати на етапі створення моделі ті чи інші правила (інструкції), що безпосередньо впливають на геометрію моделі, а надалі їх редагувати. Компонент iLogic впроваджує правила у вигляді об'єктів безпосередньо в деталь (складання) та документи креслеників. Ці правила визначають значення параметрів і атрибутів для проєкту, а також керують ними.

Сучасні версії таких конструкторських пакетів, як Autodesk Inventor, SolidWorks, Компас, T-Flex CAD, надають широкі можливості для створення параметричних моделей

виробів різної геометричної форми. Операції моделювання в них по суті є кінематичними, тобто дуже схожими на один із основних способів формоутворення реальних виробів.

Не завжди для розв'язання завдань дизайну потрібне використання складного формоутворення. Параметрична модель вази (рис. 1) може бути отримана простою операцією обертання (подібно до руху гончарного круга) [2].



Рис. 1. Параметрична модель вази

Авторами побудовано велику кількість моделей, що передбачають найширші зміни геометрії всіх елементів виробу. Так, на рис. 2 представлено параметричну модель класичного м'якого стільця. Спинка стільця спочатку створювалася як перетин двох елементів обертання, що дає їй змогу мати випукло-увігнуту конфігурацію у двох напрямках. Завершальні етапи створення наведених моделей показано на рис. 3.



Рис. 2. Параметрична модель класичного стільця

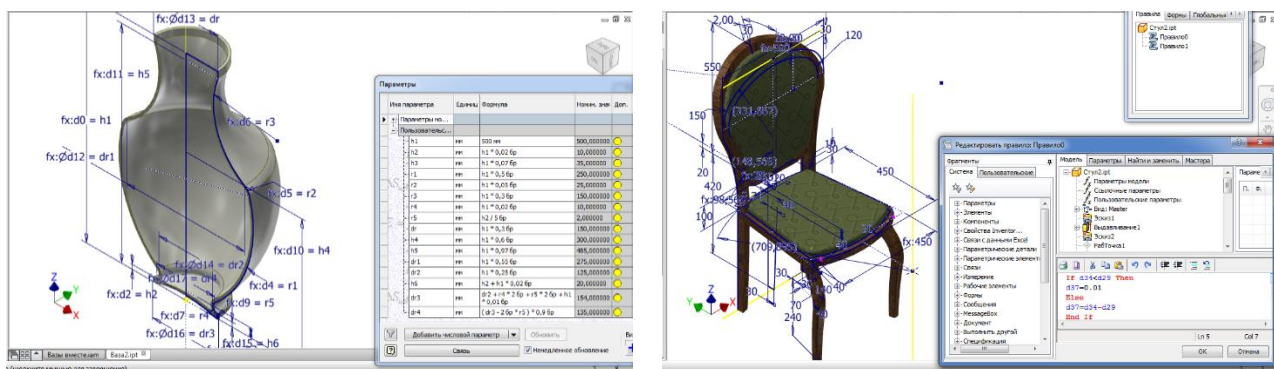


Рис. 3. Робочий стіл Autodesk Inventor на етапі створення моделей

Великою різноманітністю відрізняється геометрія радіаторних решіток сучасних легкових автомобілів. Використання засобів параметризації та алгоритму, наведеному нами в роботі [3], дозволяє побудувати модель, що враховує основні дизайнерські тенденції (рис. 4).

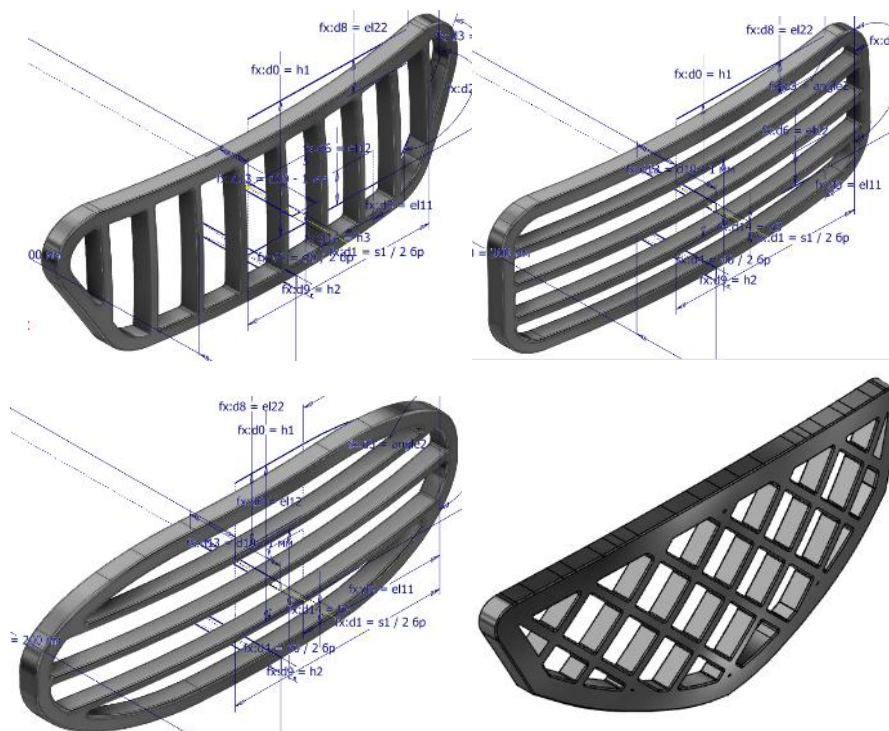


Рис. 4. Параметрична модель радіаторної решітки автомобіля

Програма Autodesk Inventor надає широкі можливості для створення параметричних моделей як окремих деталей, так і параметричних моделей складань на їх базі. Але практична значимість параметричної моделі виробу визначається тим, якою мірою враховані в ній можливі зміни геометрії її елементів. Звісно, бажано, щоб зміна геометрії кожної окремої деталі відбувалась автоматично зі зміною інших деталей, які геометрично з нею пов'язані, та навпаки. Це можливо при використанні засобів адаптивного проектування [4].

На етапі апробації наведених у роботі [5] алгоритмів було побудовано параметричну модель форсунки для розпилення рідкого палива під час його спалювання у топках парових котлів. Варіювалися довжина та витратні характеристики форсунки (рис. 5).

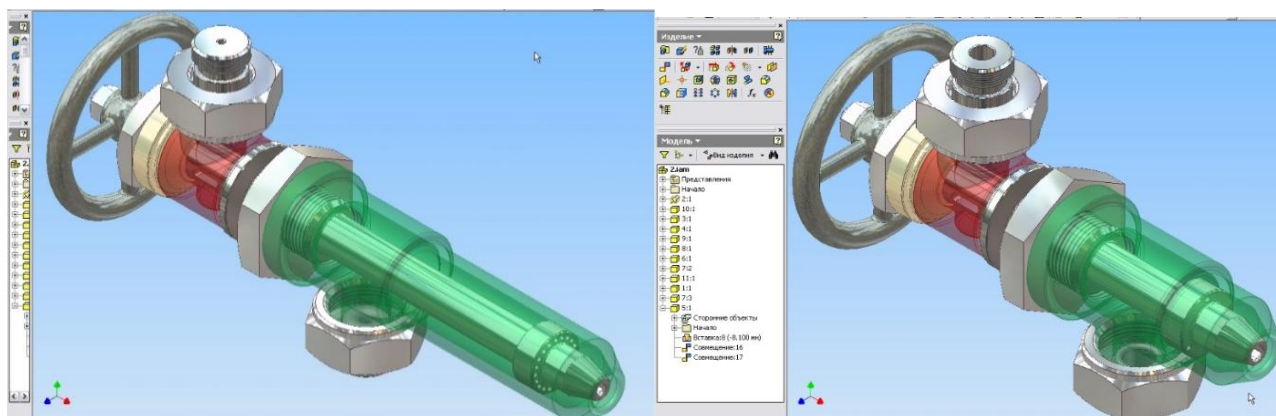


Рис. 5. Параметрична модель форсунки

Звичайно, створення повністю параметризованої моделі вузла потребує додаткових зусиль та часу. Разом з тим, якщо параметрична модель виробу створена на належному рівні, вона дозволяє швидко отримувати шляхом зміни лише декількох параметрів практично необмежену кількість варіантів конструкторських рішень, які потім зручно аналізувати та оптимізувати. В кінцевому рахунку це забезпечує скорочення термінів проєктування за рахунок автоматизації. Отримані нами комп'ютерні моделі, тут ми навели лише невелику їх частину, можуть використовуватися для розрахунку полів напруг, температур, гідродинамічних розрахунків із застосуванням таких пакетів як ANSYS, Nastran, SimuLink, Cosmos Flow Simulation та ін.

Література

1. Banach D.T., Jones T., Lockhart S. Autodesk Inventor 2022 Essentials Plus. SDC Publications. 2021. 536 p.
2. Архіпов, О. Особливості застосування програми Autodesk Inventor у промисловому дизайні. *Scientific Collection "InterConf"*. 2023. № 148. Р. 466 – 473. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/2865> (дата звернення: 10.04.2026).
3. Архіпов О.В. Створення параметричних рядів деталей при проєктуванні в автомобілебудуванні. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь : МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2017. Вип. 9. С. 11 – 15.
4. Архіпов О.В., Масляев К.В., Ланцов Д.О. Параметричне комп'ютерне моделювання в дизайні автомобільних вузлів та агрегатів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Київ : КНУБА, 2018. Вип. 94. С. 3 – 7.
5. Архіпов О.В., Бондаренко О.В., Корецький Я.С. Створення параметричної моделі автомобільного вузла засобами програми Autodesk Inventor. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь : МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2024. Вип. 26. С. 3 – 13. DOI: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2024-26-3-13>.

Людмила Гапонова
к.т.н., доцент, завідувач кафедри комп'ютерної графіки
ХНАДУ, Україна
e-mail: gplyudmila@gmail.com
тел. +380509819538
Микола Назаренко
здобувач ДМ-31-23, ХНАДУ, Україна

ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД

Анотація. У статті наведено інформацію щодо визначення конструктивного рішення теплоізоляційної оболонки будинків за показниками теплової надійності, виконано розрахунок тепловологісного стану експериментальної огорожувальної конструкції.

Ключові слова: теплофізичні властивості, огорожуюча конструкція.

Для розгляду процесів тепло- і масообміну, що відбуваються при формуванні температурно-вологісного режиму приміщення, потрібно враховувати: вимоги до характеристик внутрішнього клімату та чинники, що впливають на них; закони взаємодії огорожувальних конструкцій з внутрішніми і зовнішніми середовищами; тепло- і масообмінні процеси на обігрівальних і охолоджувальних поверхнях [1, 2]. Розглядаючи нестационарні процеси, такі як охолодження будівельної конструкції, її зволоження введемо гранично допустимий стан процесів, що впливають на особливості експлуатації конструкцій. При чисельному рішенні задачі приймалися такі вихідні дані: розрахункова температура внутрішнього повітря $t_{в} = 22^{\circ}\text{C}$; розрахункова температура зовнішнього повітря $t_{н} = -23^{\circ}\text{C}$; коефіцієнт Пуассона бетону 0,17; коефіцієнт конвективного теплообміну на внутрішній поверхні $\alpha_{вн} = 8,7 \text{ Вт / м}^2\text{C}$; на зовнішній поверхні приймалося $\alpha_{н} = 23 \text{ Вт / м}^2\text{C}$. Розрахунок тепловологісного стану огорожувальних конструкцій будинку виконано графічно за допомогою програмного забезпечення для типових конструктивних рішень огорожувальних конструкцій будинку. Облік теплової інерції, теплостійкості, повітропроникності, вмісту вологи розробленої конструктивної системи є одними з істотних критеріїв вибору конструктивного рішення огорожувальної конструкції (рис.1).



Рис. 1. Експериментальна огорожуюча конструкція

Зовнішній облицювальний шар виконується із керамічної пустотілої цегли М100 на розчині М100. Кріплення зовнішнього облицювального шару до бетону виконується на гнучких зв'язках із арматури Ø10 А400С.

Розподіл температури в товщі огорожувальної конструкції визначається за формулою:

$$t(x) = t_e - \frac{t_e - t_3}{R_\Sigma} \left(\frac{1}{\alpha_e} + R_x \right), \quad (1)$$

де t_e – внутрішня температура приміщення, $^{\circ}\text{C}$, що визначається в залежності від призначення приміщення за додатком Г ДБН В.2.6-31 або за проектною документацією будинку;

t_3 - розрахункова температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$, що визначається за ДСТУ-Н Б В.1.1-27 в залежності від регіону України для якого проводиться розрахунок, як середня місячна температура повітря;

R_Σ - опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$;

α_e - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, приймається за додатком Е ДБН В.2.6-31;

R_i - опір теплопередачі шарів огорожувальної конструкції, $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$, що розташовані до площини, для якої проводиться розрахунок, починаючи з приміщення.

Опір теплопередачі термічно однорідної непрозорої огорожувальної конструкції розраховується за формулою:

$$R_\Sigma = \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_3} = \frac{1}{\alpha_e} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{\alpha_3}, \quad (2)$$

де α_e, α_3 - коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь огорожувальної конструкції, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, які приймаються згідно з додатком Е;

R_i - термічний опір i -го шару конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

λ_{ip} - теплопровідність матеріалу i -го шару конструкції в розрахункових умовах експлуатації (згідно з додатком Л), $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

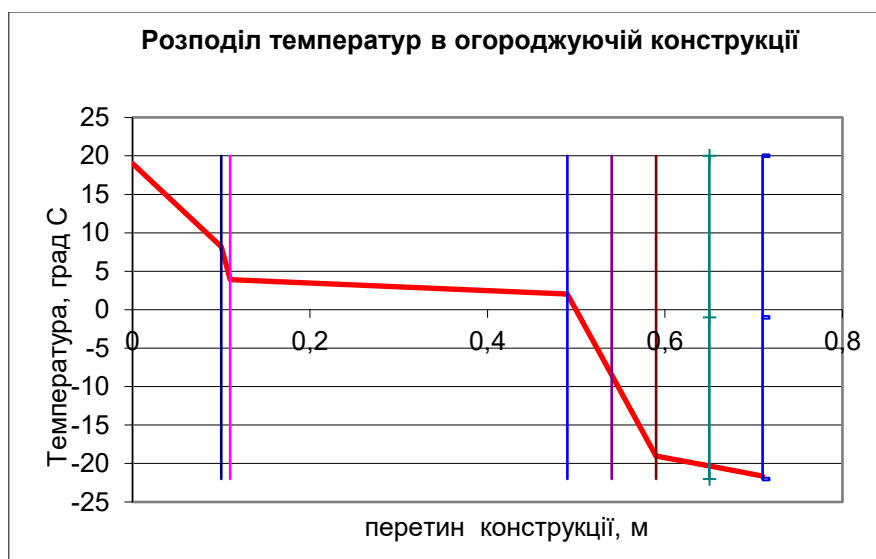


Рис. 2. Розподіл температур в огорожувальній конструкції при наружній температурі повітря -23°C.

Отриманий температурний розподіл будують, відкладаючи по осі абсцис значення опорів паропроникненню. Парціальний тиск насиченої водяної пари $E(R_e)$ визначається за довідковими даними $E(t)$ по розподілу температури в товщі конструкції.

Парціальні тиски водяної пари e зовнішнього та внутрішнього повітря визначаються за розрахунковими значеннями відносної вологості повітря φ_θ та значеннями парціального тиску насиченої водяної пари E , за формулою:

$$e = 0,01 \cdot \varphi_\theta \cdot E, \quad (3)$$

Значення відносної вологості φ_θ в залежності від місяця року та місцезонашування об'єкту визначається за ДСТУ-Н Б В.1.1-27. Графічну побудову розподілу парціальних тисків виконують наступним чином: по вісі абсцис відкладають шкалу опору паропроникненню R_e , по вісі ординат відкладають шкалу парціальних тисків E та e . У разі, якщо в результаті розрахунку огорожувальної конструкції для найбільш холодного місяця року за ДСТУ-Н Б В.1.1-27 розподіл $e(R_e) < E(R_e)$ для будь-якого $R_e \in [0, R_{e\Sigma}]$, умови вважаються виконаними. У разі, якщо в результаті розрахунку огорожувальної конструкції для найбільш холодного місяця року за ДСТУ-Н Б В.1.1-27 лінії $e(R_e)$ та $E(R_e)$ перетинаються – це означає наявність зони конденсації водяної пари.

Розрахунок приросту вологи Δw у шарі матеріалу, у якому відбувається конденсація вологи (у разі розташування зони конденсації на межі шарів приріст розраховується для шару, прилеглого до зони конденсації з боку внутрішньої поверхні), за формулою:

$$\Delta w = \frac{W_{zn}}{\delta_k \rho_k} 100, \quad (4)$$

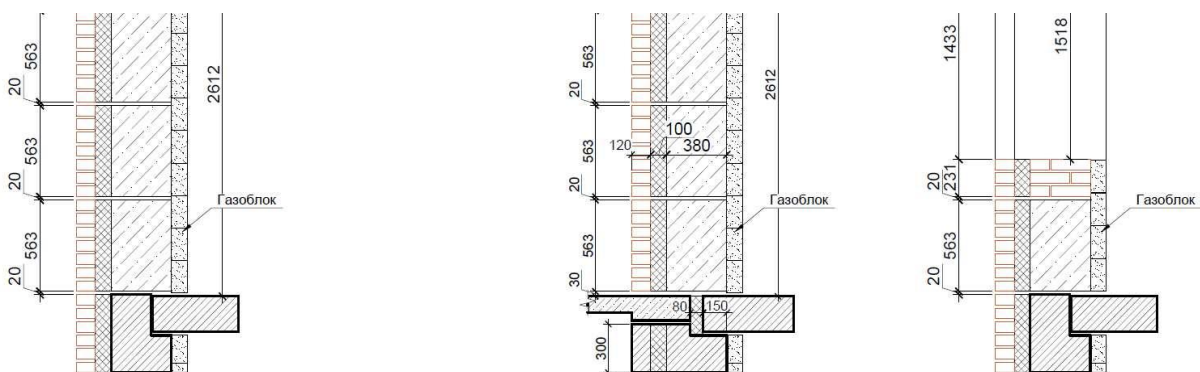
де δ_k – товщина шару матеріалу, м, у якому відбувається накопичення вологи, що конденсується;

ρ_k – густина шару матеріалу, в якому відбувається конденсація вологи, кг/м³.

Термічний опір розглядаємої конструкції $R = 2,95 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ треба довести до діючого на сьогодні.

Конструктивні рішення: тришарові блоки у складі проектної конструкції зовнішніх стін засовуються у комплексі з внутрішнім облицюванням газобетонними блоками D400, що відмежовуються замкнутим повітряним прошарком товщиною 10 мм. Завдяки газобетонним блокам досягаються нормативні показники теплоефективності, а також поліпшується якість фінішного опорядження.

Конструкція блока зовнішньої стіни складається із чотирьох шарів: бетонного товщиною 380 мм, утеплювача товщиною 100 мм і облицювального із керамічної цегли товщиною 120 мм, а також внутрішнього облицювання блоками з газобетону.



**Рис.3. Перерізи чотиришарового блоку несучої стіни житлової будівлі
Бетонний шар виконується із бетону кл. С8/10 (M150).**

Висновки. За проведеними розрахунками встановлено, що в даній конструкції зовнішньої стіни процес конденсації водяної пари відбувається на протязі трьох місяців: грудень, січень, лютий. В інші місяці року відбувається процес випаровування вологи, що сконденсувалась. Оцінюють збільшення вологості матеріалу у товщі шару конструкції, в якому може відбуватися конденсація вологи, за холодний період року. В даному випадку зволожується шар, оскільки він є прилеглим до зони конденсації з боку внутрішньої поверхні стіни.

$$\Delta w = 1,05 \%$$

Отже, згідно нормативних документів, збільшення вологості за холодний період року є допустимим.

Проведений аналіз, дослідження критеріїв теплових відмов та критичного стану теплоізоляційної оболонки. Виконана чисельна реалізація та розроблені конструктивні рішення розглядаємих огороджувачих конструкцій.

Література

1. Фаренюк Г.Г. Нормативне забезпечення при застосуванні конструкцій фасадної теплоізоляції житлових та громадських будинків / Фаренюк Г.Г. // Будівництво України. – 2009. - № 1-2. – С.12-16.
2. ДСТУ - Н. В.2.6.192: 2013. Настава з розрахунку тепловологічного стану огороджувачих конструкцій. Київ. Мінрегіонбуд, 2013. – 132с.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ В ПРОФЕСІЙНІЙ ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

Анотація. В роботі розглядається методика підготовки фахівців будівельної галузі, що базується на новій концепції, яка використовує стереоскопічний ефект для підвищення ефективності дистанційного навчання.

Ключові слова: форми навчання, відкрита система навчання, простора уява, стереоскопічний ефект, стереопара, анагліфи, конвертер.

Сучасна підготовка фахівців будівельної галузі вимагає проводити пошуки нових методів передачі знань і технологій навчання, а також пошуки щодо вдосконалення навчального процесу.

Основною функцією якого є пізнання, спрямоване на задоволення потреб фахівців у теоретичних та практичних знаннях.

Це зумовлює використання нових, нетрадиційних форм і методів навчання. Критерієм пошуку нових підходів до навчання є і має залишатися принцип підвищення зацікавленості, пробудження смаку до самостійного мислення, творчості, набуття досвіду самостійної і відповідальної діяльності, розвиток творчого потенціалу. Реалізація зазначених вимог досягається впровадженням у відкриту систему навчання способу, в якому легко відчувається глибина простору, і об'ємність предметів дослідження.

Сучасна методика підготовки фахівців будівельної галузі повинна базуватися на новій концепції, яка враховує як особливості побудови курсу, так і застосування на практиці нових прогресивних і доступних методів для відкритої системи навчання.

Ідея розробки методики з використанням стереоскопічного ефекту виникла у зв'язку з необхідністю підвищення ефективності навчання, яка вигідно відрізняється від традиційних методів навчання і має наступні позитивні якості:

- сприяє глибшому засвоєнню і міцному запам'ятовуванню матеріалу;
- активізує пізнавальну, інтелектуальну і творчу діяльність;
- викликає надзвичайний інтерес, створює специфічний емоційний настрій.

Отримані такою методикою знання, способи дій переосмислюються приводячи до нових висновків та узагальнень.

Методика з використанням стереоскопічного ефекту є важливим фактором підвищення ефективності відкритої системи навчання. Але застосовувати її потрібно до місця і вміло. Не можна недооцінювати, але ні в якому разі не слід переоцінювати, покладати невинуваті надії і вимагати від неї того, чого вона за своєю суттю не може дати.

За допомогою стереоскопічного ефекту можна зробити доступними до сприяння будь-які просторові елементи будівельної галузі. З цією метою, тобто для розвитку просторової уяви, доцільно виготовити електронний посібник.

Розрахувати та накреслити таку стереопару, звичайно, не так просто, але застосування сучасних комп'ютерних технологій і математичного забезпечення (наприклад, пакетів прикладних програм Autodesk) спрощує завдання виготовлення стереопари будь-яких просторових об'єктів для отримання інтегрованих анагліфних зображень (рис. 1-4).

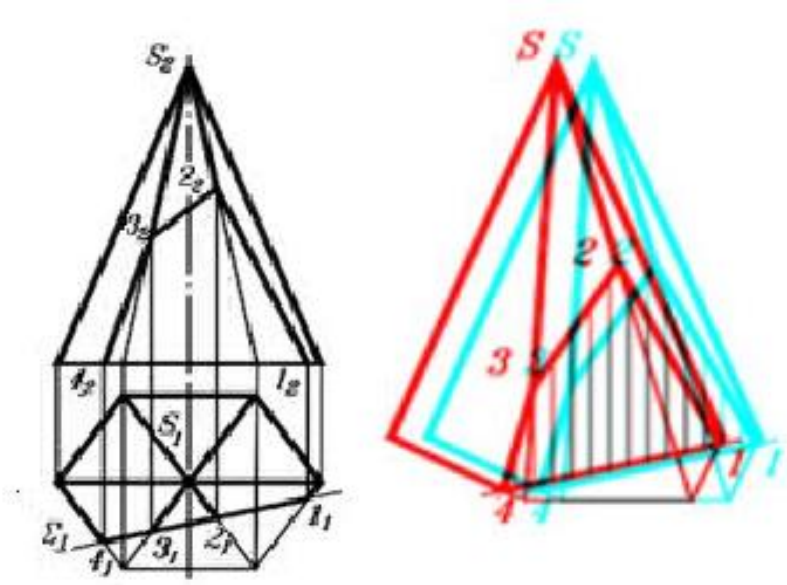


Рис. 1. Стереопари для отримання стереоскопічного зображення зрізаної піраміди



Рис. 2. Стереопари для отримання стереоскопічного зображення валу

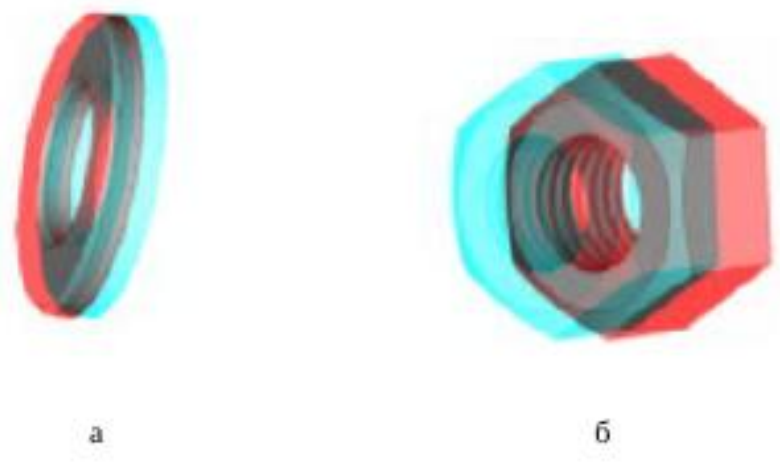


Рис. 3. Стереопари для отримання стереоскопічного зображення шайби та гайки

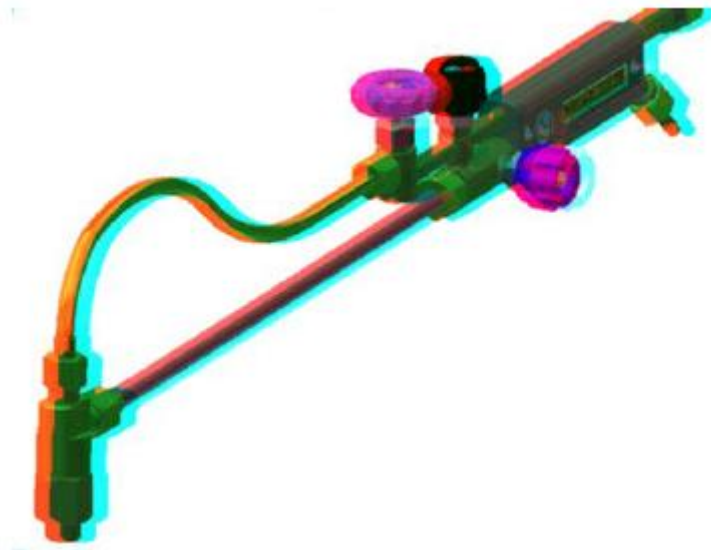


Рис. 4. Стереопари для отримання стереоскопічного зображення газового різачка

Істотні зміни в розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, застосування конвертерів в Anaglyph 3D дозволяють використовувати дану методику для відкритої системи навчання, так званої дистанційної форми навчання у мережі Інтернет, що, безсумнівно, є важливим фактором підвищення ефективності навчання.

Дана методика та сучасні інформаційні технології роблять дистанційну форму навчання більш ефективною, дозволяючи зробити візуальну інформацію яскравою, реалістичною та динамічною.

Література

1. Banach Daniel T. Autodesk Inventor Essentials / Daniel T. Banach, Travis Jones.
2. Михайленко В.С. Інженерна та комп'ютерна графіка / За ред. В.С. Михайленко, В.В. Ванін, С.М. Ковальов. – К.: Каравела, 2018. – 360 с.

Зелена відбудова дорожньої мережі України

ОСНОВНІ ФАКТОРИ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИДОРОЖНІХ ЕКОСИСТЕМ

Анотація. У роботі систематизовано фактори техногенного впливу на придорожні екосистеми, що виникають внаслідок експлуатації автомобільного транспорту. Проаналізовано структуру та вразливість різних типів екосистем (зокрема агроекосистем), розглянуто хімічний склад викидів залежно від режимів роботи двигунів та джерела механічного забруднення (зношення шин, гальмівних накладок). Особливу увагу приділено проблемі засолення ґрунтів протижелезними сумішами та механізмам біоіндикації за допомогою вищих рослин і лишайників (ліхеноіндикація).

Ключові слова: Придорожня екосистема, біоіндикація, ліхеноіндикація, важкі метали, дефляція, емісія, агроекосистема, некроз, рН ґрунту.

Придорожні екосистеми являють собою специфічні природно-антропогенні комплекси, що локалізовані у безпосередній близькості до транспортних магістралей. Згідно з нормативною базою України, ширина придорожньої смуги, де встановлюється особливий режим землекористування, варіюється від 25 до 150 м залежно від категорії дороги.

У ландшафтній структурі України ці системи представлені переважно лісовими, лучними та агроекосистемами. Останні є найбільш вразливими через свою видову гомогенність та низький рівень природної резистентності. Без постійної антропогенної підтримки агроекосистеми швидко деградують під дією хімічного стресу, що робить зону хімічного забруднення визначальним фактором їхньої трансформації.

Основним джерелом токсикації є продукти неповного згоряння палива. Найвищий рівень емісії токсикантів характерний для дизельних циклів, тоді як газобалонне обладнання на природному газі демонструє мінімальні показники викидів.

Ключові хімічні компоненти та умови їх генерації:

- Монооксид вуглецю (CO): Виникає при дефіциті кисню в камері згоряння.

- Вуглеводні (C_nH_m): Викидаються при порушенні температурних режимів полум'я; серед них особливу небезпеку становлять поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ) з канцерогенними властивостями.

- Оксиди азоту (NO_x): На відміну від інших компонентів, їхня концентрація зростає лінійно зі збільшенням швидкості автомобіля.

Важливою закономірністю є залежність емісії від динаміки руху. В оптимальних крейсерських режимах викиди токсикантів зменшуються у 2–4 рази. Критичні концентрації спостерігаються у зонах вимушеної зупинки (світлофори, перехрестя), де двигуни працюють у режимі «холостого ходу» або інтенсивного прискорення.

Окрім вихлопних газів, автотранспортний комплекс генерує значну кількість твердих аерозолів через зношення поверхонь:

1. Абразивне зношення покриття: Дефляція мінерального пилу з проїзної частини. До 30% цього пилу становлять фракції менше ніж 100 мкм, що легко транспортуються повітряними потоками на значні відстані.

2. Фрикційне зношення: Частки гуми, міді (Cu), цинку (Zn), нікелю (Ni) та кадмію (Cd). Особливу токсикологічну небезпеку становить сульфід сурми та азбестовмісні частки гальмівних накладок.

3. Випаровування: Емісія легких фракцій палива та лакофарбових матеріалів безпосередньо з вузлів агрегатів.

Застосування протижелезних реагентів (NaCl, KCl) призводить до формування зон вторинного засолення. Хлориди мають високу міграційну здатність, поширюючись на відстань до 200 метрів від полотна дороги.

Наслідки галогенезу для екосистем:

1) Фітотоксичність: Схожість трав'янистих рослин падає на 50%, спостерігається масовий некроз листя та затримка вегетації.

2) Деградація ґрунту: Іони натрію витісняють кальцій з ґрунтового вбирного комплексу, що погіршує фізичні властивості ґрунту.

3) Корозія: Прискорене руйнування металевих елементів інженерних споруд.

Рослинний покрив виступає інтегральним індикатором стану середовища. Листя — найбільш чутливий орган, де відбуваються ключові фізіологічні процеси.

1) Механізм впливу пилу: Осідання пилу на листовій пластинці створює ефект екранування, знижуючи рівень фотосинтетично активної радіації (ФАР) та порушуючи тепловий баланс (рН поверхні листка змінюється, що веде до перегріву).

2) Стійкість: Види з гладкою кутикулою (липа, клен, береза) є більш стійкими, оскільки пил легко змивається опадами.

Лишайники вважаються еталонними біоіндикаторами через їхню унікальну фізіологію:

1. Відсутність кутикули: Газообмін та поглинання вологи відбуваються всією поверхнею талому, що робить їх беззахисними перед SO₂ та NO₂.

2. Акумулятивна здатність: Вони накопичують важкі метали (свинець Pb, ртуть Hg, арсен As) та радіонукліди у концентраціях, що значно перевищують рівні у вищих рослин.

3. Повільна регенерація: Пошкодження клітин лишайника є незворотними, що дозволяє фіксувати довготривале кумулятивне забруднення.

За станом слані (зміна кольору на бурий, морфологічна деформація, зменшення розмірів) можна точно визначити зони екологічного дискомфорту навколо автомагістралей.

Висновки

Придорожні екосистеми перебувають під постійним багатофакторним тиском. Хімічна емісія, механічний пил та сольове навантаження формують специфічне середовище, що вимагає постійного моніторингу. Використання методів біоіндикації, зокрема аналізу ліхенофлори та стану листя деревних порід, є найбільш ефективним та економічно доцільним способом оперативної оцінки екологічної безпеки транспортних коридорів.

Література

1. Бойченко С. Г., Ковальчук О. В. Вплив автомобільного транспорту на забруднення атмосферного повітря в міських екосистемах *Екологічні науки*. 2021. № 3 (36). С. 25–30.
2. Клименко М. О., Петрук В. Г. Оцінка рівня техногенного навантаження на придорожні території автомобільних шляхів *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Сільськогосподарські науки»*. 2022. № 1 (97). С. 112–120.
3. Мельник Л. Г., Дейнеко Л. В. Антропогенне забруднення ґрунтів у зонах впливу автомобільних доріг *Агроекологічний журнал*. 2020. № 4. С. 56–62.
4. Назаренко І. І., Омельченко А. О. Особливості формування екологічного стану придорожніх екосистем у межах урбанізованих територій *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2023. № 28. С. 90–97.
5. Шевченко О. Г., Ляшенко В. І. Моніторинг забруднення важкими металами ґрунтів уздовж автомобільних доріг *Екологічна безпека та природокористування*. 2024. № 2 (42). С. 73–80.

Дмитро Брум
Здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології
Юлія Калюжна
к.т.н., доцент кафедри екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: uskalmikova@gmail.com, тел: +380953187276

ЩОДО ВПЛИВУ МІКРОКЛІМАТУ МЕГАПОЛІСУ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ПРИМАГІСТРАЛЬНИХ ТЕРИТОРІЙ

Анотація. У статті проведено теоретичне дослідження механізмів формування специфічних мікрокліматичних умов мегаполіса та їхнього системного впливу на екологічний стан приміагістральних територій. Деталізовано процеси трансформації теплового балансу, виникнення температурних інверсій та модифікації аераційного режиму під впливом архітектурно-планувальних чинників. Особливу увагу приділено аналізу метеорологічних факторів розсіювання забруднюючих речовин, зокрема швидкості вітру, термічної стабільності атмосфери та турбулентному обміну, що є критично важливими для оцінки екологічної безпеки вулично-дорожньої мережі.

Ключові слова: урбоєкосистема, вулично-дорожня мережа (ВДМ), острів тепла, турбулентна дифузія, аераційний режим, термодинамічна стійкість, антропогенна емісія, температурний градієнт.

Сучасний мегаполіс становить собою унікальну та надскладну форму просторової організації суспільства, яка за своїми функціональними та структурними параметрами радикально диференціюється від інших типів поселень. Це динамічна соціально-економічна система, чий розвиток супроводжується інтенсивною трансформацією природних ландшафтів та безперервною взаємодією з біосферними компонентами [1]. Глобальні тенденції урбанізації зумовлюють критичну акумуляцію техногенних джерел емісії на обмеженому територіальному базисі.

Центральною ланкою інфраструктури мегаполіса є його транспортна система, яка включає розгалужену вулично-дорожню мережу (ВДМ), рухомий склад, складні транспортні вузли, системи технічної експлуатації та соціум. Зростання інтенсивності транспортних потоків, особливо в урбанізованих ядрах міст, генерує комплекс негативних екологічних ефектів. Наразі спостерігається стала диспропорція між пропускною здатністю історично сформованої ВДМ та стрімко зростаючим рівнем автомобілізації, що вимагає розробки нових стратегій сталого розвитку [1]. Антропогенна деградація довкілля проявляється у суттєвому зниженні якості атмосферного повітря, контамінації ґрунтового покриву та гідрологічних об'єктів стічними водами. Відповідно до «Стратегії сталого розвитку України до 2030 року», пріоритетним вектором є реалізація наукоємних інноваційних проєктів, спрямованих на екологізацію транспортного сектору [24]. Екологічна компонента стає базисною при верифікації ефективності функціонування транспортно-дорожнього комплексу.

Забруднення атмосфери визначається як присутність у її газовому складі сторонніх домішок, а також рідких та твердих аерозольних часток. За просторовою ієрархією забруднення поділяють на локальне (промислові райони), регіональне (території окремих держав) та глобальне (планетарні зміни складу повітря). Антропогенні джерела класифікуються на точкові (висотні емісії енергетики), площинні та лінійні, до яких належить ВДМ. Висока щільність та різноманітність джерел у місті зумовлюють систематичне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК), що корелює з втратою працездатності та погіршенням соматичного здоров'я населення [1].

Механізми формування урбаністичного мікроклімату та аераційного режиму

Аераційна парадигма урбанізованої території зазнає деформацій під впливом морфологічних перешкод: геометричних параметрів ВДМ, висотності приміагістральної

забудови та щільності озеленення [2]. Будинки виступають аеродинамічними бар'єрами, що змінюють ламінарний характер повітряних потоків на турбулентний.

Механізми турбулентності в місті мають подвійну природу:

1. Механічна турбулентність: виникає внаслідок тертя повітря об шорстку поверхню забудови (шар шорсткості). Чим вища та неоднорідніша забудова, тим інтенсивнішим є вихроутворення, що може призводити як до розсіювання забруднювачів, так і до їхньої акумуляції в «аеродинамічних тінях».

2. Термічна турбулентність: зумовлена конвективними потоками, що піднімаються від нагрітих поверхонь. У денний час вона сприяє вертикальному винесенню домішок у вищі шари атмосфери.

У містах виокремлюють «шар перешкод» — простір від поверхні землі до рівня дахів, де формується нижня частина шару тертя. Важливим детермінантом тут є «фактор відкритого неба» (Sky View Factor): будинки обмежують горизонт, модифікують тривалість інсоляції та трансформують векторні поля вітру [2].

Термічні аномалії та ефект «острова тепла»

Мікрокліматична специфіка зумовлена зміною альбедо підстильної поверхні. Велика теплоємність бетону та асфальтобетону в поєднанні з темним забарвленням дорожнього покриття сприяє акумуляції теплової енергії вдень та її повільному вивільненню вночі. Це призводить до виникнення «острова тепла», чия інтенсивність корелює з антициклональним типом погоди та рівнем антропогенної емісії тепла від транспорту [1].

Внаслідок атмосферного забруднення в місті спостерігається дефіцит сонячної радіації. Для оцінки оптичних властивостей використовують показники мутності та коефіцієнт прозорості. У Києві встановлено просторову неоднорідність цих параметрів: максимальна мутність зафіксована у лівобережному промисловому кластері, тоді як північні зони характеризуються найвищою оптичною прозорістю.

Аналіз метеорологічних чинників розсіювання

Ефективність самоочищення атмосфери залежить від наступних факторів:

1. Швидкість та напрямок вітру: визначають горизонтальний перенос домішок. При низьких швидкостях (штиль, застій) спостерігається накопичення емісій ВДМ.

2. Термічна стійкість (стратифікація): при інверсіях (підвищенні температури з висотою) виникає «запирний шар», який унеможлиблює вертикальний обмін, що призводить до смогу.

3. Вертикальне змішування: визначає глибину шару, в якому розчиняються забруднювачі.

4. Атмосферні опади: виконують функцію мокрого вимивання аерозолів, проте стічні води з ВДМ потребують подальшої очистки.

Висновки до роботи: а) мегаполіс формує автономну термодинамічну систему, де архітектурна морфологія та фізико-хімічні властивості поверхонь є головними регуляторами мікроклімату; б) встановлено, що механічна та термічна турбулентність у шарі шорсткості відіграють ключову роль у динаміці розсіювання транспортних викидів, а «фактор відкритого неба» безпосередньо впливає на тривалість інсоляції примагістральних територій; в) метеорологічний потенціал розсіювання (швидкість вітру та стратифікація) є критичним параметром, що визначає рівень екологічного ризику для мешканців прилеглих до доріг територій.

Література

1. Самойленко Є. С. Управління рівнем забруднення атмосфери міст шляхом моделювання з використанням геоінформаційних систем. Міжнародна наукова конференція "Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт". – К.: НТУ, 2022, Вип. 1 С. 289-293.

2. Русакова Т. І., Біляєв М.М. CFD-моделювання розповсюдження забруднення повітряного середовища в мікрорайоні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 6. С. 25-30

ЩОДО РОЛІ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ ВЕЛИКИХ МІСТ В ПІДТРИМЦІ ЗДОРОВ'Я МЕШКАНЦІВ

Анотація. У статті проаналізовано багатофункціональну роль міських зелених насаджень у забезпеченні екологічної стійкості та психологічного благополуччя міського населення. На прикладі м. Тернопіль досліджено кореляцію між рекреаційною ємністю зелених зон та рівнем ментального здоров'я мешканців. Виявлено дефіцит площ озелених територій та встановлено суб'єктивну оцінку задоволеності населення якістю та доступністю локацій для відпочинку через призму соціологічного опитування.

Ключові слова: урбоєкосистема, рекреаційна ємність, ментальне здоров'я, антропогенне навантаження, зелена інфраструктура, психологічний комфорт.

Актуальність дослідження обумовлена прогресуючою урбанізацією та інтенсифікацією антропогенного тиску на життєвий простір мешканців міст, що призводить до формування агресивного візуального та акустичного середовища. В умовах дефіциту вільного простору та інформаційного перенавантаження, зелені зони стають критично важливим інструментом підтримання психоемоційного гомеостазу та відновлення когнітивних ресурсів населення, що потребує детального кількісного та якісного вивчення на рівні муніципального управління.

Завдання дослідження: обґрунтувати соціально-екологічну значущість міських насаджень у структурі сучасного урбанізованого простору, ідентифікувати ключові інфраструктурні та функціональні недоліки існуючої системи міського благоустрою.

Зелені насадження в межах урбанізованих територій виконують комплекс фундаментальних функцій: екологічну, соціокультурну, економічну та кліматорегулюючу [1]. У той час як біосферні та мікрокліматичні аспекти функціонування фітоценозів є об'єктом прискіпливої уваги науковців, соціально-економічні переваги часто залишаються на периферії досліджень. В умовах посилення антропогенної деструкції урбосистем та формування агресивних параметрів міського середовища, питання забезпечення еколого-психологічного комфорту населення набувають статусу пріоритетних [2].

Однією з провідних соціальних місій зелених насаджень є превенція розладів та підтримання ментального здоров'я соціуму. Процеси урбанізації корелюють із деградацією якісних показників життєзабезпечуючих доменів довкілля (атмосфери, гідросфери, просторового ресурсу). Демографічне перенавантаження, ущільнення архітектурної забудови, прискорення соціального ритму та надмірна візуальна стимуляція рекламними носіями здійснюють сумарний деструктивний вплив на психоемоційну сферу індивіда. Тенденції до редукації вільного простору та ескалація акустичного забруднення виступають потужними стресогенними факторами для міських жителів [3].

За умов високого техногенного навантаження, наявність та інклюзивність рекреаційних зон є детермінуючим чинником збереження здоров'я нації. Стратегічне планування екологічно збалансованого проживання має стати стрижневим завданням муніципального менеджменту в Україні.

Оцінка екологічно допустимої рекреаційної ємності ключових зелених локацій м. Харкова дозволяє спрогнозувати граничну чисельність мешканців, які можуть одночасно реалізовувати потребу в оздоровчому відпочинку. На основі проведених розрахунків встановлено, що лише 36,5 тис. осіб забезпечені адекватним зеленим простором, що становить лише 16,5 % від загальної чисельності населення міста. Зважаючи на статус Харкова як великого освітнього центру з вагомою часткою неврахованого студентського контингенту, можна констатувати надмірну антропогенну експлуатацію наявних природних ресурсів міста. Дослідження було проведено в 2021 році.

В межах дослідження було реалізовано інтернет-опитування мешканців з метою верифікації рівня їхньої лояльності до кількісних та якісних характеристик міського озеленення.

У вибірці (n=83) домінувала вікова категорія 18–35 років (50%) та 36–60 років (43%). Гендерна структура представлена переважно жінками (57%), а за соціальним статусом більшість склали працевлаштовані особи (67%) та студентство (31%).

Суб'єктивну оцінку задоволеності параметрами озеленення проводили за п'ятибальною шкалою лікертівського типу. Аналіз отриманих даних свідчить про помірно позитивну рецепцію стану зелених зон: близько 60% респондентів оцінили кількісні та якісні показники на 3–4 бали. Примітно, що найбільшу задоволеність викликає територіальна доступність рекреаційних зон (максимальна оцінка у 17 осіб), тоді як найменше нарікань викликає саме кількісний показник насаджень. Критично низькі оцінки (1–2 бали) за всіма категоріями виставили близько 10–12% опитаних.

Встановлено, що пріоритетними об'єктами відвідування є паркові комплекси, сквери та прибережні зони водних об'єктів. На думку громадськості, зелені насадження підвищують естетичну привабливість міста, оптимізують стан локальних екосистем та сприяють ревіталізації психофізичних сил. Серед деструктивних факторів мешканці виокремлюють інфраструктурну незавершеність (дефіцит санітарних вузлів), високий рівень засміченості територій та прояви вандалізму. Фундаментальним є висновок про те, що 100% респондентів усвідомлюють пряму детермінацію між станом зеленої інфраструктури та власним психологічним комфортом [1, 4, 5].

Висновки: доведено, що міські насадження виступають базовим компонентом формування ментального здоров'я в умовах урбанізованого середовища. Ключовими вимогами до таких зон є не лише площа, а й рекреаційна спроможність та інфраструктурна наповненість; обґрунтовано необхідність імплементації інноваційних управлінських рішень у сфері міського благоустрою як обов'язкової умови сталого розвитку та збереження людського капіталу в сучасній урбоекосистемі.

Література

1. Васютинська К. А. Оцінка забезпеченості населення міст зеленими насадженнями як чинник якості життя *Український гідрометеорологічний журнал*. 2025. № 34–35. С. 91–99
2. Гавриленко О. П., Шищенко П. Г. Екологічні функції зелених насаджень у формуванні комфортного міського середовища // *Ландшафтна наука*. 2023. № 1. С. 45–52.
3. Кучерявий В. П. Урбоекотичні аспекти озеленення міст та їх вплив на здоров'я населення *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 2. С. 60–66.
4. Назаренко І. І., Омельченко А. О. Роль зелених насаджень у покращенні мікроклімату міста та зниженні захворюваності населення *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2022. № 26. С. 78–85.
5. Петрук В. Г., Клименко М. О. Зелені насадження як фактор екологічної безпеки урбанізованих територій *Екологічні науки*. 2020. № 4 (33). С. 112–118.

Наталія Внукова

докт. техн. наук, професор, зав. кафедри екології,

ХНАДУ, Україна

vnukovanv@ukr.net, тел. +380505966911,

Наталія Ричак,

канд. геогр. наук, доцент, доцент кафедри екології,

ХНАДУ, Україна

rychak@ukr.net, тел. +380506303170

ЕКОЛОГО-ЛАНДШАФТНИЙ ПІДХІД ДО ВІДНОВЛЕННЯ ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В БАСЕЙНОВИХ ГЕОСИСТЕМАХ

Анотація. У роботі досліджено вплив транспортної інфраструктури як домінуючого дестабілізуючого фактора на стан урболандшафтних басейнових геосистем м. Харкова. На основі аналізу фазово-антропоїзаційної стійкості басейну р. Уди встановлено забруднення поверхневих вод внаслідок функціонування об'єктів автосервісу та магістралей. Запропоновано стратегію повоєнного відновлення дорожньої мережі, що базується на диференціації навантажень, впровадженні локальних систем очищення стоків та створенні «зелених» дренажних систем для підвищення здатності ландшафту до саморегуляції.

Ключові слова: транспортна підсистема, басейнова геосистема, фазово-антропоїзаційна стійкість, повоєнна реконструкція, саморегуляція ландшафту.

Повоєнна реконструкція дорожньо-транспортної мережі України потребує переходу від суто інженерної модернізації до інтеграції екологічних параметрів у планування. Це критично важливо для урболандшафтних басейнових геосистем, де транспортна інфраструктура виступає домінуючим дестабілізуючим фактором, що нівелює потенціал природної саморегуляції [1]. Транспортна підсистема класифікується як (квазі)еконегативний елемент урбанізованого середовища, що зумовлює потребу в комплексній оцінці її впливу на депонуючі середовища.

Метою роботи було з урахуванням характеру та ступеню впливу транспортної підсистеми на фазово-антропоїзаційну стійкість басейнової геосистеми р. Уди (в межах м. Харкова) запропонувати шляхи стабілізації ситуації. Об'єктом аналізу обрано басейнову систему р. Уди. Ключовим індикатором стану визначено фазово-антропоїзаційну стійкість — показник, що чисельно відображає обернену залежність від ступеня антропоїзації та характеризує міру залишкової здатності ландшафту до самовідновлення під впливом техногенного тиску та наслідків воєнних дій [2].

1. Пріоритетною урбофункціональною підсистемою, що в найбільшій мірі виступає джерелом забруднення в межах урболандшафтною басейнової геосистеми – є транспортна підсистема. Для територій, приурочених до транспортної підсистеми відносяться транспортні магістралі їх значущість, комплексний характер щодо головного спрямування, певних видів транспорту трамвайних, тролейбусних, автобусних, автомобільних, залізничних шляхів сполучення, враховуючи і планово - висотну приуроченість шляхів сполучення. Питома площа транспортних магістралей у м. Харкова загалом складає близько 0,15 га. Розраховану площу доповнюють площі підприємств транспортної інфраструктури: автопідприємств, що обслуговують автомобільний парк міста, автозаправки, автомийки та облаштовані у місті зупинки для усіх видів муніципального транспорту. У формуванні стійкості урбогеосистеми, у пріоритеті функціонування транспортної підсистеми є «відкритість» та «водонепроникність» території дослідження. Ця підсистема характеризуються високою антропоїзацією та низькою здатністю до саморегуляції. У розумінні загальної площі міста, навіть сумація усіх наведених площ, площа транспортної підсистеми не є значною. Проте, дана підсистема, як одна із головних джерел забруднення довкілля міста, розташована в усіх морфологічно-позиційних складових геосистеми і несе різноступеневе навантаження, як на

якісний стан довкілля, так і на рівень фазово-антропоізаційної стійкості урбанізованих басейнових геосистем.

2. Об'єкти транспортної інфраструктури на території міста, це в першу чергу, постійні джерела забруднення поверхневих водних об'єктів, підземних вод різноманітними інгредієнтами, у тому числі й нафтопродуктами. Відомо, що на сучасних автозаправках, що мають герметичне устаткування, вірогідність підземного просочування палива мінімальна, проте кількість проливів біля паливо-розподільних колонок і на ділянках зливу палива залишаються високими: до 100 г на 1 т бензину і 50 г на 1 т дизельного палива [2]. Проливи палива та інших мастильних матеріалів також відбуваються на станціях технічного обслуговування, а їх змив, звичайно, на автомийках. Це призводить до забруднення нафтопродуктами поверхневих та підземних вод

3. У різних морфологічно-позиційних складових геосистемі річки Уди, на території міста Харкова були обрані найбільш типові підприємства сервісного обслуговування автотранспортної інфраструктури. У результаті досліджень встановлено, що вказані підприємства мають вплив на якість поверхневих вод в урболандшафтній геосистемі, а саме: протягом року відбувається потрапляння у поверхневі води стічних вод підвищеної лужності та підвищеної жорсткості; у поверхневих водах спостерігається підвищення концентрації аніонів хлору та сульфатів (підтверджується загальна тенденцію зросту концентрацій соляних та сірчаних солей у поверхневих водах річок України), низький вміст біогенних речовин (азоту, фосфору), поверхневі води містять кадмій, цинк, залізо, мастильно-паливні речовини та нафтопродукти. Аналіз вмісту нафтопродуктів показує, що об'єкти транспортної інфраструктури у місті продовжують залишатися джерелами забруднення поверхневих вод і викликають загрозу для геосистем, для яких розраховується індекс фазово-антропоізаційної стійкості.

4. Вододільно-рівнинні, схиліві та заплавні геосистемі є основою для формування розуміння стійкості геосистем. Особливо важливим у характеристиці тестової геосистемі є кількість стресових ділянок для водного об'єкту та проведення водоохоронних заходів.

5. Розраховані індекси фазово-антропоізаційної стійкості та доповнені сучасними даними про вплив транспортної інфраструктури на якісний стан поверхневих вод вказують, що урболандшафтні геосистемі річки Уди мають дуже низькі залишкові здатності до саморегуляції. Тільки ліва притока р. Уди, геосистема р. Лопань характеризується дещо вищою здатністю до саморегуляції (бо має значну площу рівнинно-вододільних ландшафтів, значну площу рекреаційної підсистемі, у більшості випадків, спостерігається віддаленість автошляхів та об'єктів транспортної інфраструктури від поверхневих водних об'єктів).

Процес відбудови дорожньої інфраструктури має базуватися на принципах сталого розвитку, екологічної відповідальності та техніко-економічної доцільності. Для цього пропонуються відповідні заходи до плану відновлення. Першочерговим заходом є диференціація навантажень. Це передбачає обмеження розвитку важкої дорожньої інфраструктури у вразливих заплавних та схилівих геосистемах. Важливу роль також відіграє технологічна модернізація, яка полягає не тільки в обов'язковій системі локального очищення стічних вод на об'єктах автосервісу але й на обов'язковому впровадженні локального очищення стічних вод на автомобільних магістралях ще на етапі отримання дозволів на відновлення. Запровадження (чи збільшення площі) екопаркувальних майданчиків та «зелених» дренажних систем для компенсації високої антропоізації транспортних вузлів.

Використання запропонованого підходу дозволить перейти від моделі «еконегативного функціонування» транспорту до досягнення оптимально можливого стану всієї соціально-економічної підсистемі міста у повоєнний період.

Література

1. Внукова Н. В. Науково-методологічні основи екологічної безпеки комплексу автомобіль – дорога – середовище: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 21.06.01. Харків, 2015. 36 с.
2. Ричак Н.Л., Кізілова Н.М., Внукова Н.В. Залишкова здатність до природної саморегуляції урболандшафтних басейнових геосистем в умовах мегаполісу *Екологічні науки*. 2024. Вип. 5 (55). С. 15-46.

ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОНИКНИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ДОЩОВИМИ СТОКАМИ

Інтенсивний розвиток урбанізованих територій супроводжується суттєвим збільшенням площ водонепроникних покриттів, що призводить до порушення природного водного балансу. Зростання коефіцієнта стоку обумовлює підвищення пікових витрат дощових вод, скорочення часу концентрації стоку та перевантаження систем зливової каналізації. У традиційних системах водовідведення дощові води розглядаються переважно як фактор ризику підтоплень, тоді як їх якісний склад (завислі речовини, нафтопродукти, важкі метали, ПАР) часто залишається поза увагою.

Сучасні підходи до управління дощовими стоками базуються на принципах сталого водокористування та передбачають максимальне відтворення природних процесів інфільтрації, затримання та очищення води. У цьому контексті проникні дорожні покриття (permeable pavements) є одним із ключових елементів зеленої інфраструктури, що забезпечує децентралізоване управління поверхневим стоком [1].

Конструкція проникних покриттів включає водопроникний верхній шар (пористий асфальт або бетон, модульні блоки), підстильний фільтруючий шар та дренажну основу з високою пористістю (до 30–40%), яка виконує функцію тимчасового акумулювання води. Гідравлічна провідність таких систем може змінюватися в широких межах – від 10^{-5} до 10^{-2} м/с залежно від матеріалів та ступеня засмічення порової структури [2].

На рисунку 1 наведено функціонально-технологічна схема наочно ілюструє поетапний процес проходження води крізь конструкцію. Потік спрямовується згори донизу, проходячи через три основні інженерні бар'єри: верхній пористий шар (який забезпечує первинний прийом води), підстильний шар (для вирівнювання та додаткової фільтрації) та акумулюючу основу (ключовий елемент для тимчасового затримання стоку завдяки високій пористості). Схема чітко відображає логіку роботи системи залежно від гідрогеологічних умов місцевості. У фінальній стадії блок «Відведення води» передбачає прийняття рішення на основі оцінки інфільтраційної здатності підстильних ґрунтів: за високої проникності вода природним шляхом просочується у ґрунт, відтворюючи природний водний цикл, а за низької – надлишок води безпечно відводиться за допомогою вбудованої дренажної труби.

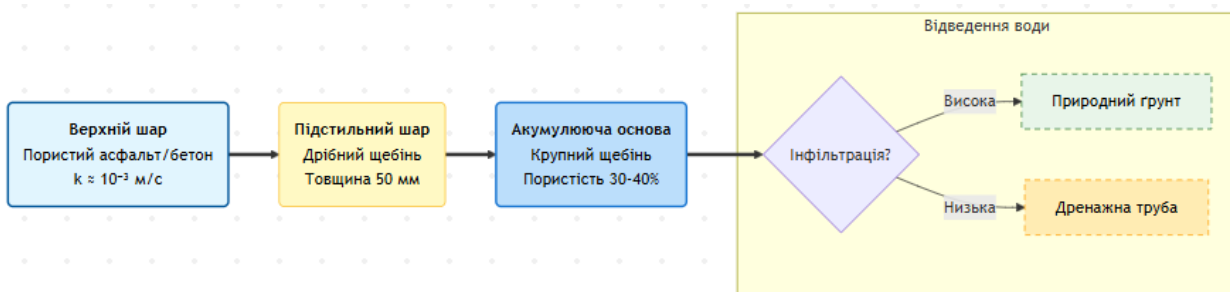


Рис. 1. Функціонально-технологічна схема роботи проникного дорожнього покриття

Основною перевагою проникних покриттів є зниження обсягу поверхневого стоку. За результатами польових досліджень, зменшення річного обсягу стоку може становити 50–90%, а пікових витрат – до 70% порівняно з традиційними асфальтобетонними покриттями [3]. Це

дозволяє суттєво знизити навантаження на системи зливової каналізації та мінімізувати ризик локальних підтоплень.

Окрім гідравлічної функції, проникні покриття виконують роль ефективного бар'єру для забруднювачів. Процеси механічної фільтрації, сорбції та біологічного розкладу забезпечують значне зниження концентрацій основних компонентів дощового стоку. Зокрема, ефективність видалення завислих речовин становить 80–95%, нафтопродуктів – 60–90%, а важких металів (Zn, Cu, Pb) – 40–70% залежно від конструкції та умов експлуатації [4].

Механізм очищення включає: затримання частинок у порах верхнього шару, адсорбцію органічних сполук на поверхні мінеральних матеріалів, біодеградацію органічних речовин у біоплівці, що формується в структурі покриття та осадження металів у вигляді малорозчинних сполук.

Важливою характеристикою є здатність проникних покриттів забезпечувати затримку та поступове відведення води, що сприяє зменшенню температурного навантаження на водні об'єкти та стабілізації гідрологічного режиму територій. Додатково відбувається часткове поповнення підземних вод, що є важливим у регіонах із дефіцитом водних ресурсів.

Разом з тим ефективність таких систем залежить від низки факторів. Ключовими з них є інтенсивність опадів, гранулометричний склад підстильних шарів, тип забруднень та умови експлуатації. При високих навантаженнях можливе перевищення інфільтраційної здатності системи, що призводить до формування поверхневого стоку. Іншим критичним фактором є замулювання порового простору дрібнодисперсними частинками, що знижує коефіцієнт фільтрації до 30–50% протягом перших років експлуатації [2].

З метою забезпечення стабільної роботи проникних покриттів необхідно передбачати регулярне технічне обслуговування (вакуумне очищення, промивання), а також оптимізувати конструкцію з урахуванням умов експлуатації. Практика показує, що використання багатошарових систем із попереднім осадженням забруднень дозволяє суттєво зменшити швидкість деградації проникності.

Особливу ефективність демонструє інтеграція проникних покриттів у комбіновані системи зеленої інфраструктури, що включають біоретенційні елементи, дренажні канали та локальні очисні споруди. Такий підхід дозволяє поєднати функції регулювання стоку, очищення води та підвищення екологічної стійкості урбанізованих територій [5].

На відміну від традиційних підходів до водовідведення, у роботі обґрунтовано доцільність використання проникних дорожніх покриттів як елементу адаптивної системи управління дощовими стоками з урахуванням інтенсивності опадів, характеристик забруднень та експлуатаційних факторів. Запропонований підхід передбачає диференційоване застосування конструктивних рішень залежно від типу об'єкта (дороги, парковки, промислові майданчики), що дозволяє підвищити ефективність зниження стоку та покращення якості води при зменшенні навантаження на інженерну інфраструктуру. Запропонована схема наведена на рисунку 2.

Схема (Рис. 2) відображає принцип функціонування проникних дорожніх покриттів та їх роль у зменшенні поверхневого стоку і очищенні дощових вод. Показано взаємозв'язок між умовами експлуатації, типом об'єкта та вибором конструктивного рішення в рамках адаптивного підходу.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості впровадження проникних покриттів у міських умовах як альтернативи традиційним системам водовідведення без суттєвого збільшення площі інженерних споруд, що відповідає сучасним принципам сталого розвитку та управління водними ресурсами.

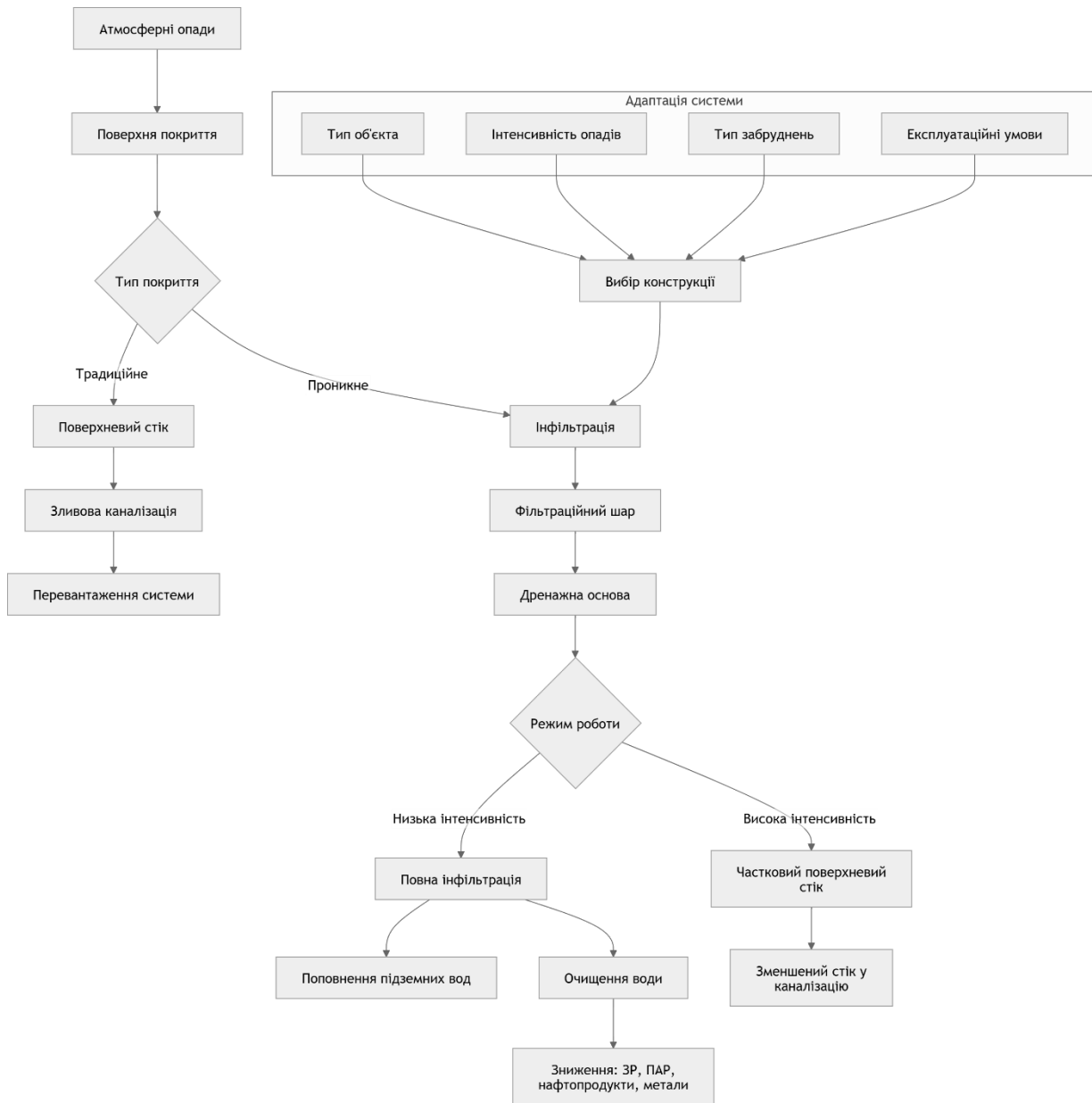


Рис. 2. Схема функціонування та адаптивного впровадження проникних дорожніх покриттів

Література

1. Singer, M. N., Hamouda, M. A., El-Hassan, H., & Hinge, G. (2022). Permeable Pavement Systems for Effective Management of Stormwater Quantity and Quality: A Bibliometric Analysis and Highlights of Recent Advancements. *Sustainability*, 14(20), 13061. <https://doi.org/10.3390/su142013061>
2. Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3861. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>
3. Fassman, E. A., & Blackbourn, S. D. (2010). Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 475-485. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000238](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000238)
4. Brattebo, B. O., & Booth, D. B. (2003). Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, 37(18), 4369-4376. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00410-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00410-X)
5. Dietz, M. E. (2007). Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 186(1-4), 351-363. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9484-z>

Станіслав Душкін
к.т.н., доцент кафедри екології
Анастасія Кудlach,
здобувач першого рівня вищої освіти,
ХНАДУ, Україна
e-mail: d.akass@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ БАРОМЕМБРАННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД НА ОБ'ЄКТАХ АВТОТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

Сучасний розвиток автотранспортної галузі супроводжується зростанням техногенного навантаження на водні ресурси. Значні обсяги стічних вод утворюються під час експлуатації автотранспортних підприємств, станцій технічного обслуговування та автомийок. Такі стічні води містять завислі речовини, нафтопродукти, поверхнево-активні речовини (ПАР) та важкі метали. Традиційні методи очищення, зокрема відстоювання та флоатація, є недостатньо ефективними для видалення розчинених і дрібнодисперсних фракцій нафтопродуктів [1]. В умовах дефіциту водних ресурсів баромембранні технології розглядаються як один із найбільш ефективних підходів до створення замкнутих циклів водокористування.

Особливу проблему становлять емульговані нафтопродукти, видалення яких традиційними методами є обмеженим. У зв'язку з цим доцільним є застосування ультрафільтрації та зворотного осмосу, що забезпечують високий ступінь очищення та можливість повторного використання води [2]. Використання мембранних біореакторів також сприяє підвищенню ефективності очищення та компактності установок.

Стічні води, що утворюються на об'єктах автотранспортної галузі, мають спільні риси, однак суттєво відрізняються за складом та ступенем забруднення залежно від типу об'єкта. До спільних компонентів належать завислі речовини мінерального та органічного походження, нафтопродукти, поверхнево-активні речовини (ПАР), а також іони важких металів, що потрапляють у воду внаслідок зношування деталей транспортних засобів.

Для автомийок характерним є високий вміст ПАР та емульгованих нафтопродуктів, що утворюються внаслідок використання мийних засобів.

Такі стічні води відзначаються стабільністю емульсій та відносно невисокою концентрацією грубодисперсних домішок [4]. На відміну від цього, стічні води станцій технічного обслуговування (СТО) містять значну кількість важких металів (Cu, Zn, Pb), продуктів зносу, а також відпрацьованих мастил, що формують складні багатокомпонентні системи.

На промислових автотранспортних підприємствах (автобази, транспортні цехи заводів) спостерігається найбільш широкий спектр забруднювачів, включаючи суміші нафтопродуктів із твердими частинками, високі концентрації завислих речовин та періодичні пікові навантаження за витратою і складом стоків. У таких умовах формується комбінований тип забруднення, який поєднує ознаки дисперсних, емульгованих і частково розчинених фракцій.

Таким чином, незважаючи на спільну природу походження, стічні води різних об'єктів автотранспортної галузі відрізняються за агрегатним станом забруднювачів, їх дисперсністю та стабільністю, що безпосередньо впливає на вибір ефективних методів очищення.

Традиційні методи очищення, такі як відстоювання та флоатація, ефективні переважно для видалення грубодисперсних і частково дисперсних нафтових фракцій. Однак для емульгованих та розчинених форм нафтопродуктів, розмір яких становить менше 10 мкм, їх ефективність суттєво знижується, що підтверджується класифікацією нафтовмісних стічних вод, наведеною вище.

Застосування баромембранних технологій, зокрема ультрафільтрації, дозволяє ефективно затримувати емульговані нафтопродукти, колоїдні частинки та макромолекули

ПАР. При цьому досягається ступінь очищення за нафтопродуктами на рівні 90–99%, що значно перевищує можливості традиційних методів. Додаткове використання зворотного осмосу забезпечує видалення розчинених органічних речовин та іонів, що дозволяє повторно використовувати очищену воду у технологічному циклі [3].

Особливо ефективним є комбіноване застосування механічного очищення та мембранних процесів, що дозволяє адаптувати технологію до змінного складу стічних вод на різних об'єктах автотранспортної галузі [1].

З урахуванням різноманітності складу стічних вод, що утворюються на автомийках, СТО та промислових автотранспортних підприємствах, доцільним є застосування комбінованого підходу до очищення, який поєднує традиційні методи попередньої обробки та баромембранні технології як основний етап доочищення.

На першому етапі здійснюється механічне очищення, яке включає решітки, пісколовки та відстійники. Основною функцією цього етапу є видалення грубодисперсних домішок, таких як пісок, частинки ґрунту, окалини та великі завислі речовини. Ефективність видалення завислих речовин на цьому етапі може досягати 50–70%, що дозволяє знизити навантаження на наступні стадії очищення.

Другий етап передбачає фізико-хімічне очищення, зокрема застосування коагуляції або напірної флотації. На цьому етапі відбувається видалення дисперсних нафтопродуктів та частково емульгованих фракцій. Ступінь очищення за нафтопродуктами може становити 60–80%, однак для стабільних емульсій, характерних для автомийок, ефективність залишається обмеженою.

Ключовим етапом є баромембранне очищення, зокрема ультрафільтрація. Ультрафільтраційні мембрани забезпечують затримання емульгованих нафтопродуктів (0,01–0,1 мкм), колоїдних частинок, макромолекул ПАР та частини органічних сполук. На цьому етапі досягається основний ефект очищення, а концентрація нафтопродуктів знижується до значень, що відповідають вимогам до повторного використання води в системах оборотного водопостачання.

У випадках, коли необхідно забезпечити більш високий ступінь очищення, наприклад для замкнених циклів водокористування або мінімізації скидів у навколишнє середовище, доцільним є додаткове застосування зворотного осмосу. Цей процес дозволяє видаляти розчинені органічні речовини, іони солей та залишкові забруднювачі, забезпечуючи ступінь очищення понад 95–99%.

Важливим аспектом є утворення концентратів та осадів на різних етапах очищення. Осади, що утворюються після механічного та фізико-хімічного очищення, містять суміш піску, нафтопродуктів і твердих частинок та підлягають утилізації як небезпечні відходи. Концентрат, що утворюється при мембранному очищенні, характеризується підвищеним вмістом нафтопродуктів і ПАР та може бути повернений на попередні стадії очищення або направлений на спеціалізовану обробку.

Таким чином, запропонований технологічний підхід дозволяє забезпечити комплексне видалення забруднювачів різної природи та агрегатного стану, характерних для стічних вод мийних цехів.

На відміну від типових схем очищення, у роботі обґрунтовано адаптацію комбінованої баромембранної технології з урахуванням типу об'єкта автотранспортної галузі (автомийки, СТО, транспортні підприємства) та специфіки формування забруднень (дисперсні, емульговані та розчинені фракції).

Це дозволяє підвищити ефективність очищення, зменшити навантаження на окремі стадії та забезпечити стабільну роботу систем оборотного водопостачання. Практична значущість такого підходу полягає у можливості його впровадження на діючих об'єктах автотранспортної інфраструктури без суттєвої реконструкції існуючих систем очищення.

Література

1. Tian, Y., Zhou, J., He, C., He, L., Li, X., & Sui, H. (2022). The Formation, Stabilization and Separation of Oil–Water Emulsions: A Review. *Processes*, 10(4), 738. <https://doi.org/10.3390/pr10040738>
2. García-Ávila, F., Zambrano-Jaramillo, A., Velecela-Garay, C., Coronel-Sánchez, K., & Valdiviezo-Gonzales, L. (2025). Effectiveness of membrane technologies in removing emerging contaminants from wastewater: Reverse Osmosis and Nanofiltration. *Water Cycle*, 6, 357-373. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2024.12.004>
3. Judd, S. (2011). *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. 2nd ed. Elsevier.
4. Verlicchi, P., Al Aukidy, M., & Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: Removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—A review. *Science of the Total Environment*, 429, 123–155. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.028>

Владислав Журавський
здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: natvikpro08@gmail.com, тел. +380509411057

БІОІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ В СИСТЕМІ ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД

Анотація. У статті досліджено теоретичні та прикладні аспекти застосування екологічних біотехнологій для інтенсифікації процесів самоочищення в техногенно змінених водних екосистемах. Особливу увагу приділено функціонуванню біоінженерних споруд типу «Constructed wetlands» (біоплато) як високоефективних та економічно доцільних систем біологічної деструкції контамінантів. Проаналізовано фітомеліоративний потенціал вищих водних та наземних рослин в умовах аквакультури, а також визначено ключові чинники, що впливають на сорбційну здатність біоценозів.

Ключові слова: Екологічні біотехнології, техногенно змінені водні екосистеми (ТЗВЕ), біоплато, Constructed wetlands, вищі водні рослини (ВВР), фітореMediaція, акумуляція металів, біодеструкція.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку альтернативних, енергоефективних методів відновлення гомеостазу в гідроекосистемах, що зазнали значної антропогенної трансформації. В умовах зростаючого хімічного навантаження на водні об'єкти використання природних механізмів біодеструкції та акумуляції забруднюючих речовин за допомогою спеціалізованих гідротехнічних споруд є пріоритетним напрямом екологічної інженерії.

Завдання дослідження

- обґрунтувати роль екологічних біотехнологій у підвищенні інтенсивності внутрішньоводоймних процесів самовідновлення;
- визначити морфофункціональні характеристики біоплато як інтегрованих систем очищення поверхневих вод;
- оцінити ефективність використання різних видів вищої водної рослинності (ВВР) для елімінації органічних та неорганічних сполук;
- проаналізувати потенціал наземних рослин, вирощених в умовах гідропоніки, як перспективного інструменту дезактивації водних об'єктів.

На даному етапі розвитку в Україні не залишилось річок з непорушним станом їх водних екосистем в умовах інтенсивного антропогенного впливу. Проблема екологічної безпеки водних об'єктів актуальна для всіх водних басейнів держави. Україна прийняла вимоги Водної Рамкової Директиви 2000/60/ЄС (ВРД) [1], яка стала першим документом, що запровадив принцип управління водними ресурсами, спираючись на природні географічні формації – річкові басейни, є основним інструментом інтегрованого управління водними ресурсами. На її основі створена нова законодавча база використання, захисту та відновлення водних ресурсів. ВРД вимагає досягнення «доброго стану», для кожного водного об'єкту, запобігання подальшому погіршенню якості вод, підтримання сталого їх функціонування. У ВРД якість води розглядається вже не як ресурс, а як необхідна складова в процесах існування гідробіонтів та життєдіяльності людини.

Екологічні біотехнології становлять інноваційну парадигму в системі стратегічного управління охороною та консервацією навколишнього природного середовища. Впровадження зазначених технологічних рішень з метою інтенсифікації внутрішньоводоймних процесів у межах техногенно змінених водних екосистем (ТЗВЕ) є фундаментальним завданням сучасних екологічних розвідок. Згідно з аналізом актуальних науково-технічних джерел [2], найбільш релевантним методом коригування регенеративного потенціалу річкових систем визнано експлуатацію біоплато природного та штучного походження.

Використання біоплато позиціонується як маломасштабна, альтернативна та екологічно збалансована технологія очищення, що характеризується високою економічною ефективністю [1, 2]. Зазначений підхід не справляє деструктивного впливу на довкілля, оскільки функціонування системи не передбачає залучення хімічних реагентів або додаткових енергоресурсів, за винятком інсоляції. Такі біоінженерні конструкції належать до найбільш прогресивних засобів природної біологічної меліорації поверхневих вод; у світовій інженерній практиці вони відомі під дефініцією «Constructed wetlands» [1]. Наразі в глобальному масштабі експлуатується понад три тисячі подібних об'єктів, а найбільш активна проектна діяльність зосереджена в США, Данії, Німеччині, Франції, Великій Британії та Ірландії [4].

Біоплато за своєю архітектонікою є водоохоронною спорудою або спеціалізованим сегментом гідротехнічного комплексу, де консолідовані угруповання вищих водних рослин (ВВР), асоційована мікрофлора, перифітон, донні водорості та зоопланктон забезпечують елімінацію забруднюючих речовин (ЗР). Завдяки екстраординарній біохімічній активності макрофітів щодо сполук антропогенного генезу [1, 3], у біоплато відбуваються процеси деструкції, метаболічної трансформації та акумуляції азотовмісних сполук, вуглеводнів нафти, ПАР, важких металів та інших токсикантів.

Паралельно реалізуються процеси первинного синтезу вуглецю, фотосинтетичної аерації середовища, мінімізації експорту органічного детриту та ольфакторної дезодорації водних мас.

Фітомеліоративний потенціал природних та штучних ценозів ВВР успішно реалізується для оптимізації якісних характеристик забруднених річок. Процес селекції фітокомпонентів для біоплато має базуватися на використанні аборигенних видів, адаптованих до конкретних кліматичних умов [4]. Домінуючими видами в таких системах є очерет, рогіз, комиш та гіацинт; у північних регіонах перевага надається пухівкам, хвощам та осокам. Серед занурених макрофітів найвищу активність демонструють рдести, уруть та роголисники [3]. Технологічна схема висадки передбачає розміщення очерету та комишу (35–45 од./м²) на вхідних ділянках, із подальшим переходом до рогозу (25–30 од./м²). Для нейтралізації неприємних запахів та забезпечення бактерицидного ефекту рекомендується впровадження аіру болотного. Оптимальний діапазон глибини занурення рослин варіюється в межах 0,5–1 м [5].

ВВР, окрім детоксикаційної функції, забезпечують інтенсифікацію транспіраційних процесів (на 10–15 % у літній період), що сприяє прискоренню зневоднення мулових карт та підвищенню пропускної здатності фільтраційних систем [3]. Життєдіяльність макрофітів, особливо занурених форм, стимулює зростання концентрації розчиненого кисню, що активує окиснення органіки та нітрифікацію. Також рослинність виступає фізичним бар'єром, що сприяє седиментації мінеральних та органічних суспензій. Важливо, що розклад осаджених фракцій локалізується на поверхні субстрату, що запобігає транзиту продуктів розпаду та мікрофлори за межі очисної споруди. Асимільовані біогени тривалий час депонуються у фітомасі та кореневій системі, вилучаючись із активного біологічного колообігу.

У середовищі біоплато досягається практично повна деградація органічних речовин (за БСК₅) та нафтопродуктів, а також глибоке очищення від фенольних сполук і пестицидів шляхом їх метаболічного перетворення [5]. Швидкість окиснення вуглеводнів у ризосфері рослин у 3–5 разів перевищує аналогічні показники у відкритих водоймах. Найвища ефективність депурації спостерігається при послідовному проходженні водної маси крізь зони повітряно-водної та зануреної рослинності. Показники вилучення конкретних елементів є вражаючими: комиш здатний сорбувати феноли та іони марганцю, ірис акумулює кальцій, осока — залізо, а ряска — мідь. При врожайності очерету звичайного на рівні 40 т/га відбувається винос до 650 кг азоту та 250 кг фосфору з одного гектара акваторії [4].

Максимальна інтенсивність біологічного очищення фіксується в заростях рогозу та очерету. За умови покриття близько 50 % дзеркала води макрофітами швидкість самоочищення зростає в 5–10 разів, проте рекомендованим показником є 70–80 %. Завдяки зниженню швидкості потоку в рослинних ценозах активізується осадження зважених часток, що підвищує прозорість води у 2–3 рази порівняно з відкритими ділянками. У щільних

насадженнях седиментація відбувається у 2–2,5 рази інтенсивніше; потужність мулових відкладів у таких зонах може досягати 0,8 м за вегетаційний період [1, 2]. Ключовими детермінантами ефективності штучного біоценозу є його площа, видова структура, щільність популяції, час експозиції та експлуатаційний режим.

Наукові дослідження [1, 3, 4] підтверджують, що наземні флористичні види, за умови їхньої культивування у водному середовищі, демонструють високі коефіцієнти акумуляції токсикантів. Ця закономірність лягла в основу біотехнології очищення водойм із використанням адсорбційного потенціалу кореневих систем наземних рослин в аквакультури. Проростки певних видів, вирощені гідропонним методом, часто випереджають ВВР за швидкістю вилучення іонів металів завдяки вищому співвідношенню активної поверхні коренів до їхнього об'єму. Перевагою застосування наземних видів є можливість оперативного отримання значних обсягів біомаси, що дозволяє суттєво скоротити часові витрати на дезактивацію об'єктів [3].

При цьому акумулятивна здатність таких рослин може бути промодульована шляхом зовнішнього впливу фізичних (гамма-випромінювання), хімічних (фізіологічно активні сполуки) або біологічних чинників [1, 5].

Висновки до статті можуть бути сформульовані наступним чином:

- доведено, що впровадження екологічних біотехнологій на основі «Constructed wetlands» є найбільш раціональним шляхом відновлення екологічної ємності ТЗВЕ, забезпечуючи високий ступінь очищення від нафтопродуктів, фенолів та біогенів без додаткових енерговитрат;

- встановлено, що структурно-функціональна стабільність біоплато детермінується видовим різноманіттям макрофітів та щільністю їх висадки (оптимально 70–80 % площі акваторії), що дозволяє прискорити процеси седиментації та окиснення органіки у 2–5 разів;

- виявлено високу селективну здатність різних видів ВВР щодо конкретних забруднювачів, що обґрунтовує необхідність створення полікультурних насаджень для досягнення максимального ефекту депурації;

- обґрунтовано перспективність використання наземних рослин в умовах аквакультури як інструменту фітореMediaції, що характеризується високою швидкістю накопичення біомаси та можливістю регулювання сорбційної активності кореневих систем через зовнішні фізико-хімічні фактори.

Література

1. Міхеєв О. М., Маджд С. М., Лапань О. В., Кулинич Я. І. Використання гідрофітних систем для відновлення якості забруднених вод: монографія. К.: Центр учбової літератури, 2024. 171 с.
2. Клименко М. О., Клименко О. М., Петрук А. М. Гідроекологічний моніторинг водних екосистем з огляду на сучасні європейські напрямки у природоохоронній діяльності. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2023. №3. С. 22–27
3. Кулинич Я. І. Екологічна характеристика біотичних угруповань водних систем у забезпеченні їх екобезпечного розвитку. Екологічна безпека держави: матер. X Всеукр. наук.–практ. конф. молодих учених та студентів (Київ, 21 квітня 2016). К.: НАУ, 2016. С. 184–185.
4. Моніторинг природокористування та стратегія реабілітації порушених річкових і озерних екосистем: навчальний посібник / Й. В. Гриб, М. О. Клименко, В. В. Сондак, А. В. Гуцол, С. О. Мушит, Д. Й. Войтишин. Вінниця: ФОП Рогальський І.О., 2022. 486. с.
5. Маджд С. М., Кулинич Я. І. Наукова методологія оцінювання екологонебезпечних ризиків функціонування техногенно-змінених водних екосистем. *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. 2017. № 4. С. 88–95.

Владислав Журавський
Здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології
Наталія Прокопенко
к.б..н, доцент кафедри екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: natvikpro08@gmail.com, тел. +380509411057

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

Анотація. У статті проаналізовано сучасний стан гідроекосистем України в умовах інтенсивного антропогенного навантаження та їхню трансформацію у техногенно зумовлені об'єкти. Виявлено обмеженість традиційних фізико-хімічних методів оцінювання якості води та обґрунтовано необхідність впровадження комплексного підходу на основі екологічних індикаторів. Сформульовано пріоритетні напрями вдосконалення методології управління екологічною безпекою водних ресурсів для забезпечення збалансованого розвитку територій.

Ключові слова: гідроекосистеми, антропогенний вплив, техногенно зумовлені водні екосистеми (ТЗВЕ), екологічна безпека, біоіндикація, комплексне оцінювання, модель P-R-S.

На сучасному етапі суспільно-економічного поступу в межах України практично не залишилося річкових об'єктів, стан водних екосистем яких характеризувався б непорушністю в умовах масштабного антропогенного тиску. Питання гарантування екологічної безпеки гідрологічних об'єктів зберігає свою гостроту для всіх без винятку водних басейнів країни. Результати систематизації наукових напрацювань вітчизняних та зарубіжних фахівців дозволяють стверджувати, що фундаментальним чинником деградаційних процесів у річках виступає їхня техногенна детермінованість, зумовлена функціонуванням урбанізованих територій. Внаслідок техногенного навантаження у природних гідроекосистемах спостерігається модифікація комплексу параметрів водного середовища, що спричиняє дестабілізацію гомеостазу, порушення біогеохімічних циклів, зниження показників екологічної ємності та подальшу трансформацію у техногенно змінені водні екосистеми (ТЗВЕ). Пріоритетним напрямом наукового пошуку слід вважати вдосконалення методологічного підґрунтя для всебічного оцінювання та оптимізації екологічного статусу таких трансформованих систем малих та середніх річок.

Актуальність роботи обумовлена критичним рівнем деградації річкових систем України, де практично не залишилося об'єктів із непорушеним природним станом. Традиційні методи контролю, що базуються переважно на санітарно-гігієнічних нормативах (ГДК), виявляються недостатніми для об'єктивної діагностики складних техногенно змінених екосистем. Необхідність розробки нових методологічних засад, що враховують кумулятивний вплив антропогенних чинників на біоту, є стратегічним завданням для гарантування екологічної безпеки держави.

Завдання роботи б

1. Дослідити механізми трансформації природних водних об'єктів у техногенно зумовлені гідроекосистеми під впливом урбанізації.

2. Здійснити порівняльний аналіз існуючих фізико-хімічних та гідробіологічних методів оцінювання стану водного середовища.

3. Обґрунтувати доцільність застосування інтегрованих систем індикаторів (зокрема моделі «Тиск – Стан – Реагування») для моніторингу та управління екологічним статусом річок.

4. Визначити роль біологічного контролю як економічно ефективного інструменту в системі екологічного нормування.

Спираючись на результати аналізу наукових робіт [1-3], варто зауважити, що переважна більшість сучасних водних екосистем класифікуються як типові техногенно зумовлені гідроекосистеми. За своєю суттю це модифіковані водні об'єкти, в яких відбулися глибокі внутрішньоводоймні перетворення як наслідок господарської активності, що призвели до деструкції гомеостатичних механізмів, циклів міграції речовин, екологічного потенціалу та інших системних змін [1, 2].

Кінцевим результатом цих процесів стало формування таких екосистемних одиниць, які не можуть бути ідентифіковані як повністю природні; натомість, на переконання автора дослідження, доцільно оперувати дефініцією ТЗВЕ із врахуванням різного рівня їхнього контамінаційного навантаження [2]. Згідно з положеннями закону екологічної кореляції щодо розвитку складних систем, функціонування ТЗВЕ базується на тих самих структурно-функціональних принципах, що й у природних аналогах, проте з урахуванням специфічної взаємодії екологічних та антропогенних чинників. Вони представляють собою динамічні відкриті системи, архітектоніка та властивості яких детерміновані впливом зовнішніх агентів та флуктуаціями внутрішніх процесів, що вказує на часткову трансформацію всіх базових рівнів організації ТЗВЕ [2, 4].

Забезпечення природно-техногенної безпеки водних об'єктів є невід'ємним елементом державної стратегії управління екологічною безпекою в контексті переходу до моделі збалансованого розвитку. Проведений аналіз наукових джерел [1, 4, 5] дозволив зробити висновок, що механізми управління екологічною безпекою техногенно детермінованих гідроекосистем наразі вивчені фрагментарно, без розробки уніфікованого методологічного базису, який би охоплював різновекторні фактори загрози (як біотичної, так і абіотичної природи). Як зазначають дослідники, досягнення екологічної безпеки ТЗВЕ передбачає формування такого стану в системі «людина — водне середовище», за якого показники економічного прогресу та якості життя корелюють із темпами регенерації гідроекосистем у межах раціонального водокористування. Основні складнощі зумовлені дефіцитом сучасних знань про природні механізми у техногенно змінених річках, принципи їхньої антропогенної модифікації, а також розбіжностями у підходах до розв'язання проблем між інженерною, екологічною та водогосподарською галузями [4].

Аналіз наукової літератури щодо існуючого інструментарію [1, 4] оцінювання стану водного середовища засвідчив, що традиційні стандартизовані підходи не дозволяють вичерпно охарактеризувати ТЗВЕ через свою неоднорідність, що перешкоджає формуванню єдиної кількісної оцінки структурних порушень. Використання нормативів ГДК дозволяє лише констатувати факт екологічного неблагополуччя, тоді як застосування системи екологічних індикаторів дає змогу виявити детермінанти та наслідки таких змін. У звіті Світового банку (2001 р.) акцентовано увагу на відсутності універсального алгоритму комплексної оцінки якості водних ресурсів в умовах поліфакторного забруднення.

Під час здійснення інтегрованої оцінки екологічного статусу гідроекосистем виникають суттєві труднощі з верифікацією необхідних параметрів через їхню значну кількість. Гостро постає необхідність формування переліку найбільш репрезентативних показників, виокремлених із великого масиву даних, що дозволить забезпечити максимально повну екодіагностику якісних та кількісних характеристик досліджуваних територій. Сучасний фізико-хімічний інструментарій аналізу складу води не забезпечує вичерпного прогнозування кумулятивного впливу розчинених речовин на структуру водного середовища та біоту. Отже, оцінювання, що базується суто на гідрохімічних показниках, є недостатнім для повної екологічної атестації. Кожна прісноводна система має унікальні фонові концентрації сполук, які варто розглядати як специфічні екологічні категорії. У зв'язку з цим екологічні стандарти для вивчення водних об'єктів за різних умов функціонування [4, 5] мають розроблятися індивідуально та впроваджуватися в поєднанні з санітарно-гігієнічними нормами. Фундаментальним завданням інженерної екології при цьому залишається дослідження взаємодії гідробіонтів із біотопом.

На сьогоднішній день для моніторингу якості води залучаються методи мікробіологічного аналізу, а також фізико-хімічні детермінації органолептичних, токсикологічних та фізіологічних параметрів. Впровадження гідробіологічних методів дозволяє верифікувати екологічний стан об'єктів, оцінити якість поверхневих вод як життєвого простору гідробіонтів, виявити сумарний ефект комбінованого впливу забруднюючих речовин та зафіксувати явища вторинного забруднення. Ключовим аргументом на користь біоіндикації є здатність певних груп організмів рефлексувати сукупну дію факторів середовища. У ситуаціях, де інструментальні критерії оцінки відсутні (наприклад, при деградації середовища існування), біологічні групи залишаються єдиним ефективним засобом діагностики негативних впливів [2, 5]. Міжнародний досвід свідчить, що такий моніторинг є економічно доцільнішим порівняно з хімічним контролем [5] і може виступати вагомою частиною екологічного нормування. Наступним етапом нормування має стати розробка системи індикаторів на основі статистичної звітності та моніторингових даних.

Актуальність вирішення задачі інтегрованого оцінювання екологічної безпеки природних та ТЗВЕ зумовлена тим, що більшість сучасних міжнародних (Environmental Sustainability Index, Ecological Footprint тощо) та вітчизняних індексів [3, 4] базуються на концепції ГДК і лише частково враховують реальну деградацію навколишнього природного середовища. Детальний аналіз методик [3] засвідчив, що оцінка безпеки часто ґрунтується на індикаторному підході, розвитком якого займаються провідні міжнародні інституції, зокрема Комісія ООН зі сталого розвитку, Єльський університет та ОЕСР.

Зокрема, ОЕСР та UNEP запропонували концептуальну модель P-R-S (тиск – стан – реагування), яка дозволяє паралельно ідентифікувати інтенсивність техногенного пресингу, екологічну ситуацію в системі та наслідки трансформацій. Багато країн світу, керуючись цими рекомендаціями, створили інтегровані обчислювальні системи, що слугують маркерами екобалансованого поступу. Впровадження нової методології є критично необхідним для мінімізації негативних наслідків антропогенізації водних об'єктів [3] та визначення пріоритетності охоронних заходів у стратегії управління ресурсами.

Висновки:

- встановлено, що переважна більшість річок України на сучасному етапі є техногенно зумовленими екосистемами, які функціонують в умовах порушеного гомеостазу та змінених біогеохімічних циклів.

- доведено, що стандартизовані методики, засновані на жорстких нормативах ГДК, не здатні повною мірою відобразити реальну динаміку структурних змін у гідроекосистемах, що вимагає розробки індивідуальних екологічних стандартів для кожного конкретного випадку.

- виявлено, що використання методів біоіндикації та гідробіологічного аналізу є критично необхідним для верифікації сукупного ефекту забруднення та оцінки якості поверхневих вод як середовища існування живих організмів.

- обґрунтовано, що перехід до інтегрованих систем оцінювання (на зразок міжнародних моделей ОЕСР та UNEP) дозволить мінімізувати негативні наслідки антропогенізації та підвищити ефективність стратегічного управління водними ресурсами.

Література

1. Хоменко О. М., Степанюк Г. О. Оцінка екологічного стану та джерел забруднення річки Рось. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 3. С. 45–52.
2. Гололобова О. О., Дорогань В. В. Екологічна оцінка якості поверхневих вод малих та середніх річок Полтавської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2020. № 33–34. С. 120–130.
3. Семенюк М. М., та ін. Мультидисциплінарний підхід до проблеми охорони малих річок Житомирського Полісся. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 6. С. 55–63.
4. Наконечна Ю., Мельничук С. Методологічні та методичні проблеми гідроекологічних досліджень малих річок степу. *Екологічні науки*. 2023. № 2. С. 88–95.
5. Хаєцький Г., Поліщук В. Роль річок для міста Вінниці, їх екологічний стан та шляхи його покращення. *Екологічні науки*. 2025. № 1. С. 102–110.

Ігор Маслов

здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології

ХНАДУ, Україна

Наталія Внукова

д.т.н., завідувач кафедри екології

ХНАДУ, Україна

e-mail: vnukovanv@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Анотація. У тезах розкрито концептуальну сутність екологічної модернізації (ЕМ) як стратегічного імперативу переходу від деєкологізованої до екологічно стійкої суспільної моделі. Проаналізовано типологію модернізаційних процесів (ендогенна, екзогенна), порівняно «слабку» та «сильну» моделі розвитку, а також деталізовано специфічні ризики української економіки (енергоємність, знос фондів). Окреслено пріоритетні завдання щодо інституційної трансформації, включаючи емансипацію природних об'єктів та ліквідацію наслідків воєнної шкоди в контексті євроінтеграції.

Ключові слова: екологічна модернізація, зелене зростання, емансипація природи, енергоємність ВВП, екологічна свідомість, інституційна трансформація, «сильна» модель модернізації.

Актуальність тематики дослідження зумовлена порушенням найважливішого планетарного співвідношення між кількістю живих організмів і функціональними можливостями природного комплексу, що спричинили тотальну зміну навколишнього природного середовища на сучасному етапі розвитку людства.

Завдання дослідження полягають в наступному: визначити концептуальні положення процесу модернізації системи екологічної безпеки; проаналізувати світові та вітчизняні тенденції модернізаційних процесів системи екологічної безпеки.

Екологічна модернізація (ЕМ) детермінується як парадигмальна зміна державної екологічної політики, спрямована на гармонізацію економічної ефективності та якості навколишнього природного середовища.

Це складний багатовекторний процес, що передбачає впровадження комплексу технологічних, управлінських та соціальних інновацій для забезпечення так званого «зеленого зростання». ЕМ маркує перехід суспільства від ресурсозатратної, деєкологізованої моделі до формату екологічної стійкості через глибокі реформи політичних та економічних інститутів [1].

Концептуально ЕМ є загальнонаціональною стратегією мобілізації інтелектуальних та матеріальних ресурсів. Вона базується на засвоєнні передових індустріальних та інформаційних технологій, що відповідають вимогам поточної історичної епохи, та формуванні відповідних соціальних механізмів.

Сучасна екологічна думка пропонує включити природні об'єкти до переліку активних учасників процесу модернізації. Природа розглядається не лише як пасивне середовище, а як автономна сила, що здатна впливати на соціум через зворотні зв'язки (небезпечні фактори, деградація ресурсів). Це, своєю чергою, стає каталізатором формування суспільної екологічної свідомості.

Екологізація свідомості передбачає:

1. Врахування довгострокових інтересів майбутніх поколінь.
2. Перехід до «екологічного стилю життя» та свідомого споживання.
3. Повернення екосистем до стану гомеостазу.

Цей процес є інерційним та тривалим; часто він сприймається громадськістю як тимчасове обмеження матеріального добробуту заради духовного та екологічного виживання.

Проте стратегічно високий рівень соціально-економічного розвитку неможливий без стабільного стану природних об'єктів.

3. Типологія та аспекти модернізаційних процесів

У світовій практиці виділяють три стратегічні типи модернізації:

1. Ендогенна: базується на власному інноваційному та ресурсному базисі (характерна для країн ЄС та США).

2. Екзогенна: здійснюється шляхом імпорту технологій та інститутів за відсутності власної наукової бази.

3. Ендогенно-екзогенна (гібридна): поєднує власні розробки із запозиченням передового світового досвіду. Для України цей шлях є найбільш релевантним.

Також ЕМ розглядається у двох комплементарних аспектах:

1. Environmental health: забезпечення середовища, безпечного для людини як біологічного виду.

2. Health of environment: підтримка цілісності та функціональності самих екосистем.

4. Економічні детермінанти та ризики в Україні [1].

Перехід до «зеленої» економіки, рекомендований конференцією «Ріо+20», є економічно виправданим: профілактика екологічної шкоди коштує значно дешевше, ніж подальша реабілітація територій. Крім того, екологічно чисте виробництво є більш конкурентоспроможним у довгостроковій перспективі.

Однак в Україні спостерігається низка критичних факторів, що гальмують цей процес:

Висока енергоємність: Енергетичні витрати на одиницю продукції в Україні суттєво перевищують світові показники.

Україна споживає у 3–4 рази більше газу порівняно з європейськими стандартами.

Матеріалоемність: Показник вітчизняного ВВП у 2,4 рази вищий, ніж у Польщі чи Чехії.

Технологічний знос: Фізичне та моральне застарівання основних фондів у промисловості та ЖКГ генерує постійні екологічні ризики.

Фінансовий дисбаланс: Видатки на екологію становлять лише 1% ВВП, тоді як прямі збитки від забруднення сягають 8–9% ВВП [2].

В рамках теорії ЕМ виділяють два підходи:

- «Слабка» модель: фокусується виключно на технологічних рішеннях («technological fix») та індустріальному зростанні як інструменті вирішення проблем.

- «Сильна» модель: вимагає глибокої трансформації соціальних інститутів, освітніх систем та зміни дискурсу. Пріоритетом стає не лише новий фільтр на трубі, а нова екологічна культура та «емансипація природи» — конституційне визнання прав природних об'єктів на рівні з юридичними особами.

Для успішної модернізації системи екологічної безпеки України необхідно реалізувати:

1. Гармонізація законодавства: Наближення нормативної бази до Директив ЄС, реалізація міжнародних конвенцій та протоколів.

2. Дорожня карта трансформацій: Створення регіонально адаптованих стратегій із чіткими індикаторами виконання.

3. Еко-реструктуризація економіки: Стимулювання наукомістких та сервісних галузей при одночасному згортанні «брудних» виробництв.

4. Економічні стимули: Впровадження системи штрафів, що корелюють із реальними збитками, та пільгове кредитування «зелених» проектів.

5. Ліквідація воєнної шкоди: Компенсація збитків, завданих агресією та окупацією, рекультивація замінованих та уражених територій.

6. Інформатизація: Створення національної системи моніторингу довкілля та забезпечення відкритості екологічних даних.

Висновки

Екологічна модернізація в Україні на сучасному етапі часто ініціюється бізнесом як адаптація до глобальних ринків, проте вона потребує системної державної підтримки. Ключ

до успіху лежить у площині узгодження інтересів влади, бізнесу та суспільства, де природа виступає не як ресурс, а як повноправний суб'єкт відносин. Тільки через «сильну» модель модернізації можливе досягнення реального еколого-соціального добробуту.

Література

1. Дорогунцов С. І., Ральчук О. М. Управління техногенно-екологічною безпекою у парадигмі сталого розвитку: концепція системно-динамічного вирішення / НАН України, Рада по вивченню продуктивних сил України. Київ: Наук. думка, 2001. 173 с

2. Качинський А. Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення. Київ: НІСД, 2001. 312 с

Михайло Перепелиця
Здобувач 1-го (бакалаврського) рівня вищої освіти
Наталія Прокопенко
к.б.н, доцент кафедри екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: natvikpro08@gmail.com, тел. +380509411057

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Анотація. У статті проведено комплексний аналіз впливу автомобільного транспорту як провідного техногенного джерела дестабілізації екологічної безпеки урбанізованих територій. Розглянуто компаративну характеристику електробусів та транспортних засобів із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) у контексті їхнього експлуатаційного життєвого циклу. Виявлено та систематизовано ключові детермінанти інтенсивного забруднення довкілля в Україні, зокрема технічне зношення рухомого складу, низьку якість пально-мастильних матеріалів та деградацію захисних фітофільтраційних бар'єрів.

Ключові слова: екологічна безпека, автомобільний транспорт, електробус, викиди ДВЗ, антропогенне навантаження, акустичне забруднення, фітофільтраційні бар'єри.

Тема даного дослідження є актуальною, тому, що сформовано критичний рівень техногенного пресингу з боку транспортного сектору на стан атмосферного повітря та здоров'я населення в українських мегаполісах. Необхідність переходу на альтернативні джерела енергії та модернізація транспортної інфраструктури стають пріоритетними завданнями в умовах невідповідності наявного автопарку сучасним екологічним стандартам Євро-5 та Євро-6, а також через неефективність чинних систем екологічного моніторингу та контролю.

Завдання дослідження: а) систематизувати вектори негативного впливу автомобільного транспорту на компоненти біосфери; б) виконати порівняльну екологічну оцінку експлуатації електробусів як альтернативи традиційному пасажирському транспорту.

Автомобільний транспорт на сучасному етапі розвитку техносфери виступає одним із домінуючих штучних джерел масштабної деградації навколишнього природного середовища. Відповідно до наукових концепцій [1], деструктивний вплив транспортної галузі на екосистеми реалізується через низку механізмів:

- по-перше, інтенсивне поглинання природних активів: атмосферного повітря, необхідного для окиснювальних процесів у двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ); вуглеводневої сировини (нафтопродуктів та природного газу) як паливної бази; водних ресурсів для технологічних потреб (охолодження, санітарна обробка); а також відчуження земельного фонду під розбудову дорожньої інфраструктури;

- по-друге, контамінація атмосфери, гідросфери та ґрунтового покриву, що супроводжується трансформацією хімічного складу ґрунтів та мікробіоти, акумуляцією виробничих шламів, золи та побутових відходів;

- по-третє, емісія надлишкової теплової енергії в довкілля в процесі спалювання палива в енергосилових установках;

- по-четверте, генерація критичних рівнів акустичного та вібраційного навантаження, а також створення електромагнітних полів;

- по-п'яте, ініціювання негативних геоморфологічних процесів, таких як ерозія, перезволоження територій, розвиток зсувів, обвалів та сельових потоків;

- по-шосте, виникнення ризиків для життя та здоров'я біоти, включаючи людину, внаслідок аварійних ситуацій та техногенних катастроф;

- по-сьоме, деструкція ґрунтово-рослинного шару та пригнічення продуктивності агроєкосистем.

При розгляді електробуса як перспективної та екологічно релевантної альтернативи автобусам із ДВЗ, слід враховувати парадигму повного життєвого циклу колісного транспортного засобу (КТЗ). Згідно з представленими аналітичними даними, електробус здійснює антропогенний вплив за всіма вищезазначеними категоріями, за винятком безпосередньої емісії продуктів згоряння палива та витоків мастильних матеріалів і електролітів [2, 3]. Водночас експлуатація електротранспорту забезпечує суттєве зниження шумового та вібраційного пресингу на міське середовище.

Виокремлюють фундаментальні чинники, що детермінують високу інтенсивність транспортного забруднення в межах України:

1. Дефіцит пропускної спроможності дорожньо-транспортної мережі. Структура магістралей українських міст, сформована за умов застарілих містобудівних норм, протягом останніх десятиліть практично не зазнавала оптимізації, що призвело до її невідповідності стрімкому зростанню рівня автомобілізації. Це спричиняє паралізацію пасажирських потоків та формування стійких заторів. У таких режимах двигуни працюють у перехідних циклах, що характеризуються форсованим споживанням палива та різким зростанням емісії токсичних сполук. Спираючись на дослідження «Німецької хвилі» [4], можна стверджувати, що крім зростання чисельності автопарку, ДТП та погодних умов, в Україні суттєву роль відіграє хаотичне паркування, нерегульовані пішохідні переходи та незадовільний технічний стан дорожнього полотна.

2. Експлуатація морально та фізично зношеного рухомого складу. Європейська практика передбачає посилення екологічних регламентів кожні 3–5 років, що стимулює розробку енергоефективних КТЗ. Сучасні стандарти вимагають комплексної модернізації енергосилових установок, а не лише систем фільтрації. Натомість автопарк України, включаючи техніку, зібрану з імпортованих комплектуючих, часто базується на застарілих агрегатах із високими показниками паливоспоживання. Важливо зауважити, що системи екологічного захисту (каталітичні нейтралізатори, сажові фільтри) мають обмежений ресурс (30–150 тис. км). Через їхню високу вартість та відсутність прямого впливу на ходові характеристики, поширеною практикою є їх демонтаж при ремонті. Тенденція до закупівлі вживаних європейських автобусів, попри їхній потенційно вищий рівень безпеки порівняно з новими вітчизняними аналогами [4], все ж не розв'язує проблему повної відповідності актуальним екологічним нормам.

3. Низька якість пально-мастильних матеріалів. Екологічна чистота вихлопних газів безпосередньо корелює з фізико-хімічними характеристиками палива. В Україні функціонує значний сегмент тіньового ринку ПММ неконтрольованої якості [3]. Через неможливість оперативного переходу на стандарти Євро-4 та Євро-5, уряд неодноразово пролонгував терміни використання менш якісного палива. Особливо критичним є вміст сірки в дизельному паливі, оскільки сульфуровмісні сполуки не лише підвищують токсичність газів, а й призводять до деградації систем керування складом відпрацьованих газів, що мультиплікує викиди твердих часток.

4. Деградація фітомеліоративних бар'єрів та акустичних екранів. Незважаючи на значну загальну площу зелених насаджень (наприклад, у Києві — 35,6 тис. га), їх розподіл є вкрай нерівномірним. Пріоритетність комерційної забудови поблизу магістралей призводить до ліквідації скверів та лісопаркових зон. Дослідження [44] доводять, що наявність механічних та рослинних бар'єрів здатна суттєво обмежити зону поширення контамінантів (від 10 до 200 м залежно від ландшафту). Відкриті ділянки, навпаки, сприяють транскордонному перенесенню важких металів. Окрему загрозу становить акустичний дискомфорт: доведено, що нічний транспортний шум провокує порушення сну, серцево-судинні патології та підвищення рівня кортизолу [2], що найбільш небезпечно для вразливих груп населення.

Аналіз поточної ситуації вказує на відсутність системного контролю за екологічними параметрами транспортних засобів у процесі організації перевезень. В автотранспортних підприємствах практично ігноруються стандарти якості палива та регламенти технічного обслуговування екологічних вузлів. Відсутність законодавчих обмежень щодо граничного

терміну експлуатації рухомого складу стимулює використання застарілих технологій, що робить ситуацію з негативним впливом транспорту практично некерованою.

За результатами аналізу літературних джерел було сформовано наступні висновки:

Встановлено, що автомобільний транспорт є багатofакторним джерелом антропогенного навантаження, яке охоплює не лише хімічне забруднення атмосфери, а й деструкцію ґрунтово-рослинного покриву, гідрологічні порушення та акустичний дискомфорт.

Доведено, що перехід на електробуси дозволяє повністю елімінувати викиди продуктів згоряння палива на локальному рівні та мінімізувати вібраційний вплив, проте не усуває інші вектори забруднення, притаманні повному життєвому циклу КТЗ.

Виявлено, що ключовими бар'єрами для покращення екологічного стану в Україні є невідповідність дорожньої інфраструктури обсягам трафіку, відсутність дієвого контролю за якістю палива та масове ігнорування регламентів обслуговування систем нейтралізації вихлопних газів.

Обґрунтовано необхідність збереження та розширення зон «зелених екранів» уздовж магістралей, оскільки рослинні угруповання виступають критично важливим бар'єром, що обмежує поширення важких металів та нівелює негативні наслідки шумового забруднення для житлової забудови.

Література

1. Єрошенко О. А. Використання екологічного транспорту у пасажирських перевезеннях як крок на шляху до сталого розвитку та покращення екологічної ситуації в містах. *Молодий вчений*. 2025. № 1. С. 149–150.
2. Лифенко С. Е., Понкратов Д. П. Екологічний аспект оцінки сталості міської транспортної системи. *Комунальне господарство міст*. 2025. № 1 (189). С. 482–
3. Мацелюх Ю. М., Литвин В. В. Аналіз пасажирських перевезень та вплив громадського транспорту на скорочення викидів вуглецю в розумному місті. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 27. С. 109–115.
4. Карапиш А. С., Харченко О. І., Баркалова Н. О. Аналіз соціально-економічних положень сталого розвитку підприємств транспорту. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 29. С. 95–102.

Кирило Приходько
здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: kyrylo.prykhodko1410@gmail.com, тел: +380973024069

ОСНОВНІ МОДЕЛІ РОЗСІЮВАННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В УМОВАХ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ МІСТА

Анотація. У тезах досліджено теоретичні та методологічні засади моделювання процесів розсіювання поллютантів, що генеруються транспортними потоками в урбанізованому середовищі. Проаналізовано дихотомію між натурними спостереженнями та математичною апроксимацією, визначено ієрархію просторово-часових масштабів розсіювання. Особливу увагу приділено Гаусовим моделям лінійних джерел та специфіці аеродинаміки у «вуличних каньйонах». Проведено порівняльний аналіз провідних світових програмних комплексів (CALINE-4, OSPM, CPM) та визначено їхні обмеження в умовах складної міської забудови.

Ключові слова: атмосферна дифузія, транспортний потік, Гаусівська модель, вуличний каньйон, турбулентність, екологічний моніторинг, поллютанти, дисперсія.

Актуальне наукове завдання полягає в аналізі та удосконаленні теоретичних положень щодо оцінки впливу транспортних потоків на довкілля при функціонуванні вулично-дорожньої мережі міста.

Завдання роботи полягають в наступному: провести аналіз існуючих методів і моделей впливу транспортних потоків на довкілля в межах функціонування вулично-дорожньої мережі міст, удосконалити метод кількісної оцінки впливу транспортного потоку на рівень інгредієнтного забруднення атмосферного повітря каньйонів вулично-дорожньої мережі міста.

Сучасна стратегія контролю якості атмосферного повітря в урбанізованих конгломератах базується на комплементарному поєднанні двох методів: інструментального моніторингу (натурних спостережень) та математичного моделювання.

В Україні мережа моніторингу охоплює 53 міста, де функціонують стаціонарні та маршрутні пости. Оптимізація кількості таких постів є складною задачею, що потребує врахування геоморфології рельєфу, щільності населення та архітекtonіки промислових зон [1].

Незважаючи на високу точність, натурні спостереження є дискретними у просторі та надзвичайно ресурсомісткими.

Математичне моделювання, навпаки, виступає як оперативний аналітичний інструмент, що дозволяє не лише реконструювати поточні поля забруднення, а й прогнозувати сценарії екологічного стану при зміні інтенсивності трафіку або метеоумов.

Побудова моделей ґрунтується на фундаментальних закономірностях атмосферної турбулентності та фізико-хімічної трансформації речовин. У процесі перенесення поллютантів враховуються такі чинники, як сухе та вологе осадження, а також фотохімічні реакції.

Історично виокремилися два фундаментальні підходи:

1. Теорія атмосферної дифузії (К-теорія): Базується на розв'язанні рівнянь напівпровідникової дифузії. Це універсальний метод, що описує складні турбулентні структури.

2. Емпірико-статистичний підхід (Гаусівські моделі): Базується на припущенні про нормальний розподіл концентрації в перетині струменя. Через свою обчислювальну ефективність ці моделі стали стандартом для інженерних розрахунків [2].

Класифікація за просторово-часовим масштабом:

- Локальний: (хвилини/години; метри/кілометри). Визначальним є вплив підстилаючої поверхні та локальної забудови.

- Регіональний: (години/дні; десятки/сотні кілометрів). Перенесення визначається синоптичними процесами у граничному шарі атмосфери.

- Глобальний: (тижні/місяці; тисячі кілометрів). Формується великомасштабною циркуляцією атмосфери [1].

Автотранспорт як джерело забруднення має унікальні характеристики:

- Низька висота викиду: Емісія відбувається на рівні 0,2–0,5 м, що спричиняє максимальну концентрацію саме у приземному шарі.

- Динамічність та стохастичність: Інтенсивність викидів корелює з режимами руху (старт-стоп), що створює високі градієнти концентрацій.

- Вплив забудови: Джерела занурені у міську інфраструктуру, що деформує повітряні потоки.

Світовий досвід пропонує широкий спектр інструментів для оцінки впливу трафіку:

- CALINE-4 (США): Базується на моделі факела та кривих Паскуїла-Гіфорда.

Модель CALINE-4 створена Каліфорнійським департаментом транспорту, заснована на гаусовій моделі факела [3]. Клас стійкості приземного шару атмосфери визначається за допомогою модифікованих кривих Паскуїла-Гіфорда. Дана модель потребує невеликої кількості вхідної інформації, що забезпечує її простоту і широке використання. Разом з тим, результати моделювання можна вважати лише наближеними, так як дана модель не враховує особливості міської забудови, рельєф місцевості, метеорологічні характеристики.

- CAR-FMI (Фінляндія): Орієнтована на поєднання емісійних моделей із ретроспективним статистичним аналізом.

Розсіювання забруднення у містах значно відрізняється від розсіювання на відкритих територіях, оскільки будівлі суттєво впливають на формування повітряних потоків. Ця особливість поведінки повітряних потоків у міських каньйонах призводить до виникнення великих градієнтів концентрації забруднюючих речовин вздовж вулиць. Особливо це характерно для підвітряної та навітряної сторони вулиць.

- STREET: Використовує концепцію вихрової циркуляції. При перпендикулярному напрямку вітру відносно вулиці виникає ефект «накопичення» поллютантів на підвітряній стороні, що модель успішно апроксимує для оперативних оцінок.

Це є основним чинником розсіювання забруднюючих речовин у вуличних каньйонах, тому модель Street з деякими незначними модифікаціями здатна прогнозувати більшість закономірностей розсіювання забруднюючих речовин у вуличних каньйонах та може використовуватися в інженерних цілях.

Проте більш детальні ефекти розсіювання поллютантів не можуть бути описані даною моделлю. Її суттєвим недоліком є дуже груба параметризація залежності напрямку вітру. Крім того, при малих швидкостях вітру, близьких до штилю, очікується рівномірний розподіл забруднення по усьому вуличному каньйоні.

Незважаючи на ці обмеження, модель є корисним інструментом для оперативної оцінки "першого порядку" якості повітря у вуличних каньйонах.

- CPBM (Canyon Plume-Box Model): Гібридний підхід, що поєднує модель факела (для прямого перенесення) та бок-модель (для опису рециркуляції повітряних мас).

• OSPM (Danish Operational Street Pollution Model): Вважається однією з найбільш досконалих. Вона враховує геометрію вулиці (співвідношення висоти забудови до ширини проїзду) та механічну турбулентність, генеровану самими автомобілями. Проте навіть OSPM не повною мірою враховує деформацію вітрового поля при складній, нелінійній конфігурації фасадів [1, 2].

Висновки: аналіз існуючих теоретичних підходів свідчить, що незважаючи на значну кількість розроблених моделей, задача високоточного прогнозування якості повітря в умовах щільної міської забудови залишається відкритою. Потребують подальшого вдосконалення методи врахування мікромасштабної турбулентності та стохастичної природи транспортних потоків, що є критично важливим для розробки ефективних стратегій екологічної безпеки міст.

Література

1. Степанчук О.В., Лапенко О. І., Чернишова О. С. Особливості використання методів моделювання транспортних потоків на вуличнодорожній мережі міста. *Теорія та практика дизайну*. 2022. Вип. 25. С. 110- 119.
2. Самойленко Є.С. Моделювання рівня забруднення міст шляхом управління параметрами транспортного потоку. *Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки"*. 2022. Випуск 3 (53). С. 322-328.
3. Бакуліч О.О., Самойленко Є.С. Моделювання рівня забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом в проектах управління екологічним станом міста. Міжнародна наукова конференція "Управління бізнес-процесами та технологічними інноваціями в сучасних умовах та в післявоєнний період". – К.: НТУ, 2023. С. 38-42.

Наталія Прокопенко
к.б.н., доцент кафедри екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: natvikpro08@gmail.com, тел: +380509411057

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

Анотація. У роботі досліджено проблему інтенсифікації накопичення побутових відходів в Україні в умовах воєнного стану та запропоновано методи оптимізації їх термічної переробки. Обґрунтовано склад паливних композицій на основі відходів та пелет, що забезпечують баланс між енергетичною ефективністю та мінімізацією екологічних ризиків.

Ключові слова: тверді побутові відходи (ТПВ), термічна утилізація, енергетична рекуперація, емісія забруднюючих речовин, калорійність, токсичність.

Проблема щодо зменшення обсягів утворення відходів та мінімізації негативних наслідків від діяльності з управління відходами, у тому числі і побутових відходів, залишається в Україні надзвичайно масштабною і надзвичайно актуальною. У зв'язку з військовим станом в Україні в населених пунктах західних областей збільшилася кількість мешканців за рахунок внутрішньо переміщених осіб, що в свою чергу призвело до збільшення об'ємів утворення та накопичення побутових відходів на полігонах. Земельні ресурси, ґрунтовий покрив, водні ресурси, атмосферне повітря та соціальна сфера страждають від накопичення побутових відходів.

В роботі вирішували такі завдання: - проаналізувати існуючі методи поводження з побутовими відходами, а особливо технології термічної переробки; - проаналізувати можливості удосконалення технології низькотемпературного спалювання для спрощення процесу переробки.

У сучасному світі інтенсивна економічна діяльність людини призводить до утворення великої кількості відходів. Проблема управління побутовими відходами продовжує розглядатися як головна для суспільства та уряду, особливо в міських районах, зі значною кількістю населення та проблемою зростання утворення відходів. Способи захоронення цих відходів, такі як їх складування на полігонах та переробка, часто негативно впливають на стан навколишнього середовища. Проблема управління відходами є актуальною у всьому світі. Хоча побутові відходи становлять лише невелику частку від загальної кількості відходів, їх вплив є значним через екологічні, економічні та соціальні складнощі, пов'язані з їх управлінням.

Також сприяє циркулярній економіці, яка приділяє значну увагу скороченню споживання кінцевого ресурси, повторне використання та переробка матеріалів для усунення відходів, зменшення забруднення, вартість збереження та зелене виробництво. Перешкоди для ефективного муніципального управління побутовими відходами включають брак обізнаності, технологій, фінанси та ефективне врядування.

Побутові відходи - змішані та/або роздільно зібрані відходи від домогосподарств, включаючи відходи паперу, картону, скла, пластику, деревини, текстилю, металу, упаковки, біовідходи, відходи електричного та електронного обладнання, відходи батарейок та акумуляторів, небезпечні відходи у складі побутових, великогабаритні та ремонтні відходи, а також змішані та/або роздільно зібрані відходи з інших джерел, якщо ці відходи подібні за своїм складом до відходів домогосподарств.

На даний момент в Україні поводження з відходами є екологічним викликом, тим більше, що обсяг побутових відходів продовжує зростати. Основним способом переробки відходів є захоронення. Спалювання побутових відходів може мінімізувати їх масу на 70% і об'єм на 90%, а також рекуперацію електроенергії та тепла. Порівняно з найпопулярнішими методами

обробки відходів (такими як звалища та компостування), спалювання за допомогою систем управління викидами в повітря вважається більш безпечним варіантом.

Дослідження, щодо рівнів термічного потенціалу побутових відходів описано в багатьох іноземних та вітчизняних працях. На відміну від закордонних вчених, українські вчені більше зосереджуються на простіших методах поводження з відходами, але з дотриманням загальноприйнятих підходів до аналізу їх фізико-хімічних властивостей та видів забруднень, що виділяються у процесі термічної переробки.

Дослідженнями в галузі технології та обладнання для виробництва альтернативних видів палива займалася низка провідних українських вчених Інституту технічної теплофізики НАН України. Зокрема Петрова Ж. О., Гелетуха Г. Г., та ін., в своїх масштабних дослідженнях зосередили свою увагу на розробленні методики оцінювання енергетичного потенціалу біомаси та розробку комплексу технологій: переробка торфу на композиційне паливо та гумінові добрива, ефективного спалювання низькоякісних видів біопалива та спалювання твердого біопалива вологістю до 55% на рухомих колосникових решітках, також було визначено оптимальні режими роботи газозбірних свердловин систем збору біогазу на звалищах і полігонах.

Також активно досліджується проблема використання сортованих відходів, а особливо деревних, що можуть бути перетворені на тверде паливо для котлів. Використання деревних відходів, як палива є одним із основних механізмів до безвідходного виробництва у лісовому секторі. Інший напрямок використання відходів, як палива можна зробити більш ефективним з використанням побутових відходів, які підвищують теплотворну здатність такої паливної композиції.

Вибір оптимального співвідношення між різними видами пелет є складною задачею. Оптимальне співвідношення кількості елементів у суміші має відповідати кільком критеріям. Першим критерієм є екологічність – мінімум викидів в атмосферу та мінімум золи з небезпечними елементами. Другий критерій це калорійність – оптимальна суміш повинна давати високий рівень калорій. І третій критерій це ціна – це один з основних критеріїв при виборі твердого палива, зрозуміло, що ціна повинна бути як найнижчою.

Якщо аналізувати тверді відходи, то для поставлених цілей не підходить:

- текстиль, дерево. При використанні цих видів палива в атмосферу викидається значна кількість оксидів азоту, оксидів сірки та чадного газу. При цьому рівень викидів перевищує нормативні показники;

- біовідходи, папір, картон, несортований горючий залишок) не підходить через викиди в атмосферу та низьку калорійність. При цьому хоча біовідходи і мають низький рівень викидів, кількість калорій при їх спалюванні є значно нижчою за інші види палива. Те ж стосується паперу/картону та несортованого горючого залишку, при цьому дані групи відрізняються ще і високим рівнем викидів

- гума не підходить через надзвичайно високі показники викидів. Дана група не може бути застосована у значних кількостях.

Окремою групою є пластик. Даний матеріал не може бути використаний окремо через значні вики, але в невеликій кількості може бути доданий у суміш через свою надзвичайно високу калорійність та надзвичайно малу зольність.

Інша група відходів показує високі рівні калорійності та низькі рівні викидів це все різні суміші пелет чи різних порід дерева. Всі ці види пального зараз використовуються у твердопаливних системах опалення. З цієї групи суміш хвоя-30% бук-30% дуб 40% показує найкращі результати калорійності та викидів в атмосферу. Саме ця суміш може бути вибрана в якості основи суміші побутових відходів та пелет, що може бути застосована без ризиків для довкілля. Така суміш може бути поєднана з твердими побутовими відходами з полігону в кількості 40 % та незначної кількості пластикових відходів (до 10 %).

Така суміш має високу калорійність та відносно невисокі викиди забруднюючих речовин.

Антон Свашенко
здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: svashenko.a@gmail.com, тел. +380935477890

ОСОБЛИВОСТІ АСОРТИМЕНТУ ТА СТРУКТУРИ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ ПРИДОРОЖНЬОЇ ТЕРИТОРІЇ

Анотація. У тезах досліджено роль ландшафтної архітектури та зелених насаджень у забезпеченні стійкості сучасних урбоекосистем та покращенні психофізичного стану міського населення. Проаналізовано методологічні підходи до формування систем озеленення в мегаполісах, а також специфіку підбору дендрофлори для фітомеліорації вулично-дорожньої мережі. Обґрунтовано багатофункціональність рослинних компонентів як невід'ємних структурних елементів міського середовища, що забезпечують його екологічну безпеку та естетичну гармонійність.

Ключові слова: урбоекосистема, ландшафтна архітектура, фітомеліорація, антропогенний тиск, зелені насадження загального користування, екологічна безпека міст.

Актуальність дослідження пояснюється стрімким розширенням меж міських агломерацій та інтенсифікацією урботехногенного тиску, що супроводжується зростанням навантаження від усіх видів транспорту. В умовах деградації міського середовища особливого значення набуває створення стабільних ландшафтних комплексів, здатних мінімізувати негативний вплив техногенних чинників на здоров'я людини та забезпечити психофізіологічний комфорт населення через відновлення зв'язку з природним середовищем.

Завдання дослідження можуть бути сформовані наступним чином: оцінити значення ландшафтних компонентів у вирішенні екологічних та соціальних проблем сучасних міст; систематизувати типи та функціональні особливості зелених насаджень у структурі міст-мільйонників; проаналізувати технічні методи та дендрологічний склад рослинних угруповань, що використовуються для озеленення вулиць та автошляхів; визначити ключові функції зелених насаджень як повноцінних структурних одиниць міського планування.

В умовах сьогодення питання збереження та оптимізації антропогенного середовища в межах міських територій, а також формування умов, що сприятливо впливають на психофізичний статус індивіда, набувають стратегічного значення. Це стає особливо актуальним на тлі масштабного територіального зростання міст, розвитку транспортної інфраструктури та ескалації напруженості урботехногенних факторів. Ландшафт виступає фундаментальним інструментом у розв'язанні зазначених проблем, оскільки його компоненти дозволяють корегувати екологічні параметри середовища, наближаючи їх до оптимальних значень [1].

Зелена інфраструктура селітебних та позаміських територій є обов'язковим елементом стабільного функціонування урбоекосистем. Окрім виконання суто екологічних завдань (таких як регулювання газового складу атмосфери, очищення повітряних мас, формування мікрокліматичних особливостей та зниження акустичного забруднення), насадження створюють комфортне життєве середовище. Вони сприяють нівелюванню агресивного інформаційного поля мегаполісів, задовольняючи естетичні потреби людини у гармонійному оточенні та забезпечуючи необхідну взаємодію з живою природою.

Процес просторової організації вулично-дорожньої мережі має здійснюватися комплексно, інтегровано із забудовою, підземними комунікаціями та наземними спорудами, з обов'язковим урахуванням екологічних та транспортних вимог. Через невпинне зростання інтенсивності трафіку, запиленості та рівня шуму, потреба у фітомеліорації вулиць стає дедалі гострішою. Серед найпоширеніших методик озеленення варто виділити регулярну висадку дерев у спеціально облаштовані лунки в покритті, розміщення рослин на газонах і квітниках, а також формування зелених захисних смуг між тротуарами та будівлями.

До категорії насаджень загального користування відносять паркові зони, лісопарки, сади, бульварні насадження, сквери, а також озеленені проспекти, набережні, гідропарки та прибудинкові території. Зазначені об'єкти призначені для вільного доступу всіх верств населення і, згідно з нормативами, мають охоплювати не менше 70 відсотків загальної площі міського озеленення [2].

Структура озеленення міст-мільйонників, що зазвичай поділяються на 9–10 адміністративних районів та численні мікрорайони, передбачає наявність центрального парку, мережі з 5–7 районних парків та великої кількості скверів.

Крім того, до системи входять сади житлових районів та кластерів, з'єднані між собою бульварами і пішохідними алеями, а також спеціалізовані рекреаційні об'єкти: спортивні зони, ботанічні сади, зоопарки та виставкові парки [1, 3].

Методологічно озеленення вулиць реалізується через кілька основних підходів:

- поодинокі або групові висадки дерев у лунках чи смугах між тротуаром та проїжджою частиною;
- формування одно- чи дворядних деревних насаджень у поєднанні з чагарниками (створення живоплотів, бордюрів та груп);
- розміщення дендрофлори в зоні між забудовою та пішохідними шляхами;
- створення розділювальних смуг на магістралях із використанням груп дерев та кущів.

Зазначені техніки можуть комбінуватися у різних варіаціях, доповнюючись газонами та квітковими композиціями. Для вуличного озеленення слід обирати види з густою кроною, що демонструють стійкість до формування, пило- та газостійкість (зокрема тамариск чотирьохтичинковий, тополя канадська, ялина колюча, маслинка вузьколиста, барбарис Тунберга, смородина золотиста тощо). Встановлено, що дерева мають висаджуватися у віці від 7 років, а чагарники — не менше 3 років [1]. Кожен планувальний елемент вимагає індивідуального підбору видового складу рослин.

Рядова висадка дерев у лунки в дорожньому покритті є традиційним методом для історичної забудови. Параметри лунок мають складати не менше $1,25 \times 1,25$ м, а для великомірних порід (дуб, каштан, тополя) — від $1,5 \times 1,5$ м до 1,8 м у діаметрі, особливо за умов ущільненого ґрунту або асфальтування. Недотримання цих розмірів часто стає причиною уповільнення вегетації та передчасного скидання листя [3].

У практиці міського благоустрою домінують чотири морфологічні типи дерев. Це рослини з овальною кроною (каштан, липа дрібнолиста), з нерівномірно розлогою архітектонікою (клен гостролистий, тополя чорна, ясен звичайний, дуб червоний), пірамідальні форми (тополя берлінська, пірамідальна липа) та правильні кулясті форми (граб, клен, ясен). Також перспективним є використання айви японської, шовковиці білої та клена американського. Для чагарникових ярусів рекомендуються кизил, вейгела, калина, бузок, жасмин. Ефективне шумопоглинання забезпечують насадження ірги, ялини, туї, ялівцю та бирючини. Фахівці зазначають, що вздовж автомагістралей доцільно використовувати високорослі породи, що швидко ростуть: тополя, гледичію, березу, білу акацію [2].

Специфіка озеленення вздовж транспортних шляхів передбачає використання дерев із різними типами крон: від правильних овальних (клен-явір, каштан) та розлогих (дуб звичайний, ясен зелений) до пірамідальних (тополя чорна) та кулястих форм (робінія куляста, ясен кулястий). Розділювальні смуги між проїжджими частинами або трамвайними коліями зазвичай мають ширину 1,5–2,5 м.

Комплекс робіт з озеленення доріг включає створення захисно-декоративних смуг обабіч шляху, облаштування розділювальних ділянок, озеленення перехресть, зупинок та зон відпочинку. Придорожні чагарники виконують функцію захисту дорожнього полотна від ерозії, створюють сприятливий мікроклімат та підвищують безпеку руху. Такі насадження на рівнинних ділянках формуються шляхом рядового посіву, щільність якого залежить від ширини узбіччя [1].

Процес підбору рослинного складу, формування угруповань та їхня адаптація до рельєфу й клімату є сферою компетентності садівників, лісівників та агрономів. Тільки через синергію

ландшафтних архітекторів, дизайнерів та фахівців з агротехніки можливе створення сучасних об'єктів садово-паркового мистецтва. Рослинні компоненти є універсальними та багатофункціональними: чим ширший спектр функцій вони виконують, тим вищою є ефективність ландшафтної системи в цілому.

Кожен сегмент міського озеленення реалізує такі завдання:

- участь у формуванні архітектурно-художньої ідентичності міста;
- задоволення рекреаційного попиту населення;
- створення бар'єрів для шуму, газових та пилових емісій;

Зелені насадження виступають повноцінними конструктивними елементами урбанізованого середовища нарівні з архітектурними спорудами. Їхня багатофункціональність робить їх критично необхідним компонентом для сталого розвитку та комфортності міського простору.

Висновки

• Встановлено, що в умовах інтенсивного зростання міст ландшафтні компоненти є ключовим інструментом мінімізації негативних наслідків урботехногенного пресингу та підтримки психофізичного здоров'я громадян.

• З'ясовано, що ефективність озеленення вулиць залежить від правильного вибору дендрофлори (використання пило- та газостійких видів, таких як тополя, клен, ясен) та дотримання технічних параметрів посадки (оптимальні розміри лунок, вік саджанців).

• Обґрунтовано багатофункціональність зелених насаджень як структурних одиниць міського планування, що одночасно виконують архітектурно-естетичні, екологічні, захисні та рекреаційні функції, гарантуючи екологічну безпеку урбанізованого середовища

Література

1. Абдулоєва О. С. Фітоценологія. Київ : Фітосоціоцентр, 2011. 450 с.
2. Бессонова В.П., Пономарьова О.А. Порівняльна оцінка життєвого стану інтродукованих і аборигенних деревних рослин примагістральної лісосмуги траси Дніпро-Донецьк, *Інтродукція рослин*, 2016, № 4, С. 65-72
3. Бессонова В.П., Пономарьова О.А., Іванченко О.С. Видове різноманіття та життєвий стан деревних насаджень вздовж автотраси південного напрямку міста Дніпропетровськ. *Питання біоіндикації та екології*. 2014. Вип. 19, № 2. С. 64-84

Владислав Слобожанюк
здобувач 3-го рівня вищої освіти
Наталія Внукова
д.т.н., завідувач кафедри екології
ХНАДУ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ЕКОЛОГОБЕЗПЕЧНОГО СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Анотація. У тезах розкрито фундаментальні аспекти формування та функціонування системи екологобезпечного сталого розвитку в умовах глобалізації. Проаналізовано генезис міжнародного природоохоронного співробітництва, починаючи зі Стокгольмської конференції ООН, та деталізовано сучасні загрози глобальній екологічній безпеці: від деградації озонового шару до критичного дефіциту прісної води. Особливу увагу приділено методології оцінки екологічної ефективності країн (ЕПІ) та стратегічним пріоритетам України в контексті подолання наслідків Чорнобильської катастрофи та інтеграції у світовий еколого-економічний простір.

Ключові слова: сталий розвиток, глобальна екологічна безпека (ГеБ), антропогенна експансія, індекс екологічної ефективності (ЕПІ), біосферні цикли, екологічна міграція, кліматична дивергенція.

Фундаментальною ознакою сучасної епохи є критичне загострення діалектичних суперечностей між соціальними системами та природним середовищем їхньої локації. Експоненціальне зростання демографічного тиску, інтенсифікація індустріального виробництва та неконтрольований науково-технічний прогрес призвели до порушення базового планетарного гомеостазу — балансу між функціональною спроможністю екосистем та життєдіяльністю антропосфери. На відміну від попередніх історичних етапів, сучасний антропогенний фактор набув статусу геологічної сили, що глобально трансформує параметри Землі, водночас посилюючи екзистенційну залежність людства від стану довкілля.

Цивілізаційний розвиток ХХІ століття базується на екстенсивному використанні природного капіталу. Орієнтація на кількісні економічні індикатори без урахування екологічної ємності територій зумовила тотальну контамінацію біосфери, що в ряді випадків призвело до незворотної деградації ландшафтів. Взаємозалежність між потребами соціуму та ресурсним потенціалом планети стала центральним об'єктом наукового аналізу.

Інституціоналізація екологічного співробітництва на глобальному рівні розпочалася зі Стокгольмської конференції ООН (1972 р.), де вперше було артикуловано необхідність екологізації міжнародних відносин. Створення Програми ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП) заклало фундамент для фінансової та організаційної підтримки природоохоронних ініціатив.

Ухвалений «План дій» визначив стратегічні вектори співпраці:

- Охорона соматичного здоров'я та превенція екологічно зумовлених захворювань.
- Протидія ерозії ґрунтів, аридизації та опустелюванню територій.
- Збереження генетичного біорізноманіття та ревіталізація Світового океану.
- Енергоефективність та перехід до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Детермінанти та ризики глобальної екологічної безпеки (ГеБ) характеризуються наступними рисами.

Сучасна ГеБ характеризується високим рівнем конфліктогенності, що зумовлено дефіцитом ресурсів. Основні загрози включають:

– руйнування озонового шару атмосфери: посилення тепличного ефекту в результаті зростання рівня викидів метану, аерозолів, радіоактивних газів, підвищення температури повітря на 1,1-6,4 °С, тощо [1];

– проявів глобальних змін клімату: танення льодовиків Арктики, підняття рівня Світового океану на 1 м, зміна частоти та інтенсивності випадання опадів, неповоротні зміни

в еко- та біосистемах, територіальні зміни у продуктивності сільського господарства, загострення проблем водопостачання та водоспоживання у густонаселених регіонах планети, що може призвести до катастрофічних загроз життю і здоров'ю, загостренню силових конфліктів у 46-ти країнах світу з населенням 2,7 млрд. осіб [2];

– забруднення Світового океану через екстенсивну діяльність ТНК, захоронення в ньому отруйних і радіоактивних речовин, насичення води вуглекислим газом з атмосфери, надходження антропогенних нафтопродуктів, важких металів і складних органічних сполук (за оцінками Грінпіс щороку до Світового океану скидається близько 6,5 млн. тон відходів, де 80% складає пластик, утворюючи острови, подібні до Великої тихоокеанської сміттевої плями) [1];

– зростання кількості населення світу (досягло позначки 7 мільярдів осіб 31 жовтня 2011 року, а прогнозується 9 млрд до 2042 року та трансформація детермінантів руху міграційних потоків (екологічні мігранти, екологічні біженці) [3];

– обмеженість доступу до світових ресурсів та непропорційність їх використання країнами світу. За останнє десятиріччя економічно розвинуті країни споживали близько 70% світової енергії та металів, 60% харчових продуктів) [1]; за цього співвідношення витрати енергії лише у землеробстві склали в різних країнах від 1/65 (басейн р. Конго) до 1/2,0-1/2,5 (США); екстраполяція тренду споживання води демонструє, що вже до 2030 року її потрібно буде на 40% більше від наявних ресурсів;

– розповсюдження ядерної, хімічної, біологічної, геофізичної, космічної, психотропної, екологічної зброї та технологій масового ураження [4, 5];

– зростання обсягів споживання та дефіциту ресурсного й енергетичного забезпечення. Прогнозується до 2030 р. збільшення споживання енергоносіїв на 37-50%); до того ж світових ресурсів нафти для енергозабезпечення цивілізації вистачить лише на 30-60 років, природного газу – 40-70, вугілля – 300-700, плутонію для АЕС на швидких нейтронах – на 1000, кватратів (включень) метану Чорного моря – на 40- 700 тис. рр

Методологія моніторингу - Індекс екологічної ефективності (EPI) [5]. Ключовим інструментом оцінки стану національних екосистем є The Environmental Performance Index (EPI). Він інтегрує 10 категорій показників, що відображають життєздатність систем, стан здоров'я населення та ефективність державних екополітик. У 2020 році аналіз EPI відбувся на тлі пандемії COVID-19, яка продемонструвала глобальну взаємозалежність країн. Локдауни виявили здатність природи до швидкої регенерації при зниженні антропогенного навантаження, що підкреслює важливість інвестицій у «зелене» відновлення.

Стратегічні завдання для забезпечення ГеБ можна сформулювати наступним чином.

Для стабілізації планетарної екосистеми необхідно реалізувати наступні заходи:

– Аналіз біогеохімічних циклів: Дослідження кругообігу речовин у контексті індустріальних викидів та прогноз обсягів утилізації відходів.

–Глобальний моніторинг: Розвиток космічних систем спостереження та створення єдиних баз даних супутникової телеметрії.

–Синергетична наука: Розробка міждисциплінарних підходів до вивчення змін біорізноманіття.

– Інституційна підтримка: Фінансування регіональних проектів та підтримка міжнародних угод (як-от Паризька угода).

Екологічні конфлікти на міждержавному рівні часто виникають через боротьбу за право контролю над ресурсами. Україна, маючи значний природний капітал, повинна імплементувати світовий досвід у національну стратегію.

Особливо актуальною є презентація українського бачення реабілітації чорнобильських територій. Координація міжнародних зусиль на основі медико-біологічних даних дозволить перетворити зону відчуження з територіального пасиву на майданчик для впровадження інноваційних технологій екологічної адаптації.

Таким чином, можна зробити висновок, що глобальна екологічна безпека сьогодні є не лише природоохоронним, а й геополітичним чинником. Формування єдиного еколого-економічного простору через торгівлю квотами, обмін еко-інноваціями та дотримання універсальних критеріїв безпеки є єдиним шляхом запобігання глобальному колапсу. Україна має унікальний історичний шанс стати активним суб'єктом формування цих стратегій, пропонуючи власні рішення у сфері пост-техногенної реабілітації територій.

Література

1. Ілляшенко І. О. Формування організаційно-економічного механізму стратегічного управління природно-техногенною та екологічною безпекою на засадах сталого розвитку. *Ефективна економіка*. 2013. № 1.
2. Шмандій В.М., Солошич І.О. Управління природоохоронною діяльністю: навч. посіб. Київ: Центр навч. літ., 2004. 296 с.
3. Данилишин Б. М., Ковтун В. В., Степаненко А. В. Наукові основи прогнозування природно-техногенної (екологічної) безпеки : монографія. Київ : Лекс Дім, 2004. 552 с.
4. Екологічна і природно-техногенна безпека України в регіональному вимірі : монографія / М. А. Хвесик, А. В. Степаненко, Г. О. Обиход та ін. ; за наук. ред. акад. НААН України, д-ра екон. наук, проф. М. А. Хвесика. Київ : ІЕПСР НАНУ, 2014. 339 с.

Олексій Хижняков
здобувач 3-го рівня вищої освіти, кафедра екології
Марина Барун
к.е.н., доцент кафедри екології
ХНАДУ, Україна
e-mail: masha.barun@gmail.com, тел: +380509739558

ІНДИКАТИВНІ ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Анотація. У статті проведено комплексний аналіз проблеми накопичення твердих побутових відходів (ТПВ) як одного з ключових чинників дестабілізації екобезпеки на регіональному та національному рівнях. Автором запропоновано та апробовано систему індикаторів оцінки техногенного навантаження, що базується на просторово-часовій диференціації та показниках питомого захоронення. На основі статистичних даних 2021 року здійснено ієрархізацію областей України за ступенем несприятливості екологічної ситуації в контексті експлуатації місць видалення відходів.

Ключові слова: тверді побутові відходи (ТПВ), техногенне навантаження, полігони, система індикаторів, PSR-модель, несанкціоновані сміттєзвалища, регіональний моніторинг.

Актуальність дослідження зумовлена критичними темпами зростання обсягів утворення ТПВ та ускладненням їхнього морфологічного складу, що створює безпрецедентний тиск на компоненти біосфери. Враховуючи стратегічні цілі України щодо імплементації положень Директиви ЄС №1999/31/ЄС та реформування системи управління відходами, наукове обґрунтування кількісних та якісних параметрів впливу полігонів на довкілля є фундаментальною передумовою для переходу до сталого регіонального розвитку та мінімізації екологічних ризиків.

Завдання дослідження полягають в наступному:

1. Систематизувати теоретико-методологічні підходи до визначення категорії «техногенне навантаження» від об'єктів захоронення ТПВ.
2. Розробити універсальну систему індикаторів (інтегральних, точкових, часових та специфічних) для оцінки стану регіональних гідроекосистем та ґрунтів.
3. Проаналізувати стан та динаміку накопичення відходів на санкціонованих та стихійних сміттєзвалищах у довоєнний період.
4. Здійснити порівняльний аналіз рівнів навантаження між різними адміністративними одиницями України для виявлення найбільш критичних зон.

Проблема ефективного менеджменту твердих побутових відходів (ТПВ) позиціонується як одна з найбільш гострих екологічних та соціоекономічних детермінант сучасного поступу, що зумовлено невпинною ескалацією обсягів їх генерації та депонування. Окрім кількісних показників, спостерігається суттєва трансформація компонентної структури ТПВ у бік збільшення частки синтетичних та екотоксичних складників. Під дефініцією ТПВ слід розуміти переважно твердофазні залишки антропогенної життєдіяльності в житлових та громадських приміщеннях, які втратили свої первісні споживчі властивості та не мають прямого зв'язку з виробничими циклами промислових підприємств.

На сучасному етапі глобальною домінантою в системі поводження з відходами залишається їхня консервація на спеціалізованих полігонах. Відповідно до положень Global Waste Management Outlook 2024, у Східній Європі близько 45% ТПВ спрямовується на санкціоновані об'єкти, а 25% — на неконтрольовані звалища, тоді як загальносвітовий показник захоронення становить 68%. Незважаючи на те, що «Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року» наголошує на неприпустимості надмірної залежності від методів захоронення, очевидним є факт, що цей метод залишатиметься базовим

у середньостроковій перспективі. За верифікованими даними Мінінфраструктури України, протягом 2023 року обсяг генерованих побутових відходів перевищив 44 млн м³ (понад 9 млн тонн), при цьому 89,5% цієї маси було розміщено на 5,6 тис. об'єктів видалення відходів загальною площею понад 12 тис. га. Наразі кумулятивна маса депонованих відходів на вказаних локаціях перевищує 235 млн тон [1].

Дослідження деструктивного впливу об'єктів видалення ТПВ становить актуальний науково-практичний інтерес. Реформування галузі, передбачене Національною стратегією, вимагає створення мережі регіональних полігонів, що відповідатимуть жорстким критеріям Директиви ЄС №1999/31/ЄС.

Реалізація цієї трансформації потребує прелімінарного аналізу існуючої ситуації в розрізі регіональних особливостей.

Полігони ТПВ слід розглядати як штучно трансформовані природні ландшафти, що виступають стаціонарними джерелами полікомпонентного забруднення атмосферного басейну, гідрологічної мережі, едафотопу та геологічного базису. Вплив таких об'єктів має комплексний характер із вираженими вторинними екологічними ефектами. У цьому контексті оцінка техногенного навантаження інтегрується в загальну PSR-модель (Тиск – Стан – Реагування). Такий підхід створює методологічну базу для аналізу екологічних ризиків для біоти та оцінки загроз для соматичного здоров'я населення [1,2].

Показники, що детермінують просторові характеристики місць захоронення відходів у межах конкретних господарських одиниць, виступають маркерами техногенного пресингу на регіональному рівні. Вони мають властивості індикаторів, що дозволяють верифікувати динаміку процесів вищого ієрархічного рівня. Розробка такого інструментарію потребує верифікованих статистичних масивів даних (Мінінфраструктури, Держстат). Для об'єктивного міжрегіонального компаративного аналізу було розроблено систему індикаторів на основі питомих величин (табл. 1), що базується на результатах попередніх напрацювань.

Таблиця 1. Система індикаторів техногенного навантаження

Інтегральні	Точкові	Часові	Специфічні
1. Модуль техногенного навантаження від місць захоронення ТПВ. 2. Відносна площа полігонів. 3. Щільність місць захоронення ТПВ.	1. Питоме захоронення на полігонах ТПВ – (м ³ , т на 1 га території полігону). 2. Середня площа одного полігону.	1. Інтенсивність накопичення відходів в місцях захоронення ТПВ, в т.ч. відносно національного рівня. 2. Динаміка зміни середньої площі одного полігону.	1. Питоме захоронення ТПВ на несанкціонованих звалищах. 2. Коефіцієнт впливу несанкціонованих звалищ відносно полігонів ТПВ.

Нижче наведено концептуальну характеристику зазначених параметрів.

Інтегральні індикатори.

Модуль техногенного навантаження (МТН) визначається як інтегральна сума емісій (газоподібних, рідких, твердих) з усіх антропогенних джерел, екстрапольована на одиницю площі адміністративної одиниці протягом річного циклу. У сфері менеджменту відходів пропонується інтерпретувати МТН на геологічне середовище як сумарну масу генерованих та депонованих відходів у регіональних межах. Відносна площа вказує на частку території, експлуатованої під полігони, а щільність — на кількісний розподіл об'єктів на одиницю площі.

Точкові індикатори.

Ця група фокусується на концентрації відходів на одиницю площі самого полігону та морфометричних параметрах окремих сміттєзвалищ. Хоча середня площа об'єкта не дає вичерпної відповіді щодо рівня загрози, вона є базовою для розрахунку динамічних змін.

Часові індикатори.

Відображають темпи щорічного зростання маси захоронених ресурсів. Регіони з найвищими показниками площі окремих полігонів розглядаються як потенційно пріоритетні для впровадження технологій утилізації біогазу.

Специфічні індикатори.

До категорії специфічних індикаторів можна віднести ситуацію з несанкціонованими сміттєзвалищами. Несанкціоновані сміттєзвалища мають певну специфіку впливу на довкілля і, зазвичай, розглядаються окремими дослідженнями.

Питоме захоронення ТПВ на несанкціонованих звалищах – обсяг ТПВ на одиницю площі несанкціонованого сміттєзвалища (тис. м³ /га)

Стосуються сфери несанкціонованого видалення відходів, що має особливу специфіку впливу на довкілля. Коефіцієнт впливу стихійних звалищ визначається за формулою 1:

$$K = ((V_n * S_n) / (V_p * S_p)) * 100 \quad (1)$$

де індекси «н» та «п» позначають параметри несанкціонованих та офіційних об'єктів відповідно [3].

Аналіз регіональних патернів техногенного навантаження.

Показник МТН за 2023 рік демонструє високу варіативність (75%), досягаючи екстремального значення у Київській області (1613,4 т/км²), що у 3,6 рази перевищує загальнодержавний рівень. Мінімальний пресинг зафіксовано на Сумщині (31,6 т/км²). Середня частка земель під полігонами становить 0,0158%. Існує стійка кореляційна залежність між відносною площею об'єктів та щільністю їх розміщення. Показник питомого захоронення є неоднорідним: коефіцієнт варіації за об'ємом становить 2,29, за масою — 1,01. Середній розмір полігону в Україні дорівнює 1,48 га (від 0,21 га на Волині до 9,0 га на Черкащині).

Дані щодо інтенсивності накопичення (4 % щорічно) дозволяють зробити висновок про середній експлуатаційний вік українських полігонів на рівні 25 років. Аналіз стихійних сміттєзвалищ свідчить про їх відносно менший внесок у загальну масу відходів (4,12 тис. м³/га проти 171 тис. м³/га на полігонах), проте їхня чисельність у 4,5 рази вища за офіційні локації. Хоча 95% таких звалищ ліквідуються оперативно [3], ситуація в окремих регіонах (наприклад, Харківщина та Донеччина) потребує ретельного моніторингу.

До найбільш екологічно напружених регіонів за рівнем техногенного пресингу віднесено Київську, Львівську, Донецьку та Хмельницьку області. Найбільш стабільна ситуація спостерігається у Сумській та Вінницькій областях.

Висновки

1. Доведено, що стратегічна домінанта методу захоронення ТПВ у довгостроковій перспективі зумовлює необхідність впровадження системного моніторингу кількісних та просторових характеристик полігонів як джерел техногенного навантаження на регіональному рівні.

2. Встановлено, що розроблена система індикаторів дозволяє верифікувати значну міжрегіональну диференціацію: рівень навантаження у Київській області у 14 разів перевищує аналогічні показники найменш завантажених регіонів, що потребує диференційованого підходу до управління відходами.

3. З'ясовано, що середня площа полігону в Україні стабілізувалася на рівні 1,5 га, проте висока інтенсивність щорічного накопичення (4%) свідчить про вичерпання ресурсу існуючих об'єктів у найближчі десятиліття.

4. Виявлено, що попри значну кількість несанкціонованих сміттєзвалищ, їхній питомий внесок у загальне забруднення є меншим порівняно з офіційними полігонами, проте вони створюють додаткові ризики через неконтрольованість процесів міграції токсикантів.

5. Обґрунтовано, що використання PSR-моделі та запропонованих індикаторів забезпечує надійну базу для просторово-часової диференціації територій за рівнем екологічної

небезпеки та дозволяє ідентифікувати пріоритетні зони для впровадження інноваційних технологій дегазації та рекультивациі.

6. Визначено, що подальші розвідки мають бути спрямовані на розробку інтегральних критеріїв впливу та шкал оцінки якості довкілля в зонах впливу місць видалення відходів.

Література

1. Приходько, В.Ю. Дослідження регіональних особливостей захоронення твердих побутових відходів в Україні. *Вісник ХНУ. Серія «Екологія»*, 2019, 21, 51-62
2. Пацева, І.Г., Герасимчук, О.Л., Кагукіна, А.М. Системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад. *Екологічні науки*, 2022, 43, 181-184.
3. Корбут, М.Б., Сафранов, Т.А., Мальований, М.С. Методичні підходи до оцінки екологічних ризиків від полігонів твердих побутових відходів. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2024, 3 (2), 187-196.

Збірник наукових праць

**Всеукраїнська науково-практична конференція
«Відновлення і розвиток дорожньої інфраструктури України у повоєнний
період».**

16-17 квітня 2026 року

Матеріали опубліковано в авторській редакції мовою оригіналу

Відповідальний за випуск Р.В. Смолянюк
Комп'ютерна верстка А.В. Седов

Підп. до друку Формат 60 x 84/16. Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman Суг. Друк цифровий
Умов. друк. арк. Обл.-вид. арк.
Зам. № _____, Тираж 60 прим.

Віддруковано ФОП Крамаренко Ю.М.
Свідоцтво про держреєстрацію АБ №815827 від 22.03.13р.