

АВТОШЛЯХОВИК України — 4'2025 —

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ СТАНУ
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У СУЧАСНИХ
УМОВАХ ЕКСПЛУАТУВАННЯ**

ЗМІСТ

Закревський О. І., Голик А. В., Назаренко М. Б., Устименко В. С. Добавки водню для двигунів із запалюванням від стиснення: стан і перспективи застосування	2
Сахно В. П., Разбойніков О. О., Бугрик О. В., Трохимченко В. М. Дослідження впливу штучних дорожніх нерівностей на зміну вертикальних реакцій у контакті шин з дорогою	9
Крайник Т. Л., Худавердян Г. А. Формування передавального діапазону трансмісії універсального колісного тягово-транспортного засобу	16
Філіпова Г. А., Яновський В. В., Федоров В. В. До оцінки впливу ступеня стиску на показники газового двигуна	24
Масленнікова В. В. Енергозбереження в зеленій архітектурі: сучасні підходи, технології та перспективи розвитку	28
Ілляш С. І., Стасюк Т. О. Закономірності зміни стану автомобільних доріг в сучасних умовах експлуатування	34
Коршак А. В. Фактори впливу на обернений розрахунок характеристик покриття за даними FFWD	42
Терещенко Т. А. Пошкодження та дефекти дорожнього одягу. Термінологія та оцінювання стану дорожнього одягу	49

Редагування: Бойко О. С., Копаниця І. В.

Макетування: Копаниця І. В.

Усі статті проходять двостороннє сліпе рецензування.

За достовірність фактів, цифр, точність імен і прізвищ відповідають автори статей,
за зміст рекламних матеріалів – рекламодавці.

Редакція не завжди поділяє погляди авторів публікацій.

Мови видання: українська та англійська

Усі права захищені. Передрук матеріалів можливий лише з дозволу редакції.

Видавець: ДП "ДержавтотрансНДІпроект", 03113, Київ, просп. Берестейський, 57,
к. 1009 (редакція), e-mail: ikopanutysha@insat.org.ua

Укомплектовано 31.12.2025



УДК 662.769.21:621.436

© О. І. Закревський, старший наук. співробітник,
e-mail: ozakrevsky@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0002-6810-5146;
© А. В. Голик, канд. техн. наук, завідувач відділу,
e-mail: aholyk@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0002-0994-9541;
© М. Б. Назаренко, канд. техн. наук,
заступник начальника центру,
e-mail: nnazarenko@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0001-8649-9014;
© В. С. Устименко, канд. техн. наук, завідувач
сектору, e-mail: vustymenko@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0003-3657-077X
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Oleksandr Zakrevsky, Senior Research Fellow,
e-mail: ozakrevsky@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0002-6810-5146;
© Andrii Holyk, Ph.D., Head of Division,
e-mail: aholyk@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0002-0994-9541;
© Mykola Nazarenko, Ph.D.,
Deputy Head of Centre,
e-mail: nnazarenko@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0001-8649-9014;
© Viktor Ustymenko, Ph.D., Head of Section,
e-mail: vustymenko@insat.org.ua,
ORCID: 0000-0003-3657-077X
(SE «State Road Transport Research Institute»)

ДОБАВКИ ВОДНЮ ДЛЯ ДВИГУНІВ ІЗ ЗАПАЛЮВАННЯМ ВІД СТИСНЕННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

HYDROGEN ADDITIVES FOR COMPRESSION-IGNITION ENGINES: STATUS AND PROSPECTS OF APPLICATION

Анотація. Розглянуто результати експериментальних досліджень, а також перспективи застосування добавок водню як моторного палива для двигунів із запалюванням від стиснення, зокрема автомобільних дизелів. Проаналізовано можливість та умови роботи дизеля з добавками водню. Визначено, що під час конвертування дизелів та їх адаптації для використання добавок водню слід враховувати суттєві відмінності фізико-хімічних властивостей водню і дизельного палива. Наведені приклади адаптації дизелів для роботи з добавками водню та методи зниження викидів забруднювальних речовин, які можуть бути застосовані на автомобільному транспорті.

Ключові слова: водень; дизельне паливо; дизельний двигун (дизель); двопаливний (газодизельний) двигун; конвертування двигунів.

Abstract. A review of scientific and technical literature sources allows for a discussion of the prospects of using hydrogen additives as fuel for converted diesel engines. Accordingly, the article provides characteristic examples of developments, including methods and means for adapting diesel engine operation to hydrogen additives, as well as innovative scientific and technical solutions applied for the deployment of hydrogen in this direction. In Ukraine, as in the rest of the world, scientific research has been conducted on the use of hydrogen additives for compression-ignition internal combustion engines. In particular, in recent years, such research has focused on adding small amounts of hydrogen as an additive to the primary fuel, as well as adding hydrogen-containing gas to improve engine efficiency and enhance their environmental performance. Thus hydrogen additives can serve as an alternative to liquid oil-based fuels, including being used in compression-ignition transport engines. When converting diesel engines and adapting them for the use of hydrogen additives, it is necessary to take into account the significant differences in the physico-chemical properties of hydrogen and diesel fuel, such as density, gravimetric and volumetric calorific value, auto-ignition temperature, and others. The examples provided in the article confirm that converting diesel engines and adapting them to the use of hydrogen additives can not only ensure saving of petroleum motor fuel but also improve the operational and environmental performance of the engines.

Keywords: hydrogen; diesel fuel; diesel engine; dual fuel engine; engine conversion.

Вступ

У попередніх публікаціях автори розповідали про історію застосування водню як моторного палива для двигунів внутрішнього згорання, висвітлюючи загальні теоретичні положення щодо використання водню на автомобільному транспорті, а також дослідження і розробки у цій сфері стосовно двигунів із примусовим запалюванням. Ця публікація присвячена результатам

експериментальних досліджень застосування добавок водню, а також добавок водневмісних газів, зокрема так званого «газу Брауна», у двигунах із запалюванням від стиснення – дизелях.

Можливість роботи класичного дизеля на «чистому» водні (100 % H₂) із запалюванням газоповітряної суміші від стиснення досліджували ще в другій половині минулого століття [1].

Фізико-хімічні властивості водню мають суттєві відмінності від дизельного палива – значно вища температура самозаймання (820–870 K проти 480–530 K), відсутність рідкої фази й мастильності, інша кінетика формування полум'я, інші межі займистості та енергія запалювання. Запалювання водневих гомогенних газоповітряних сумішей вимагає надмірно високих ступенів стиснення та/або істотного попереднього підігріву суміші (до 400–500 K), що спричиняє ризики неконтрольованого запалювання на впуску, детонації та високих викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами, а також ризики для надійності й безпеки.

Високий тиск і температура посилюють шкідливий вплив водню насамперед на високміцні конструкційні сталі (матеріали колінчастих валів, шатунів, паливної апаратури високого тиску), що проявляється водневим окрихченням: водень дифундує в метал, знижує його пластичність, спричиняє утворення мікротріщин і може призводити до руйнування елементів конструкції.

Зазначені виклики до цього часу не дозволили створити промисловий зразок класичного дизеля на «чистому» водні, зокрема, для транспортних засобів.

Отже, в цій статті здійснено огляд наукових публікацій, які дозволяють розглянути перспективи застосування не «чистого» водню, а його добавок як моторного палива для конвертованих дизелів, а також добавок водневмісних газів. Наведено характерні приклади розробок, зокрема конвертування дизелів у двопаливні (газодизельні) двигуни (із запалюванням газоповітряної суміші запальною дозою дизельного палива) та їх адаптації для використання добавок водню,

Основна частина

За наявними публікаціями дослідження можливості застосування добавок водню та водневмісних газів для двигунів із запалюванням від стиснення тривають як в Україні [2-4, 12], так і в інших країнах [1, 5-11]. Зокрема, останніми роками такі дослідження виконувались за напрямом щодо додавання невеликих за обсягом домішок власне водню до основного палива, а також додавання водневмісного газу, для сприяння підвищення ефективності роботи двигунів та поліпшення їхніх екологічних характеристик.

Наприклад, в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України запропоновано технічне рішення стосовно покращення екологічних показників малолітражного дизельного двигуна шляхом додавання до основного (дизельного) палива мікродомішок атомарного та молекулярного водню.

Суміш атомарного та молекулярного водню отримували в компактному електролізері, який порівняно легко під'єднується до паливної системи транспортного засобу і який позбавляє необхідності створювати спеціальну систему живлення воднем (з досить габаритним та пожежонебезпечного обладнанням). Отже, штатна система живлення двигуна паливом була доповнена додатковим компонентом (електролізером), із якого водень дозовано подається у впускний колектор двигуна. Дослідження показників токсичності відпрацьованих газів двигуна виконано для трьох режимів його навантаження – 0,8; 1,0; 1,2 кВт з використанням як «чистого» дизельного палива, так і дизельного палива з додаванням мікродомішок водню у відносній кількості – 0,49; 1,15; 1,83 % за масою.

Екологічний ефект полягає у практично повному виключенні зі складу відпрацьованих газів незгорілих вуглеводнів: зниженні концентрації оксиду вуглецю майже до нуля, а концентрації оксидів азоту на 14–26 відсотків [2].

У Національному транспортному університеті проводились експериментальні дослідження дизеля 4С11,0/12,5 (Д-241) за навантажувальною характеристикою ($n = 1500 \text{ хв}^{-1}$) за сталої величини добавки водневмісного газу – так званого «газу Брауна». Основним завданням було визначення оптимальної величини такої добавки (яку в підсумку встановлено на рівні 5 %) для заданого режиму роботи за найкращої паливної економічності.

Аналіз результатів досліджень засвідчив, що зменшення величини питомого споживання дизельного палива становило близько 3,5 % в усьому діапазоні навантажувальної характеристики, при цьому потужність підвищувалась на 1,5 відсотка. Максимального зниження питомого споживання дизельного палива (на 4,75 %) було досягнуто за відсоткової частки водневмісного газу 5,32. Концентрація забруднювальних речовин, у першу чергу – вуглеводнів, у випускних газах суттєво

знижувалась (майже на 30 %) в усьому діапазоні навантажувальної характеристики; незначне зниження концентрації оксидів азоту відзначалось в режимі холостого ходу і невеликих навантажень [3].

У Національному університеті кораблебудування здійснювалися випробування та дослідження робочого процесу в суднових двигунах та їхній паливній апаратурі за використання малих домішок (добавок) водню до дизельного палива. Встановлено, що використання таких домішок сприяє покращенню експлуатаційних (економічних) показників роботи дизеля, зокрема, підтверджено приріст потужності – на 1,7–3,4 %, зменшення питомої витрати палива – на 2,2–3,7 %, залежно від частки доданого водню.

Використання малих домішок водню до основного палива приводить до скорочення довжини факелу розпиленого палива та збільшення його кута розкриття. Завдяки покращенню якості розпилу кут випередження впорскування потребує коригування; раціональний кут випередження впорскування палива, який лежить у межах від -7° до -2° від заводських налаштувань, дозволяє підвищити ефективну потужність двигуна на 4,1–5,5 %. Визначено і раціональний діапазон додавання водневої домішки, що становить 0,05–0,15 % за масою. Загалом, визнано ефективність застосування малих домішок водню на сучасних судових двигунах [4].

У дослідженні Університету Малайзії (за участі Індонезійського інституту природничих наук) вивчали характеристики згорання дизельно-водневого двопаливного (газодизельного) двигуна в режимах низьких навантажень. Оскільки водень неможливо безпосередньо використовувати в дизельному двигуні через значно вищу температуру самозаймання водню, ніж у дизельного палива, було застосовано збагачення паливоповітряної суміші воднем.

Для досліджень характеристик згорання газодизеля одноциліндровий експериментальний дизель з безпосереднім впорскуванням був конвертований для використання добавок водню. Водень подавали у впускний колектор через змішувач перед входом у камеру згорання. Двигун працював за постійної частоти обертання 2000 хв^{-1} і навантаження 10 Нм. Водень вводили з рівнями подачі 21,4, 36,2 та 49,6 л/хв. Було

досліджено питоме споживання енергії, індикаторний коефіцієнт корисної дії і тиск у циліндрі. Під час додавання водню навантаження двигуна та частоту обертання підтримували сталими шляхом зменшення подачі дизельного палива. У результаті частину дизельного палива заміщували добавкою водню.

Результати досліджень та відповідні розрахунки показали, що за малих навантажень заміщення воднем дизельного палива зменшує піковий тиск у циліндрі та ефективність роботи двигуна. Загалом хід реакції уповільнюється через зменшення швидкості згорання. Заміщенням дизельного палива подачею водню 21,4; 36,2 та 49,6 л/хв під час досліджень було досягнуто зниження споживання дизельного палива на 50, 90 і 97 %.

Проте, ці відносно великі добавки водню негативно впливають на питоме споживання енергії та ефективність роботи двигуна. Збільшення подачі водню під час роботи з малими навантаженнями призводить до зростання питомого енергоспоживання. Це означає, що для отримання однакової вихідної потужності потрібно більше палива. Збільшення подачі водню відповідно зменшує частку дизельного палива. Низька частка дизельного палива може виявитися недостатньою для ефективного згорання, для запалювання воднево-повітряної суміші та призводить до більш пізнього початку згорання [5].

В Університеті Бухаресту досліджували використання водню в автомобільному дизелі з турбонаддувом К9К. Експерименти проводили за частоти обертання 2000 хв^{-1} з різним рівнем навантаження двигуна: 40 %, 55 %, 70 % і 85 %; контролювали декілька показників для оцінки впливу добавок водню на питоме споживання енергії, паливну економічність, максимальний тиск і характеристики тепловіддачі.

Було встановлено, що за навантаження двигуна 55 % завдяки додаванню водню збільшився коефіцієнт корисної дії на 5,3 %, забезпечуючи економію дизельного палива на рівні 1,32 кг/год. Інтенсивність зростання пікового тиску і максимальний тиск почали підвищуватися внаслідок збільшення кількості палива, яке згоряло у фазі попереднього змішування, все ще

залишаючись у надійних експлуатаційних межах. Застосування водню забезпечило зменшення викидів CO₂, CH₄, NO_x та димності у порівнянні з класичним живленням [6].

В Індійському інституті технологій (м. Нью-Делі) проведені дослідження, спрямовані на реалізацію одного зі способів адаптації дизеля для роботи на водні як моторному паливі – конвертування його у водневий двигун з іскровим запалюванням [7].

В іншій індійській науковій установі – Національному інституті технології (Агартала) було проведено дослідження «Аналіз процесу згоряння та показників роботи при безпосередньому впорскуванні водню з використанням дизельного палива як джерела запалювання за фіксованого моменту впорскування і різної тривалості впорскування».

У цій експериментальній роботі у впускний колектор одноциліндрового дизеля (невеликої потужності) з безпосереднім впорскуванням дизельного палива впорскували водень через форсунку із застосуванням технології ТМІ (Time Manifold Injection) — впорскування у впускний колектор з керуванням моментом впорскування. Двигун працював в режимі повного навантаження за номінальної частоти обертання 1500 хв⁻¹, а подачу водню змінювали покроково, щоб отримати різні співвідношення енергії. За допомогою електронного блоку управління (ECU) під час кожного впорскування кількість впорскуваного газу змінювали, щоб оцінити вплив кількості введеного водню за цикл роботи на двох паливах (дизельному і водні). Моменти впорскування газу не були обрані довільно, було приділено велику увагу створенню гомогенної суміші для свіжого заряду під час впорскування. Були обрані моменти впорскування водню 10, 50 і 80 градусів після ВМТ.

Максимальний тиск впорскування за 10 градусів після ВМТ досяг 62,73 бар за максимального навантаження і тривалості впорскування 9000 мікросекунд. Отже, стратегія впорскування за 10 градусів після ВМТ забезпечувала максимальну можливість утворення однорідного заряду, що приводило до більш повного згоряння та, як наслідок, більшого зростання тиску, порівняно з іншими методиками впорскування [8].

Також індійські науковці (з двох університетів в м. Хайдарабад) виконали

роботу «Експериментальні дослідження воднево-дизельного двопаливного двигуна за різних ступенів стиснення». Двигуном, використаним у цьому дослідженні, був одноциліндровий газодизель з безпосереднім впорскуванням Kirloskar AV-1 з водяним охолодженням. Дизельне паливо впорскувалось через форсунку з каліброваним отвором 0,15 мм; одночасно через форсунку для стисненого природного газу впорскувався водень безпосередньо в циліндр. Двигун був модифікований, і створено можливість змінювати ступінь стиснення від 14,5 до 24,5. Для забезпечення параметрів горіння було використано спеціальне програмне забезпечення. Частоту обертання двигуна підтримували постійною (1400 хв⁻¹) шляхом регулювання подачі водню. Експерименти повторювали, змінюючи ступінь стиснення: 16,35, 18,35, 20,22 і 24,5. Щоб вивчити вплив температури на вході на утворення оксидів азоту, температуру повітря на вході плавно змінювали, щоб уникнути ризику попереднього загоряння водню у впускному колекторі для одного коефіцієнту стиснення 24,5.

У результаті досліджень зроблено такі висновки:

- теплова ефективність зростає зі збільшенням частки водню, і є максимальною за 100 % водню. Для всіх ступенів стиснення встановлено, що спочатку – за низької частки водню та малої потужності її значення є меншим;

- застосування водню як палива дає кращі результати за високих ступенів стиснення;

- викиди вуглеводнів різко зменшуються зі збільшенням заміщення воднем і стають практично нульовими за 100 % водню;

- викиди оксиду вуглецю безперервно зменшуються зі збільшенням заміщення воднем для всіх ступенів стиснення за 100 % навантаження;

- зі збільшенням частки водню рівень оксидів азоту також зростає. Встановлено, що він є вищим за більшого ступеня стиснення та вмісту водню;

- утворення твердих частинок різко зменшується зі збільшенням частки водню;

- для меншої частки водню та більшої – дизельного палива зростання тиску зменшується зі зменшенням навантажень;

- швидкість виділення тепла зростає зі збільшенням кількості водню за високих потужностей;

- пікові тиски для всіх ступенів стиснення були отримані за максимальних заміщень воднем та високих потужностей;

- підвищена температура на вході призводить до збільшення утворення оксидів азоту та прискорення швидкості горіння. Спостерігається різке збільшення оксидів азоту з 400 до 900 ppm, коли температура підвищується з 65 °C до 85 °C [9].

Цікавим є винахід Дональда Овенса з Каліфорнії (США), підтверджений патентом № US9574492B2, яким запропоновано портативну систему додаткової подачі водню та метод зниження викидів твердих частинок й інших шкідливих речовин дизельними двигунами в режимах холостого ходу, коли двигуни працюють в неоптимальних режимах.

За класифікацією цю розробку віднесли до пристроїв для генерації водню. Проте суть винаходу є ширшою, адже стосується системи живлення (воднем) та способу підвищення ефективності горіння в камері згорання дизельних (та інших) двигунів, а також зниження викидів твердих частинок та інших шкідливих речовин у режимах ялового (холостого) ходу. Досить тривалий час роботи на холостому ході (наприклад, для забезпечення комфортних умов для водія та пасажирів, роботи допоміжного обладнання тощо) характерний для двигунів важких вантажівок, що здійснюють дальні перевезення, міжміських автобусів, а на залізниці – тепловозів. Порівняно тривалий режим роботи двигуна на яловому ході властивий і для транспортних засобів, що експлуатуються в умовах міського дорожнього руху.

Отже, зазначена розробка – це портативна система, що дозволяє методом електролізу генерувати в потрібній кількості (в певний момент) газоподібний водень, контролювати та регулювати його подачу у впускний тракт двигуна внутрішнього згорання, тим самим забезпечуючи більш повне згорання палива в камері згорання. Водень і кисень генерують електролізером за низьких температур і тиску з демінералізованої води. Водень і кисень подають окремими трактами, отже гази залишаються розділеними. Водень направляють у впускну систему двигуна, тоді як кисень відводять в атмосферу.

Окрім дизельного палива, нова система була випробувана для таких вуглеводневих видів палива, як метилциклогексан, толуол, декалін, пропан і гас. Для кожного палива вимірювали дані швидкості полум'я за різних умов.

Результати показали значне збільшення швидкості ламінарного полум'я з додаванням водню. У деяких випадках результати були майже лінійними. Очевидно, що точний характер згорання з використанням водню залежить від летючості палива. Додавання водню, за деяких умов, збільшувало швидкість згорання вуглеводневого палива більш ніж удвічі. Збільшення швидкості полум'я для багатьох палив поширюється на нормальний та підвищений тиск. Завдяки цьому збільшенню швидкості полум'я можна підвищити ефективність згорання та знизити викиди твердих частинок.

Система може живитися від автомобільного генератора, автономної батареї, тепла відпрацьованих газів або сонячної енергії. Система використовує датчик двигуна або інтерфейс бортової діагностики (OBD), під'єднаний до OBD-терміналу автомобіля чи іншого електронного контролера, щоб регулювати живлення системи та відстежувати частоту обертання двигуна і роботу системи додаткової подачі водню, що миттєво генерує потрібну кількість водню і подає в двигун за певної частоти обертання двигуна, визначеної OBD-терміналом автомобіля. Отже, виробництво водню для двигуна контролюється і регулюється як у режимі валового ходу, так і в інших режимах роботи. Водень, що виробляється, відразу використовується двигуном. Водень не зберігають ані в транспортному засобі, ані навколо нього [10].

Японські дослідники з Університету Ямагучі та компанії Honda виконали дослідження «Вплив додавання водню до впускного повітря на згорання та екологічні характеристики дизельного двигуна». У роботі застосували одноциліндровий дизель з охолоджуваною системою рециркуляції відпрацьованих газів (EGR). Дизельне паливо впорскували безпосередньо в камеру згорання за допомогою системи Common Rail. Відпрацьовані гази подавали в охолоджувач EGR, а потім – до впускного колектора.

Загалом, експериментально досліджені робочі показники та екологічні характеристики дизеля з додаванням водню до впускного повітря за пізніх моментів упорскування

дизельного палива. Момент упорскування дизельного палива та частку водню у впускній суміші змінювали, тоді як теплову енергію, яка вироблялась за рахунок дизельного палива та водню за секунду, підтримували сталою на певному рівні.

Викиди оксидів азоту за частки водню 8-10 об. % були меншими, ніж без водню, за середніх і високих навантажень, оскільки момент упорскування дизельного палива було відтерміновано до такту розширення. Отже, викиди оксидів азоту досягли мінімуму за певної частки водню в суміші. Максимальна швидкість наростання тиску в циліндрі також досягла мінімуму за частки водню 10 об. %. Однак, бажано встановлювати максимальну швидкість наростання тиску в циліндрі менше ніж 0,5 МПа/град., щоб забезпечити низький рівень шуму згоряння, як і викидів оксидів азоту. Саме в разі впорскування дизельного палива при 4-6 градусах після ВМТ і 10 об. % водню максимальна швидкість наростання тиску в циліндрі була нижчою за обрану допустиму межу – 0,5 МПа/град.

Поєднання додавання водню з пізнім моментом упорскуванням дизельного палива сприяло згорянню за низьких температур, за якого викиди оксидів азоту зменшувалися без збільшення частки незгорілого палива. Для подальшого зменшення викидів оксидів азоту і димності випробувано різні ступені рециркуляції відпрацьованих газів. Димність збільшувалась зі зростанням ступеня рециркуляції, проте додавання 3,9 об. % водню у впускне повітря зменшувало димність більш ніж на 50 %. Ефект зменшення димності від додавання водню був більшим за вищий ступінь рециркуляції та пізніший момент впорскування дизельного палива. Як результат, у разі впорскування дизельного палива за 2 градуси до ВМТ із часткою водню 3,9 об. % димність становила 0 %, викиди оксидів азоту були низькими, циклові коливання – незначними, а максимальний тиск у циліндрі був прийнятним за майже стехіометричних умов без зниження теплової ефективності [11].

Фахівці ДП «ДержавтотрансНДІпроект» у тезах доповіді [12] запропонували провести дослідження впливу добавок водню на робочі показники та екологічні характеристики газодизельних двигунів, які працюють на стисненому природному газі із запальною

дозою дизельного палива. При цьому було б доцільно вивчити досвід демонстраційних проєктів, виконаних у США з використанням сумішей стисненого природного газу з воднем, відомих під комерційною назвою Hythane® (HCNG; 10–30 об. % водню, що відповідає приблизно 1,3–4,8 мас. %).

Практична реалізація викладених результатів досліджень і розробок, започаткування та поширення застосування добавок водню для дизелів, передусім у сфері автомобільного транспорту, стануть можливими за умови створення в Україні мережі водневих заправних станцій, що передбачено проєктом Водневої стратегії України [13], а також розроблення і впровадження безпечного газобалонного обладнання для зберігання водню на борту транспортного засобу і додаткової паливної апаратури для подачі добавок водню у двигун.

Висновки

Наведені у статті результати експериментальних досліджень підтверджують перспективність застосування добавок водню та водневмісних газів у двигунах із запалюванням від стиснення для часткового заміщення дизельного палива, а також обґрунтовують доцільність досліджень використання сумішей стисненого природного газу та водню для газодизельних двигунів.

Обґрунтоване результатами досліджень належне врахування суттєвих відмінностей фізико-хімічних властивостей водню та дизельного палива під час переобладнання дизелів і їх адаптації до застосування добавок водню здатне поліпшити робочі показники та екологічні характеристики базових дизелів, зокрема транспортних.

References

1. Karim, G. A., Klat, S. R. (1976). Hydrogen as a fuel in compression ignition engines. *Mechanical Engineering*, 98, 34–39.
2. Levterov, A. M., Bgantsev, V. M. (2019). Motor study of the impact of hydrogen microadditives on the toxicity indicators of a small-volume diesel. *Internal combustion engines*, (1), 46–49.
3. Hovorun, A. H., Korpach, A. O., Filonenko, O. D. (2016). The impact of adding hydrogen-containing gas on diesel performance under the loading mode. *Herald of KhNADU*, (74), 45–48.

4. Shalapko, D. O. (2019). Increasing the efficiency of ship engines of internal combustion by means of using small hydrogen additives to the main fuel. [Thesis of a dissertation on obtaining a scientific degree of a candidate of technical sciences]. Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

5. Santoso, W. B., Bakar, R. A., Nur, A. (2013). Combustion characteristics of diesel-hydrogen dual-fuel engine at low load. *Energy Procedia*, 32, 3–10.

6. Cernat, A., Pana, C., Negurescu, N., Lazaroiu, G., Nutu, C., Fuiiorescu, D. (2020). Hydrogen—An alternative fuel for automotive diesel engines used in transportation. *Sustainability*, 12(22), 9321.

7. Unni, J. K., Bhatia, D., Dutta, V., Das, L. M., Jilakara, S., Subash, G. P. (2017). Development of hydrogen fuelled low NO_x engine with exhaust gas recirculation and exhaust after treatment. *SAE International Journal of Engines*, 10(1), 46–54.

8. Bose, P. K., Banerjee, R., Deb, M. (2011). Combustion and performance analysis of hydrogen direct injection with diesel as an ignition source at a particular injection timing with varying injection durations. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 5(2), 227–234.

9. Masood, M., Mehdi, S. N., Reddy, P. R. (2007). Experimental investigations on a hydrogen–diesel dual-fuel engine at different compression ratios. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129(2), 572–578.

10. Owens, D. W. (2017). Portable hydrogen supplemental system and method for lowering particulate matter and other emissions in diesel engines at idle (U.S. Patent No. US9574492B2). United States Patent and Trademark Office.

11. Miyamoto, T., Hasegawa, H., Mikami, M., Kojima, N., Kabashima, H., Urata, Y. (2011). Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13138–13149.

12. Holyk, A. V., Zakrevsky, O. I., Nazarenko, M. B. (2022). Prospects for the use of hydrogen in diesel engines operating on the gas-diesel cycle. In the book: Prospects for the development of road transport and infrastructure: Collection of theses of the All-Ukrainian scientific and practical conference (pp. 287–289). State Enterprise “State Road Transport Research Institute”.

13. Skosar, V. Yu., Voroshylov, O. S. (2022). Some elements of the H₂ strategy. In: Prospects for the development of automotive transport and infrastructure: a collection of papers of the International scientific and practical conference (December 14–16, 2022) (pp. 162–165). State Enterprise “State Road Transport Research Institute”.

© В. П. Сахно, докт. техн. наук, професор,
зав. кафедри автомобілів,
ORCID: 0000-0002-5144-7131,
e-mail: svp_40@ukr.net;

© О. О. Разбойніков, канд. техн. наук,
доцент кафедри, ORCID: 0000-0003-3024-0999,
e-mail: razboyn1k@ukr.net

(Національний транспортний університет);

© О. В. Бугрик, канд. техн. наук,
науковий співробітник,
ORCID: 0000-0003-4581-3294,
e-mail: bugrikalex@gmail.com

© В. М. Трохимченко, заст. зав. відділу,
аспірант, ORCID: 0000-0002-8276-8675,
e-mail: vtrohymchenko@insat.org.ua
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Volodymyr Sakhno, Doctor of Technical Sciences,
Professor, Head of the Automobile Department,
ORCID: 0000-0002-5144-7131, e-mail: svp_40@ukr.net;

© Oleksandr Razboynikov, Ph.D.,
Associate Professor of Department of Automobiles,
ORCID: 0000-0003-3024-0999,
e-mail: razboyn1k@ukr.net

(National Transport University);

© Oleksii Bugryk, Ph.D., Researcher,
ORCID: 0000-0003-4581-3294,
e-mail: bugrikalex@gmail.com;

© Volodymyr Trokhymchenko, Deputy Head
of the Department, Postgraduate Student
ORCID: 0000-0002-8276-8675,
e-mail: vtrohymchenko@insat.org.ua
(SE «State Road Transport Research Institute»)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШТУЧНИХ ДОРОЖНІХ НЕРІВНОСТЕЙ НА ЗМІНУ ВЕРТИКАЛЬНИХ РЕАКЦІЙ У КОНТАКТІ ШИН ІЗ ДОРОГОЮ

RESEARCH ON THE IMPACT OF SPEED HUMPS ON THE VARIATION OF VERTICAL REACTIONS IN TIRE-ROAD CONTACT

Анотація. Розглянуто види та типи дорожніх нерівностей, здійснено вибір та опис параметрів обраних для проведення досліджень. Розроблено вимірювальний комплекс, який дозволяє фіксувати необхідні під час дослідження параметри. Проведено теоретичне та експериментальне дослідження впливу штучних дорожніх нерівностей на вертикальні коливання підресорених та невідресорених мас автомобіля. Здійснено порівняльний аналіз. Підтверджено адекватність математичної моделі, на якій отримано теоретичні залежності вертикальних коливань підресорених та невідресорених мас автомобіля під час долаття штучної дорожньої нерівності на швидкості 45 км/год (12,5 м/с). За результатами розрахунків, проведених на розробленій математичній моделі, отримано теоретичні відомості щодо зміни вертикальних реакцій у контакті шин коліс осей автомобіля з дорогою під час долаття штучної дорожньої нерівності на швидкості 45 км/год (12,5 м/с).

Ключові слова: автомобіль, штучні дорожні нерівності, вимірювальний комплекс, теоретичне та експериментальне дослідження, паливна економічність, забруднення навколишнього природного середовища, реакції в контакті шин з дорогою.

Abstract. The types and kinds of road irregularities are considered, and the parameters of the selected road irregularities for the research were chosen and described. To conduct experimental research, a measuring complex was developed that allows recording the parameters necessary during the research. Theoretical and experimental investigations were conducted on the impact of artificial road irregularities on the vertical oscillations of sprung and unsprung masses of the vehicle. A comparative analysis of the conducted studies was performed. The adequacy of the mathematical model, on which theoretical dependencies of the vertical oscillations of sprung and unsprung masses of the vehicle were obtained during the passage of an artificial road irregularity at a speed of 45 km/h (12.5 m/s), was confirmed. Based on the calculations performed using the developed mathematical model, theoretical data was obtained regarding the change in vertical reactions at the contact between the wheel tires of the vehicle's axles and the road when crossing an artificial road irregularity at a speed of 45 km/h (12.5 m/s). Research was conducted on the change in fuel consumption of automobile when overcoming selected types of road irregularities. The obtained data indicate that fuel consumption varies within very wide limits depending on driving conditions. Further analysis of the obtained fuel consumption results will make it possible to estimate the amount of pollutant emissions into the environment and to estimate the economic losses caused by each type of road irregularities.

Keywords: automobile, road irregularities, measuring complex, theoretical and experimental research, the vertical oscillations of sprung and unsprung masses, fuel consumption, environmental pollution, reactions in contact of tires with the road.

Вступ

Рух автотранспортних засобів дорогами загального призначення завжди пов'язаний з долаттям різних дорожніх нерівностей. Такі нерівності поділяють на два види: випадкові

(ямковість, колійність і напливи) та штучні (засоби заспокоєння дорожнього руху). Здійснивши попередній аналіз видів дорожніх нерівностей для визначення та врахування їхніх параметрів під час проведення

Класифікація засобів ЗДР*

Група, відповідно до застосованого заходу ЗДР	Назва засобу
Влаштування перешкоди на проїзній частині	Дорожні пагорби
	Підвищені пішохідні переходи
	Підвищені перехрестя
Зміна траєкторії руху	Шикани
	Міні-кільця
	Каналізування потоків
	Перекривання перехрестя
Зміна ширини проїзної частини	Чокери
	Вставки по осі дороги
*Примітка. Наведений перелік не є вичерпним	

теоретичних та експериментальних досліджень було вирішено обрати штучні дорожні нерівності, оскільки вони більш стандартизовані в порівнянні з випадковими.

Класифікація на групи та параметри засобів заспокоєння дорожнього руху (далі – засобів ЗДР) визначені в чинному стандарті ДСТУ 4123:2020 «Безпека дорожнього руху. Засоби заспокоєння руху. Загальні технічні вимоги» (табл. 1) [1]. Проте станом на сьогодні ще доволі часто на дорогах загального призначення зустрічаються штучні дорожні нерівності визначені попереднім стандартом ДСТУ 4123:2006 «Пристрій примусового зниження швидкості дорожньо-транспортної техніки на вулицях і дорогах» [2]. Тому було вирішено провести дослідження з врахуванням параметрів штучних дорожніх нерівностей визначених за обома стандартами.

Основна частина

Вибір відрізка дороги, де наявні штучні дорожні нерівності визначені за обома стандартами, описаний в попередній статті [3]. Нині використаємо лише визначені геометричні параметри нерівностей, які будуть внесені до математичної моделі та які долатиме автомобіль

під час експериментальних досліджень (табл. 2).

Під час експерименту на досліджуваній автомобіль було встановлено вимірювальний комплекс, який складався з:

1) об'ємного витратоміра палива ONO SOKKI DF-311 із датчиком ONO SOKKI FP-214 (рис. 1, 4), країна виробник – Японія, Ono Sokki Co, Ltd. Діапазон вимірювань паливного витратоміра складає від 0,3 до 120 л/год $\pm 0,5\%$ від вимірюваного значення [4, 5].

2) дистанційного вимірювача швидкості та пройденого шляху Radarex 4041-PPL із реєструючим пристроєм РП-001 (рис. 2, 4). Такий пристрій було виготовлено у Франції та доопрацьовано в лабораторії ДП «ДержавтотрансНДІпроект». Основні технічні характеристики Radarex 4041-PPL із реєструючим пристроєм РП-001 наведені в табл. 3 [3, 5]. Зазначений дистанційний вимірювач швидкості дозволяє фіксувати в режимі реального часу:

- шлях автомобіля під час дорожнього випробування;
- швидкість автомобіля на дорозі;
- час дорожнього випробування.

Таблиця 2

Геометричні параметри штучних дорожніх нерівностей

Тип	Назва дорожньої нерівності	Довжина, м	Висота, м
I	Підвищений пішохідний перехід	8,20	0,14
II	«Лежачий поліцейський»	0,66	0,04



Рис. 1. Встановлений витратомір палива

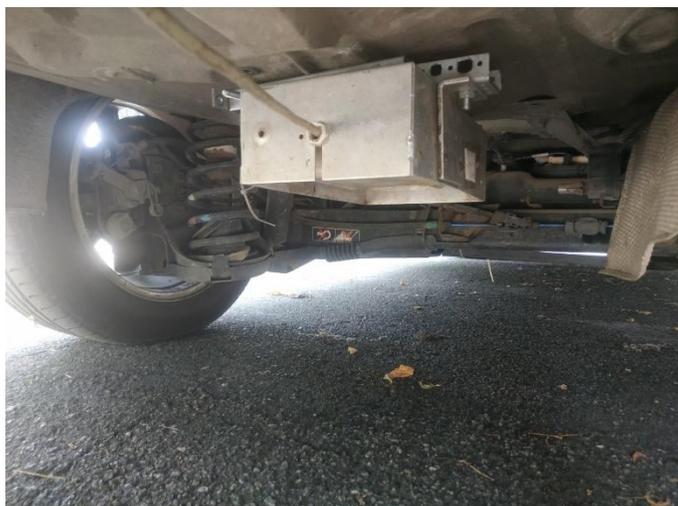


Рис. 2. Встановлений пристрій Radarex 4041-PPL із реєструючим пристроєм РП-001

3) обладнання для визначення прискорень і переміщень, які виникають у підвісці автомобіля під час долаття дорожніх нерівностей (**рис. 3, 4**). До складу такого обладнання входить датчик MPU6050, який є модулем, що складається з 3-осьового гіроскопа, 3-осьового акселерометра та температурного сенсора в одному корпусі та мікроконтролер Arduino [6].

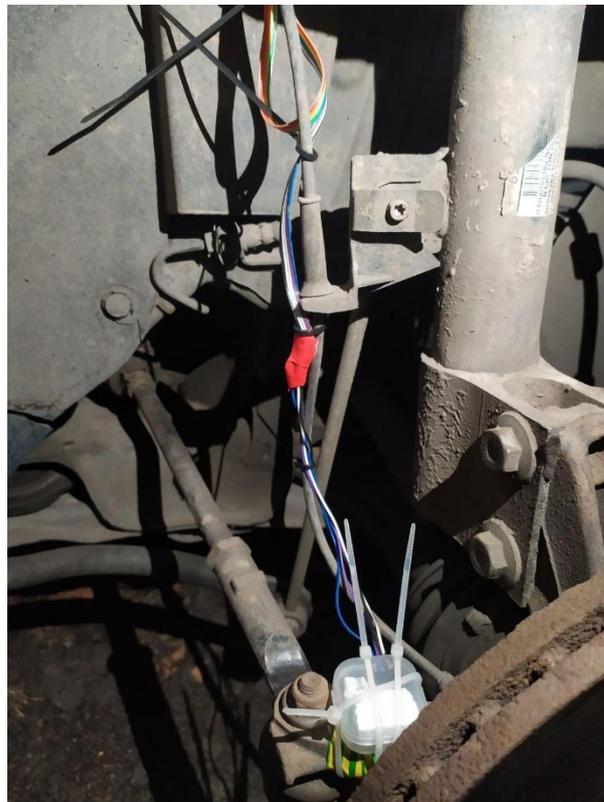


Рис. 3. Датчики MPU6050 встановлені на підресорену та не підресорену масу автомобіля

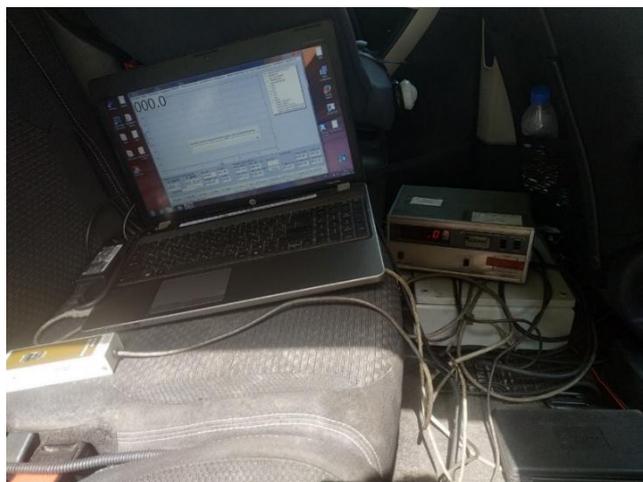


Рис. 4. Частина вимірювального комплексу, що розташована на борту автомобіля

Таблиця 3

Основні технічні характеристики Radarex 4041-PPL з РП-001

Назва випробувального устаткування	Назва параметру, що визначається	Основні технічні характеристики
Radarex 4041-PPL з реєструючим пристроєм РП-001	шлях автомобіля під час дорожнього випробування	(0,1...9999999)м ± 0,3 % U= 5,99*10 ⁴ с
	швидкість автомобіля на дорозі	(0...138) км/год ± 0,3 % U= 0,78 км/год
	час дорожнього випробування	(0,1...99999) с ± 0,01 с U=19,9 с

Використовуючи розроблений вимірювальний комплекс, було проведено експериментальне дослідження. У результаті проведених експериментальних досліджень із застосуванням зазначеного вимірювального комплексу були отримані дані щодо витрати палива, швидкості руху та переміщень, які відбуваються в підвісці автомобіля під час долаття ним штучних дорожніх нерівностей типу I та типу II.

Проведені дослідження умовно можна розділити на кілька етапів.

Етап 1. Долання штучної дорожньої нерівності типу I без зупинки автомобіля.

Етап 2. Долання штучної дорожньої нерівності типу I із повною зупинкою автомобіля.

Етап 3. Долання штучної дорожньої нерівності типу II без зупинки автомобіля.

Етап 4. Долання штучної дорожньої нерівності типу II із повною зупинкою автомобіля.

Під час проведення експериментальних досліджень легкового автомобіля, на етапі 1, значних змін витрати палива не було зафіксовано, тому графічного зображення щодо витрати палива під час долаття нерівності типу I не наведено.

На **рис. 5** зображено інформацію щодо витрати палива у разі руху автомобіля із заданою швидкістю (45 км/год) з подальшою повною зупинкою перед нерівностями типу I і типу II. Після зупинки було здійснено долаття зазначених нерівностей із подальшим рухом до заданої швидкості (45 км/год).

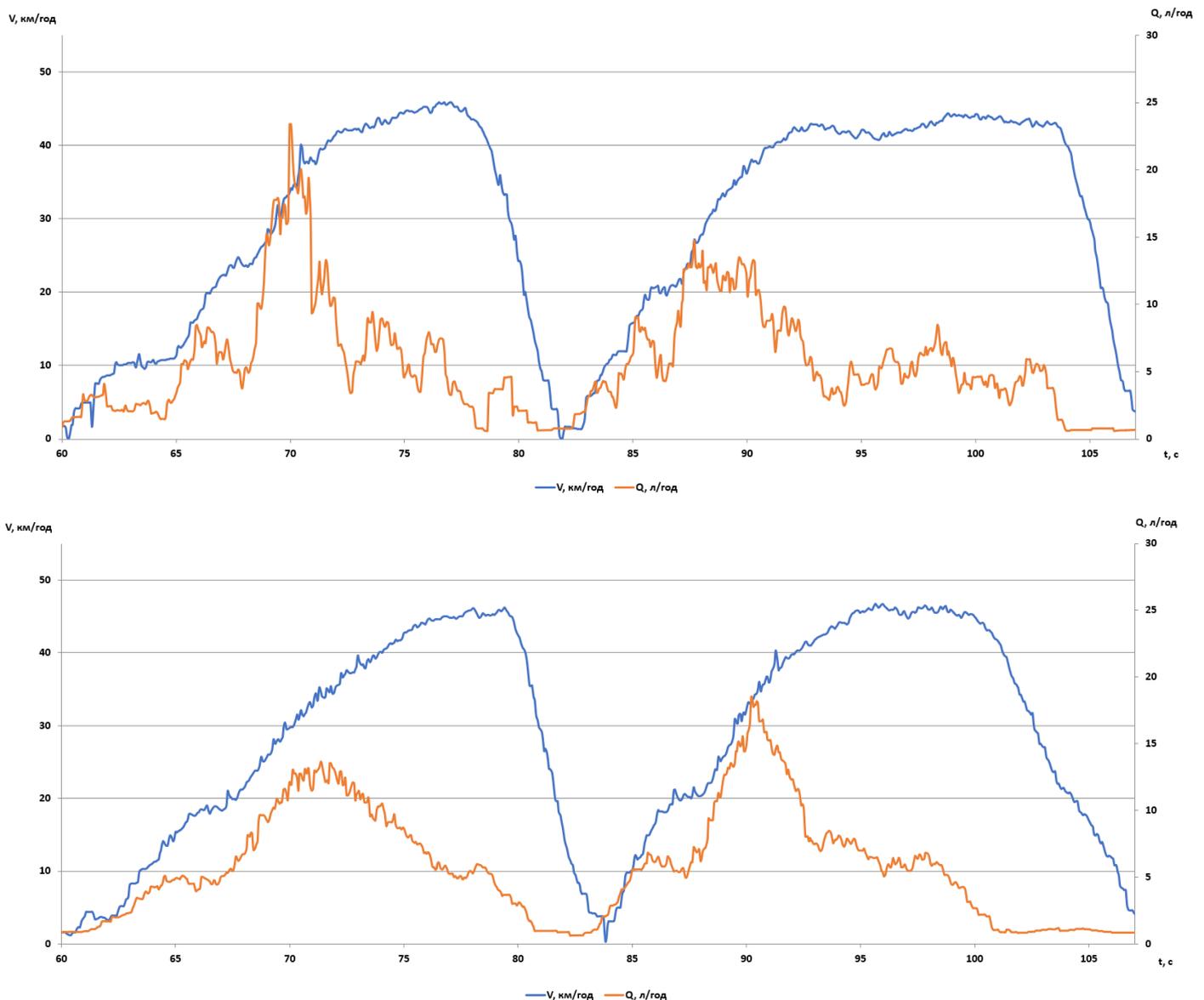


Рис. 5. Приклад (фрагмент) запису даних швидкості (V , км/год) та витрати палива (Q , л/год) під час долаття штучних дорожніх нерівностей типу I і типу II із зупинкою та подальшим рухом

Аналіз отриманих даних (**рис. 5**) свідчить, що витрата палива змінюється в дуже широких межах залежно від умов руху (наявності зупинок під час руху, обраного швидкісного режиму тощо). Збільшення витрати палива фіксуються в діапазоні, під час якого автомобіль долав нерівності та продовжував подальший рух після зупинки, що своєю чергою свідчить про збільшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище.

Проведений порівняльний аналіз витрати палива при доланні нерівностей типу I і типу II із зупинкою та подальшим рухом свідчить, що під час додання нерівності типу II витрата палива збільшилась майже на 4 % у порівнянні з витратою палива при доданні нерівності типу I.

На **рис. 6** відображено результати теоретичних та експериментальних досліджень, щодо зміни вертикального положення підресорених S_z та непідресорених U_z мас автомобіля під час додання штучної дорожньої нерівності типу II передніми (з нижнім індексом «1») та задніми (з нижнім індексом «2») колесами автомобіля на швидкості 45 км/год (12,5 м/с).

Аналіз отриманих результатів (**рис. 6**) свідчить про високий рівень співпадіння теоретичних та експериментальних відомостей, щодо характеру вертикальних коливань підресорених S_z та непідресорених U_z мас автомобіля під час додання штучної дорожньої нерівності на швидкості 45 км/год. Зазначене свідчить про адекватність використаної математичної

моделі [7] та достовірність отриманих на ній теоретичних відомостей.

Варто підкреслити, що причиною вертикальних коливань підресорених і непідресорених мас автомобіля в зазначених умовах є зміна вертикальних реакцій, що діють в контактні його шин із дорогою. Тож отримані на математичній моделі теоретичні відомості щодо зміни вертикальних реакцій між шинами та дорогою є також достовірними (**рис. 7**). Такий підхід використано зокрема в роботі [7].

На **рис. 7** відображено результати теоретичних досліджень щодо зміни вертикальних реакцій R_z у контактні шин автомобіля з дорогою під час додання штучної дорожньої нерівності типу II передніми (з нижнім індексом «1») і задніми (з нижнім індексом «2») колесами автомобіля на швидкості 45 км/год.

Для зручності аналізу отриманих результатів на **рис. 6** і **7** наведено вертикальні прямі «п», «в» та «к», що позначають момент додання переднім (з нижнім індексом «1») та заднім (з нижнім індексом «2») колесом автомобіля початку нерівності (п), її вершини (в) та кінця (к).

Видно, що до початку додання штучної дорожньої нерівності колесами передньої осі (вертикаль «п1»), як вертикальне положення підресорених та непідресорених мас автомобіля (**рис. 6**), так і вертикальні реакції дороги на його колеса (**рис. 7**) постійні і відповідають своїм статичним значенням.

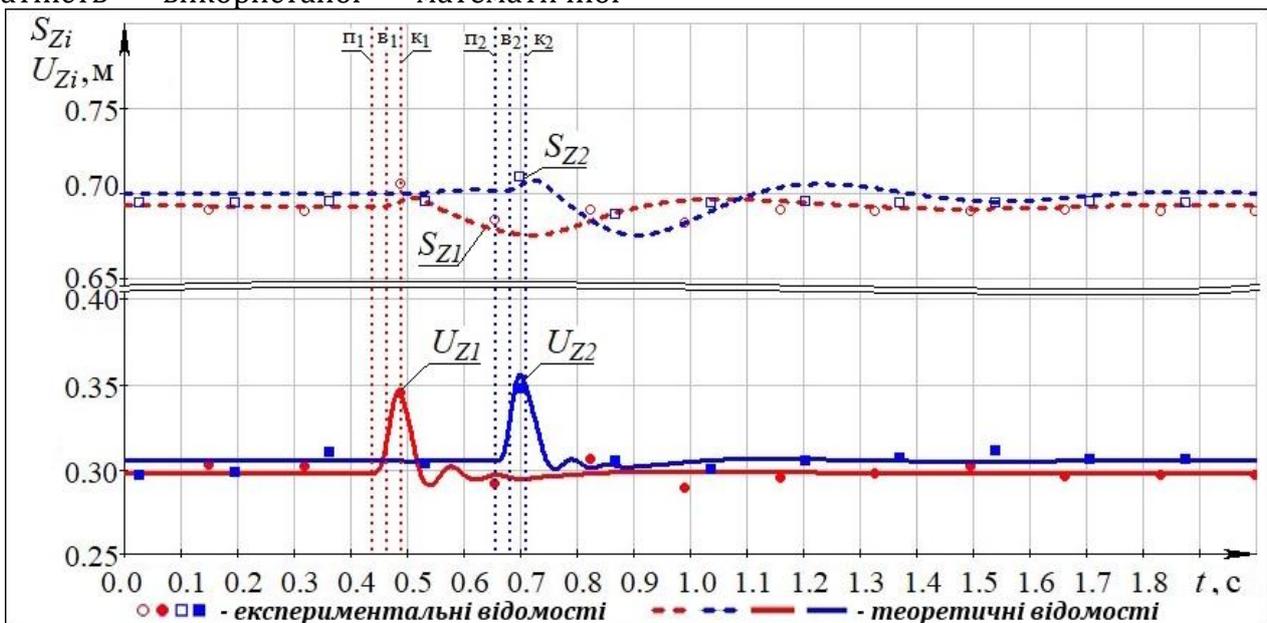


Рис. 6. Залежності зміни поточного вертикального положення приведених до передніх і задніх коліс автомобіля підресорених мас S_{z1} та S_{z2} , а також непідресорених U_{z1} та U_{z2} мас автомобіля, що долає штучну дорожню нерівність типу II на швидкості 45 км/год, від часу t

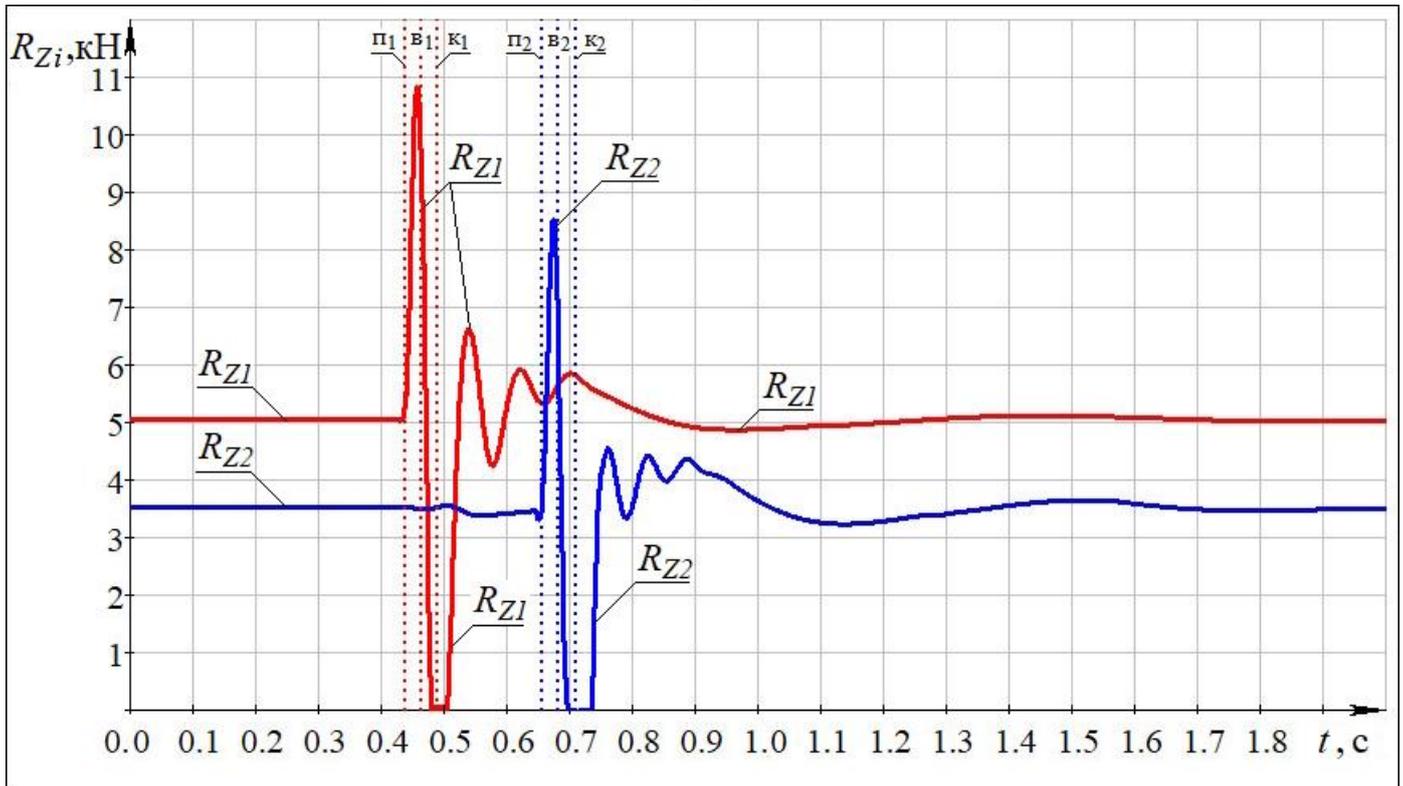


Рис. 7. Залежності зміни вертикальних реакцій дороги на шини передніх R_{Z1} і задніх R_{Z2} коліс автомобіля, що долає штучну дорожню нерівність типу II на швидкості 45 км/год, від часу t

Після початку долаття передніми колесами автомобіля штучної дорожньої нерівності (вертикаль «п1») (рис. 7) спостерігається стрімке збільшення вертикальної реакції дороги на шину переднього колеса R_{Z1} , яке досягає свого максимального значення (10,8 кН) в області вершини нерівності (вертикаль «в1»). Вертикальна реакція на шину заднього колеса R_{Z1} збільшується до 8,5 кН в області вершини нерівності (вертикаль «в2») (рис. 7). В області долаття кінця нерівності (вертикаль «в») (рис. 7) спостерігається зменшення вертикальних реакцій дороги R_z до нуля (відрив колеса від опорної поверхні), як на шини передніх, так і задніх коліс автомобіля. Зазначене пояснює зміну вертикального положення підресорених S_z і непідресорених U_z мас автомобіля (рис. 6), а також зміну витрати палива (рис. 5) під час долаття штучної дорожньої нерівності.

Висновки

Проведено дослідження щодо витрати палива автомобілем під час долаття штучних дорожніх нерівностей типу I і типу II. Отримані дані дозволяють зробити попередню оцінку впливу штучних дорожніх нерівностей на забруднення навколишнього природного середовища під час їхнього долаття залежно від

обраного швидкісного режиму та наявності зупинок під час руху.

Проведено теоретичне та експериментальне дослідження впливу штучних дорожніх нерівностей на вертикальні коливання підресорених та непідресорених мас автомобіля. Аналіз отриманих експериментальних результатів свідчить про адекватність математичної моделі та достовірність отриманих на ній теоретичних відомостей.

За результатами розрахунку на зазначеній математичній моделі визначено зміну вертикальних реакцій у контакті шин автомобіля з дорогою під час долаття штучної дорожньої нерівності типу II передніми та задніми колесами автомобіля на швидкості 45 км/год.

Після початку долаття колесами автомобіля штучної дорожньої нерівності спостерігається стрімке збільшення вертикальної реакції дороги на його шини. Для переднього колеса вертикальна реакція дороги на шину досягає свого максимального значення в області вершини нерівності 10,8 кН, для заднього – 8,5 кН. В області долаття кінця нерівності спостерігається зменшення вертикальних реакцій дороги до нуля (відрив колеса від опорної поверхні), як на шини передніх, так і задніх коліс автомобіля. Зазначене пояснює

зміну вертикальних координат підресорених та невідресорених мас автомобіля, а також зміну витрати палива під час долаття штучної дорожньої нерівності.

References

1. DSTU 4123:2020. (2020). Bezpeka dorozhn'oho rukhu. Zasoby zaspokoyennya rukhu. Zahal'ni tekhnichni vymohy. [Traffic safety. Means of traffic calming. General technical requirements].
2. DSTU 4123:2006. (2006). Prystryy prymusovoho znyzhennya shvydkosti dorozhn'о-transportnoyi tekhniky na vulytsyakh i dorohakh. Zahal'ni tekhnichni vymohy. [Device for forced reduction of speed of road transport equipment on streets and roads. General technical requirements].
3. Volodymyr Trokhymchenko (2022). Impact of road irregularities on the automobile, road safety and environmental pollution. Development of a measuring complex to determine such an impact. Kyiv, Naukovo-vyrobnychyy zhurnal "Avtoshlyakhovyk Ukrainy", 3, 271, 8-13, DOI: 10.33868/0365-8392-2022-3-271-8-13. Retrieved from: https://journal.insat.org.ua/?page_id=5417&lang=uk
4. Ono Sokki. FP-2000/200 Series. Positive displacement type flow detector. Instruction manual. Retrieved from: https://www.onosokki.net/pdf/fp2000_200e2.pdf
5. Volodymyr Sakhno, Mykola Nazarenko, Serhii Durytskyi, Yurii Kolinchenko, Volodymyr Trokhymchenko. (2022). Impact of road irregularities on the automobile, road safety and environmental pollution. Kyiv, SE "State Road Transport Research Institute" (SE SRTRI), Prospects for the development of road transport and infrastructure: challenges of wartime: collection of abstracts from the International Scientific-Practical Conference, 250-255. Retrieved from: https://journal.insat.org.ua/wp-content/uploads/2023/06/Thesis_Collect_-2022.pdf
6. Kharakterystyka Arduino UNO. (2022). Kharakterystyka ta zahal'ni vidomosti shchodo mikrokontrolera Arduino UNO. [Characteristics and general information about the Arduino UNO microcontroller]. Retrieved from: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>.
7. O. Slavinska, O. Razboinikov, I. Kozarchuk, A. Bubela, O. Ivanushko, A. Klochan. (2024). Study of the dynamics of truck movement across a bridge crossing. Katowice – Ojców National Park, XVI International Scientific Conference "Transport Problems", 538-550. DOI: 10.20858/tp.2024.19.4.09.

© Л. В. Крайник, докт. техн. наук, професор,
 ORCID: 0000-0002-0524-9126,
 e-mail: l.kraynyk@gmail.com
 (АТ «Укравтобуспром»)
 © Г. А. Худавердян, аспірант,
 ORCID: 0000-0001-5257-458,
 e-mail: georgiu.kh@gmail.com
 (Львівський національний університет
 природокористування)

© Lubomyr Krainyk, Doctor of Technical Sciences,
 Professor, ORCID: 0000-0002-0524-9126,
 e-mail: l.kraynyk@gmail.com
 (JSC "Ukratobusprom")
 © Heorhii Khudaverdian, Postgraduate Student,
 ORCID: 0000-0001-5257-458,
 e-mail: georgiu.kh@gmail.com
 (Lviv National Environmental University)

ФОРМУВАННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ ТРАНСМІСІЇ УНІВЕРСАЛЬНОГО КОЛІСНОГО ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

FORMATION OF THE TRANSMISSION GEAR RANGE OF A UNIVERSAL WHEEL TRACTION VEHICLE

Анотація. Опрацьовано методику визначення передавального діапазону трансмісії універсального колісного тягово-транспортного засобу – УКТТЗ (типу Unimog/Автотрак) категорій N1/T1 з умов як транспортних функцій на автодорогах, так і технологічних в умовах бездоріжжя, зокрема механічного обробітку землі. З використанням агрегатної бази важкого джипа розробки АТ «Укравтобуспром», класу Oshkosh L-ATV, опрацьовано авант-проект УКТТЗ ТУР КТ 041 з напівкапотною компоновкою кабіни на 3 особи, вантажної платформи на 1, 2 т (або забудови під технологічне обладнання) та системи причіпного/навісного обладнання. З умов максимальної уніфікації агрегатів силового приводу – двигуна, базової механічної коробки передач та головних передач опрацьовано методику розрахунку передавального числа понижуючої передачі роздавальної коробки під виконання технологічних операцій. Під найбільш енергозатратну з них – оранку плугом сільськогосподарських угідь – представлено методику розрахунку з орієнтацією на певний клас тяги на гаку (тут 1,4 т) в умовах стандартизованого агрофону для колісних тракторів. Проведено оцінку адекватності методики шляхом співставлення результатів імітаційного моделювання процесу оранки у програмному середовищі MATLAB Simulink та експериментальних даних на прикладі колісного трактора Т 150К.

Ключові слова: автомобіль, колісний трактор, бездоріжжя, асфальтобетон, вантажні перевезення, механічний обробіток землі, трансмісія, передавальний діапазон.

Abstract. The method of determining the transmission mode of the universal wheeled traction and transport vehicle – UWTTV (Unimog/Autotrak type) of category N1/T1 has been developed from the conditions of both transport functions on highways and technological functions in off-road conditions, including mechanical tillage. Using the aggregate base of a heavy jeep developed by JSC "Ukratobusprom", class Oshkosh L-ATV, the avant-project of UWTTV TUR KT 041 with a semi-hooded cabin layout for 3 people, a cargo platform for 1.2 tons (or a building for technological equipment) and a system of trailed / mounted equipment has been developed. From the conditions of maximum unification of power drive units – engine, basic mechanical gearbox and main gears, the method of calculating the gear ratio, which reduces the transfer case transmission for performing technological operations, has been developed. For the most energy-intensive of them – plowing of agricultural land with a plow – a calculation method is presented with an orientation to a certain class of traction on the hook (here 1.4 t) in the conditions of a standardized agricultural background for wheeled tractors. The adequacy of the method is assessed by comparing the results of simulation modeling of the plowing process in the MATLAB Simulink software environment and experimental data using the example of a T 150K wheeled tractor.

Keywords: car, wheeled tractor, off-road, asphalt concrete, freight transportation, mechanical tillage, transmission, transmission range.

Вступ

Розвиток малого і середнього фермерства, комунальних господарств територіальних громад і т. п. обумовлює потребу у малотоннажній повнопривідній автотехніці,

рівно ж як і у колісних тракторах класів тяги 0,6-1,4, власне виробництво яких в Україні відсутнє. У цьому плані актуальним є досвід повоєнної ФРН із появою універсальної машини MB Unimog [1], що поєднує в собі функції малої вантажівки та трактора з повним

приводом під відродження аграрного сектора та з подальшим значним розширенням сфер використання – від комунально-дорожньої до військової. Використання і власне виробництво машин такого типу – універсальних колісних тягово-транспортних засобів (УКТТЗ)/ Автотрак характерне і для Італії, Австрії, КНР, Туреччини (рис. 1). З кінця 1980-х і до початку 2000-х років виробництво було і в Чехословаччині – завод Прага. Однак внаслідок проблем збуту основного, агрегатного виробництва, припинилось (рис. 2) [2]. В часи СРСР питання УКТТЗ теж розглядалось [3], але реалій почало набувати вже у пострадянський період – поява на ХТЗ мод. 3130 [4] та в Білорусі – МТЗ ШУ356 [5]. Звично, що ці моделі базувались на уже наявних на тракторних заводах агрегатних базах, тракторних шинах і дисках з обмеженням швидкості руху до 40–45 км/год і були віддалені від базової ідеї – поєднання функцій вантажного автомобіля і колісного трактора. В рф відомо 8 проектів машин цього класу, серед них і ЗІЛ (банкрутство), але 2 проекти все-таки реалізовані у промисловому виробництві [6].

Актуальність машини такого типу – «автомобіль-трактор», скорочено «автотрак», підтверджена і в Україні [7, 8 тощо]. Реалії сьогодення і роботи АТ «Укравтобуспром» з важким військовим джипом класу Oshkosh L-ATV та ударними легкими автомобілями переднього краю «Мамай-2» обумовили можливість конвертації агрегатної бази у напівкапотну схему з вантажним кузовом на 1,2 т повною масою до 3,5 т (власне з умов доступності керування з посвідченням водія категорії В), **рис. 3** [6].

Звично, що зміна цільової сфери використання в аспекті виконання і механічного обробітку землі та робіт у дорожній і



Рис. 1. Unimog U5000 – у версії військової 4-тонної вантажівки з довгою колісною базою [1]



Рис. 2. Praga UV 80 – тут з аграрним оприскувачем [2]

комунальній сферах зумовила перегляд і внесення відповідних коректив, не тільки загальної компоновки, але і силового приводу, насамперед зміщення нижнього тягового діапазону трансмісії у зону звичних в агротехнологіях робочих швидкостей.

Основна частина

Формування діапазону передавальних чисел механічної трансмісії УКТТЗ, зрештою як і автомобіля чи трактора, базується на уже попередньо визначених характеристиках двигуна та типорозміру шин ведучих коліс. З умов

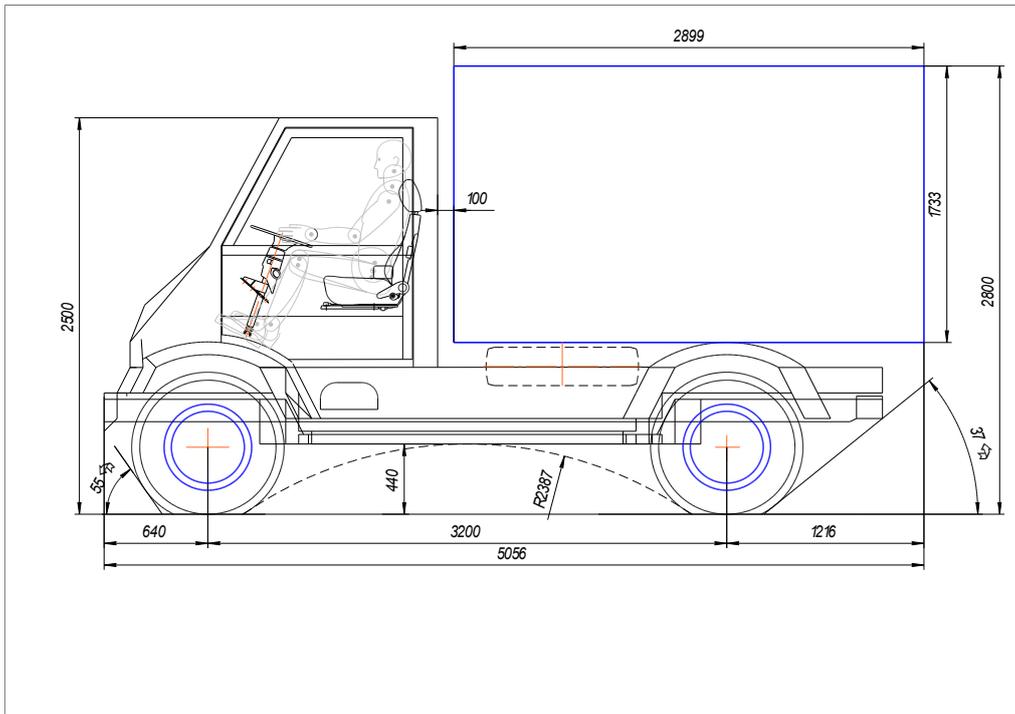


Рис. 3. Проект УКТТЗ ТУР ВТ04 «Автотрак» (у варіанті з кузовом-фургонем)

агрегатної уніфікації з базовим важким джи-пом залишено силовий агрегат – дизельний двигун з турбонаддувом і інтеркулером та робочим об’ємом 2,8-3,0 л (IVECO, Cummins, у перспективі – вітчизняний 6ДТНА проекту «Слобожанський дизель») потужністю 150–170 к. с. та 5–6 ступеневої механічної коробки передач, а також головні передачі передньої та задньої ведучих осей. Зміщення нижнього діапазону передавальних чисел трансмісії в зону агротехнічних швидкостей (7–12 км/год) з максимальним тяговим зусиллям можна реалізувати за рахунок відповідної корекції понижуючої передачі роздавальної коробки. Першорядним у процесі формування тягового приводу УКТТЗ є визначення типорозміру шин/коліс, однакового для передньої та задньої осей, радіус кочення яких та зчпні властивості протектора з опорною поверхнею є необхідними для подальшого розрахунку необхідного передавального діапазону трансмісії (базової та роздавальної коробок передач, головної передачі). Особливістю УКТТЗ є умова поєднання транспортного (автомобіль) та технологічного (трактор, обробіток землі) режимів руху, що обумовлює відхід від класичних методик підбору шин для автомобіля або тракто-

ра [26, 12]. Очевидно, задані максимальні швидкості руху на асфальтобетонних автодорогах (80–100 км/год з умов транспортного потоку) обумовлює використання автомобільних шин (тракторні, як правило, обмежені індексом допустимої швидкості 40–50 км/год).

З іншого боку, технологія обробітку землі та рух бездоріжжям обумовлюють наявність ґрунтозацепів протектора та можливість руху на знижених значеннях тиску повітря у шині (як з умов прохідності, так і агротехнологій), що обумовлює підбір власне серед шин автомобілів підвищеної прохідності типу 4x4 чи 6x6. Умови зчеплення шин з ґрунтом та реалізації значних крутних моментів, насамперед при обробітку ґрунту – оранці, зумовлюють підбір достатньо крупногабаритних шин щодо звичних для колісних транспортних засобів (КТЗ) категорії N1 з відповідно великим запасом допустимих навантажень, що є оправданим і з умов незвичних для КТЗ донавантажень, насамперед шин задньої осі, від навісного сільськогосподарського обладнання, у т.ч. і під час руху при знижених тисках повітря в шинах. Аналіз наявних конструкцій УКТТЗ повною масою від 3,2 до 7,5 т показує, що розмір-

ність дисків коліс є у діапазоні від 16 до 20” дюймів. Опрацьована в часі СРСР методика вибору шин для технологічних операцій обробітку ґрунту у вищезазначеному діапазоні повної маси трактора базується на звичній задньопривідній схемі і, відповідно, формує вимоги великого, типово тракторного типорозміру задніх ведучих шин, що є неприйнятним для нашого випадку [11]. Перехід на повнопривідну схему 4x4 з відповідним збільшенням зчпної ваги до 3,5 т з умов реалізації певного класу тяги, а також діаметра коліс схеми 4x4, що для класу тяги 1,4 уже стає близьким до типорозмірів автомобільних шин для бездоріжжя (біля 1 м, майже вдвічі менше порівняно зі звичними задньопривідними МТЗ 80 того ж класу тяги). У табл. 1 представлені базові характеристики автомобільних шин підвищеної прохідності вітчизняного виробництва, оцінка ефективності яких на технологічних операціях обро-

бітку ґрунту дозволила взяти за основу власне типорозмір R18 (ГАЗ 66, БТР 4Е), що із запасом за допустимим навантаженням (табл. 1) та індексом швидкості (К – до 110 км/год). Зрештою цей типорозмір шин є визначеним і для проекту важкого джипа. Як альтернативний варіант можливий розгляд і шин дещо більшої розмірності R20 (ЗиЛ 131 і ін.), щоправда зі значно більшим запасом допустимого навантаження. Загалом ці ж шини відповідають і вимогам щодо шин з умов руху транспортних засобів бездоріжжям [11]. Подальшу структуру і послідовність тягового розрахунку – методики визначення необхідних передавальних чисел трансмісії можна представити у вигляді поетапного підбору – розрахунку з можливістю повернення і внесення змін у попередні етапи при отриманні незадовільного результату на поточному.

Таблиця 1

Характеристики автомобільних шин підвищеної прохідності

Умовне позначення	Радіус ко-чення, м	Ширина профіля, м	Допустиме навантаження, кг	Маса шини, кг	Маса колеса в зборі, кг
320/80R18	0.484	0.32	1600	56,4	96.4
365/90R18	0.557	0.365	1850	78	118
365/80R20	0.546	0.365	3550	75	114

1. Задання проектних характеристик двигуна, вагових і розмірних характеристик КТТЗ, характеристик опорних поверхонь, базових транспортних і технологічних операцій

2. Визначення типорозміру шин з умов прохідності, навантаження, індексу швидкості

3. Розрахунок сумарного передавального числа з умов реалізації сили зчеплення шин з ґрунтом у діапазоні технологічних швидкостей руху 7-12 км/год (оранка)

4. Розрахунок необхідного передавального числа головної передачі з умови забезпечення заданої максимальної швидкості (прямі передачі в коробках передач)

5. Розрахунок передавального числа понижуючої передачі роздавальної коробки та передачі базової коробки передач при відомій головній передачі

6. Формування ряду передавальних чисел базової коробки передач з типових умов руху та паливно-швидкісних характеристик

Рис. 4. Структура параметричного синтезу трансмісії УКТТЗ типу Автотрак/Унімог

Враховуючи більш ніж достатній запас потужності дизельних двигунів із турбонаддувом та інтеркулером і робочим об'ємом 2,8 – 3,3 л, що покладені в основу проекту АТ «Укравтобуспром» – 160-175 к. с. (законодавча норма екологічності в Україні «Євро-5» для колісних транспортних засобів категорії N1, куди і віднесено проект УКТТЗ ТУР ВТ 041 «Автотрак» з умов допуску до автодоріг загального користування і максимальної швидкості руху більше 40 км/год) розрахунок відповідного передавального числа трансмісії в цілому (п. 2, **рис. 3**) здійснюємо з умов тяги 1,4 при швидкостях 7–12 км/год, типових для агротехнологій. Фактично це обернена задача класичного тягового розрахунку для повнопривідних колісних машин в умовах бездоріжжя [12] – при відомому заданому тяговому зусиллю на ведучих колесах F_k (задане тягове зусилля на гаці F_h та розрахункові значення сил опору усталеному рухові на заданому типі ґрунту F_o та певному підйомі F_i

$$u_c = u_1 u_{r1} u_0 = \frac{F_k r_k}{T_e \eta_t} + G(f + \sin \alpha) r_k / T_e \eta_t \quad (1)$$

де:

u_c – сумарне передавальне число трансмісії, u_1 – передавальне число 1-ї передачі, u_{r1} – передавальне число понижуючої передачі роздавальної коробки передач, u_0 – передавальне число головної передачі, r_k – радіус кочення колеса, T_e – крутний момент двигуна, η_t – ккд трансмісії, G – експлуатаційна вага повнопривідного УКТТЗ, f – коефіцієнт опору коченню шин на ґрунті, α – кут підйому опорної поверхні (звично граничний кут підйому опорної поверхні – ґрунту, що дозволяє реалізувати тягове зусилля на гаці 1,4 т при збільшеному відповідно опорі рухові).

Звично, що отримане значення u_c підлягає перевірці з умов реалізації – співвідношення до сили зчеплення шин із загальноприйнятими типами ґрунтів під оранку:

$$F_k = (T_e u_c \eta_t / r_k) \leq \phi G_k \quad (2)$$

та оцінці діапазону швидкісного режиму роботи двигуна при агротехнологічних швидкостях руху 7-12 км/год:

$$n_e = (7 \leftarrow \rightarrow 12) u_c / 0,377 r_k \quad (3)$$

Отримані задовільні результати за (2) і (3) дозволяють виділити із значення u_c необхідне значення передавального числа головної передачі u_o (з умов прямої передачі у роздавальній коробці та прямої чи підвищувальної передачі у коробці переміни передач та кінематичного забезпечення заданої максимальної швидкості V_{\max} у діапазоні оборотності двигуна $n_e = (0,7 \square 0,8) n_N$, де n_N – частота обертання вала двигуна при максимальній потужності).

Отримане значення u_o (з корекцією, за необхідності, під промислові зразки головних пар) дозволяють перейти до визначення добутку значень передавальних чисел понижуючої передачі роздавальної коробки та першої передачі коробки переміни передач $u_1 u_{r1}$ (п. 5, **рис. 4**). З умов агрегатної уніфікації для обраної моделі дизельного двигуна (у випадку ТУР ВТ 041 – Iveco 8040) доцільно обрати серійну 5-ступеневу коробку передач, що дозволяє зафіксувати і передавальні числа передач, у т. ч. і 1-ї передачі, а, відповідно, з отриманого необхідного добутку $U \times U$ (з корекцією по уточненому значенню щодо головної передачі u) і відповідне значення для понижуючої передачі роздавальної коробки передач. Таким чином створення машини зводиться до мінімуму використання оригінальних агрегатів трансмісії Автотрак (передавальні числа понижуючих передач роздавальних коробок серійних повнопривідних автомобілів підвищеної прохідності логічно відрізняються – з умов руху бездоріжжям у діапазоні швидкостей, вищих за агротехнологічні [12]).

Визначені вище значення передавальних чисел трансмісії слід перевірити щодо реалізації необхідного тягового зусилля на гаці методом імітаційного моделювання операції оранки у типових для аграрної сфери умовах – характеристиках ґрунту [13–16]. У цьому плані одним з найбільш розповсюджених у сучасних дослідженнях є використання програмного середовища MATLAB Simulink [17], природно з відповідним доопрацюванням математичної моделі, що

включає і опис операцій обробітку ґрунту та динаміку відповідного перерозподілу навантажень на осі Автотрак [18]. При цьому в основу моделювання опору оранки плугом було покладено як загальноприйняту в Україні (СРСР) формулу Л. С. Горячкіна (з врахуванням сучасних уточнень [13, 14], так і більш розповсюджену у Західній Європі формулу проф. К. Шіллінг (K. Schilling) [15, 16], що зрештою показали близькі результати, **рис. 5**.

Моделювання оранки проведене для звичного суглинку середнього зволоження [14] та і для варіанту тяги з здвоєними колесами, що часто використовується в сучасній агротехніці як з умов покращення площі контакту – зчеплення шин та агроекології, так і тягових характеристик [13]. Очевидно внаслідок невеликих навантажень на вісь застосування здвоєних шин дає відносно невелике збільшення сили тяги на гаку – у межах до 15% (**рис. 5**) і доцільне тільки на сильно зволжених ґрунтах.

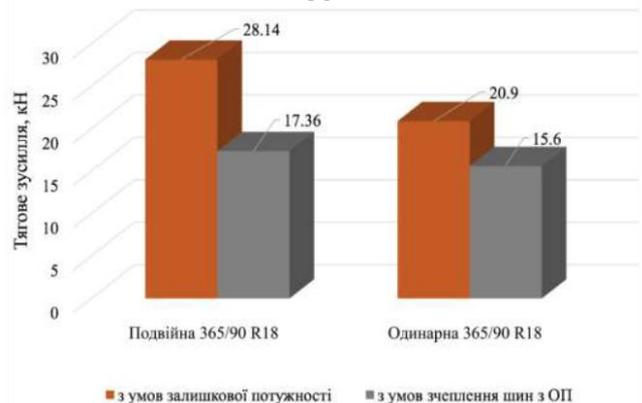


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання оранки та оцінки тягового балансу (на прикладі ТУР ВТ 04) [18]

Оцінку адекватності комп'ютерної моделі було проведено шляхом відтворення результатів польового експерименту – оцінки тяги подібного за колісною схемою (4x4 та однакові шини передньої та задньої осей, звично більшого типорозміру) колісного трактора Т 150К [13], що засвідчило достатню збіжність отриманого розрахунку класу тяги 3,0 даного трактора.

Отримані результати щодо ТУР ВТ 04 «Автотрак» дозволяють констатувати значний теоретичний резерв сили тяги з умов по-

тужності двигуна (співставної з вищезгаданим Т 150К), однак реально обмеженої з умов зчеплення шин з опорною поверхнею (2) до класу 1,5-1,4 (відповідно на шинах 365/90R18 або меншого діаметру – 320/80R18). Використання шин 365/80R20 в аспекті тягового зусилля близьке до шин 365/90R18 і у плані збільшення сил зчеплення та тяги більш доцільно розглядати уже шини 530/70R21 (1300-530-533), що використовуються на повнопривідних моделях КрАЗ, однак це зміна маточин під відповідні диски, а також 2-3 кратне зростання вартості шин і дисків.

Загалом, з-поміж технологічних операцій власне оранка плугом є визначальною щодо сили тяги у нижньому діапазоні трансмісії. Практика Unimog щодо використання двох понижуючих передач у роздавальній коробці (додатково до прямої, транспортної передачі) – для забезпечення так зв. «повзучого» режиму в діапазоні швидкостей 0,008-2 км/год, актуальна у інших сферах використання. Необхідна мобільність бездоріжжям забезпечується за рахунок 2–4 (5) передач основної коробки передач на пониженому діапазоні (передачі) роздавальної коробки.

Висновки

Очевидна актуальність розвитку вітчизняного автомобілебудування, насамперед для сфер оборони та сільського і лісового господарств, де домінує рух бездоріжжям, обумовлює пріоритет власного виробництва повнопривідних автомобілів підвищеної та високої прохідності, потреби в яких досі покривались

References

1. Hochgeländegängiger Unimog. (2024). Mercedes-Benz Trucks. Trucks you can trust. Retrieved from <https://www.mercedes-benz-trucks.com/de/de/home.html> [in German].
2. Praga UV 80. (2024). Wikipedie. Retrieved from https://cs.wikipedia.org/wiki/Praga_UV_80 [in Czech].
3. Katsygin, V. V., Gorin, G. S., Zenkovich, A. A., et al. (1982). Prospective mobile energy vehicle (MEV) for agricultural production. Minsk: Science and Technology, 272.
4. KHTZ 3130. (2024). Retrieved from <https://alfa-z.com.ua/xtz/stranica/1> [in Ukrainian].
5. SHU-356. (2024). Wikipedia. Retrieved from <https://be.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%A3-356> [in Belarusian].
6. Ipatov, A. A., Dzotsenidze, T. D. (2008). Development of new means for transport infrastructure advancement. Problems and Solutions. Moscow: Metallurhyzdat, 272.
7. Voynash, A. S., Voynash, S. A. (2010). Auto-Tractor for farming households. Problems and achievements of the automotive transport com-

за рахунок імпорту з рф та КНР. Аналогічна ситуація і з колісними тракторами класів тяги 0,6-1,4 – Білорусь та КНР. Відповідно і поява універсальних колісних тягово-транспортних машин типу Унімог/Автотрак, насамперед в малотоннажних категоріях NG1/T1, є затребуваною в аграрній та комунальній сферах насамперед.

Проектування та промислова реалізація машини такого типу пов'язана насамперед із формуванням оригінальної компоновки, як правило напівкапотної схеми (рис. 1-3) та силового приводу, що забезпечує як транспортні режими автомобіля, так і технологічні, обробітку ґрунту трактора. Представлена методика розрахунку-підбору необхідного передавального діапазону трансмісії згідно вищевикладених вимог, що реалізована на прикладі проекту малотоннажної моделі ТУР ВТ 041 «Автотрак» та проведена оцінка адекватності отриманих результатів на підставі співставлення результатів експерименту та комп'ютерного моделювання для іншої моделі машини.

Практично можна констатувати, що колісні засоби типу «Автотрак» категорії NG1/T1 при експлуатаційній масі 3,5 т дозволяють реалізувати тягове зусилля класу 1,4 при обробітку ґрунту та використанні причепа повною масою до 2,5 т на бездоріжжі, а також транспортування 1,2-1,3 т вантажів (додатково до 2т на автомобільному причепі) на автодорогах та бездоріжжі.

plex: proceedings of the VIII All-Russian scientific-technical conference. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 19–23.

8. Doroshenko, L. V., Nikitin, S. V., Yakovenko, A. M. (2002). Justification for joint use of equipment in farming households. Agrarian bulletin of the Black Sea Region: Collection of scientific works, (19), pp. 39–48. Odessa.

9. Pohorilyi, S. P. (2018). Experimental study of traction performance of MEV-330 "Auto-Tractor" depending on design parameters. Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Series, (17), 41–48.

10. Kraynyk, L. V., Khudaverdyan, H. A. (2022). Concept and formation of a domestic Universal Auto-Tractor/Unimog for farming and municipal households. 10th International scientific-technical online conference "Problems and prospects of automobile transport development": Abstracts of reports (Vinnytsia, April 14–15, 2022). Vinnytsia: VNTU, 178–180.

11. Khudaverdyan, H. A. (scientific advisor: Kraynyk, L. V.) (2023). Substantiation of tire size for a universal wheeled traction and transport vehicle. Scientific publication "Actual problems of modern science: Theoretical and practical research of young scientists". Proceedings of the 1st All-Ukrainian scientific-practical conference, April 26–27, 2023. PDAU, Poltava, 100–102.

12. Kraynyk, L., Sennyshak, M. (2021). Features of selecting gear ratios for the transfer case of a high-cross-country vehicle. Problems with traffic flows and their solutions: Abstracts of reports. Lviv Polytechnic National University, March 25–26, 2021, 105–106.

13. Rebrov, O. Y. (2017). Theoretical justification of the main parameters of wheeled agricultural tractors. Technical service of agro-industrial, forestry, and transport complexes, (8), 243–255, Kharkiv.

14. Zayika, P. M. (2001). Theory of agricultural machines. Vol. 1, Part 1: Machines and tools for soil cultivation. Kharkiv: Oко, 444.

15. Schilling, E. (1962). Agricultural Machinery: Textbook and Handbook for agricultural ma-

chinery engineering (2nd ed., Vol. 2). Rodenkirchen bei Köln: Verlag Dr.-Ing. Erich Schilling, Inh. H.A. Schilling, 456.

16. Thiesing, M. (2016). Forces and kinematics in agricultural ploughs. Dissertation Dr. agr., University of Kassel, 108.

17. Hrubel, M. H., Kraynyk, L. V., Khoma, V. V. (2020). Simulation modeling of wheeled military vehicle motion off-road and its adequacy assessment. "Autoshlyakhovyk of Ukraine", (2), 21–28.

18. Khudaverdyan, H., Khoma, V., & Kraynyk, L. (2023). Simulation modeling of all-wheel-drive wheeled vehicles moving across fields in MATLAB Simulink. Bulletin of Lviv National University of Natural Resources. Agroengineering Research Series, (26), 164–170.

DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164>

19. Khudaverdyan H. (2024). Developing the technological equipment for the T1/N1 traction transport machine used in the agro-industrial complex. Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research, (27), 18–21.

DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.018>

УДК 621.43

DOI: 10.33868/0365-8392-2025-4-285-24-27

© Г. А. Філіпова, канд. техн. наук, професор,
 ORCID: 0000-0003-3427-7633,
 e-mail: galina_gaj@ukr.net;
 © В. В. Яновський, канд. техн. наук, доцент,
 ORCID:0000-0001-9437-4537,
 e-mail: yanovskyi_v@ukr.net;
 © В. В. Федоров, канд. техн. наук, доцент,
 ORCID:0000-0002-1085-5112,
 e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;
 (Національний транспортний університет)

© Galyna Filipova, PhD, Professor,
 ORCID:0000-0003-3427-7633,
 e-mail: galina_gaj@ukr.net;
 © Vasyl Yanovsky, PhD, Associate Professor,
 ORCID:0000-0001-9437-4537,
 e-mail: yanovskyi_v@ukr.net;
 © Volodymyr Fedorov, PhD, Associate Professor,
 ORCID:0000-0002-1085-5112,
 e-mail: fedorov.volodymyr@gmail.com;
 (National Transport University)

ДО ОЦІНКИ ВПЛИВУ СТУПЕНЯ СТИСКУ НА ПОКАЗНИКИ ГАЗОВОГО ДВИГУНА

TO ASSESS THE IMPACT OF COMPRESSION RATIO ON GAS ENGINE PERFORMANCE

Анотація. Природний газ на сьогодні є найбільш реальним заміником рідких нафтових палив. Основними його перевагами є великі природні запаси, значно нижчі викиди забруднювальних речовин, а також високі антидетонаційні властивості. Але під час роботи на стиснутому природному газі потужність двигуна знижується на 15–20% через низьку енергоємність газоповітряної суміші та зменшення наповнення циліндрів повітрям, що призводить до зниження індикаторних та ефективних показників двигуна і внаслідок цього погіршення тягово-швидкісних властивостей та продуктивності газобалонних автомобілів. Високі антидетонаційні властивості природного газу дозволяють поліпшити індикаторні та ефективні показники двигуна під час роботи на природному газі підвищенням ступеня стиску ε . Проведені експериментальні дослідження двигуна 8Ч100/95 із різними значеннями ε в умовах роботи на стиснутому природному газі в усьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів, які показали підвищення максимальної потужності двигуна та зменшення витрати палива за умови збільшення ступеня стиску. Зміна ε забезпечувалася використанням головок циліндрів із різними об'ємами камер згорання. Проаналізовано також вплив на екологічні показники двигуна оптимальних кутів випередження запалювання θ , які суттєво відрізняються для різних ε . Отримані залежності дозволяють провести подальші дослідження впливу ε на показники газового двигуна. Такі дослідження планується виконати на математичній моделі розрахунку робочого процесу в надпоршневій порожнині циліндра.

Ключові слова: стиснутий природний газ, газовий двигун, ступінь стиску, енергетичні показники, витрата палива, токсичність відпрацьованих газів.

Abstract. Natural gas is currently the most realistic substitute for liquid petroleum fuels. Its main advantages are large natural reserves, significantly lower emissions of pollutants, and high anti-knock properties. However, when operating on compressed natural gas, engine power is reduced by 15–20% due to the low energy density of the gas-air mixture and a decrease in the filling of the cylinders with air, which leads to a deterioration in the indicator and effective performance of the engine and, as a result, a deterioration in the traction and speed properties and performance of gas-powered vehicles. The high anti-knock properties of natural gas allow improving the indicator and effective performance of the engine when operating on natural gas by increasing the compression ratio. Experimental studies of the 8Ch100/95 engine with different values when operating on compressed natural gas in the entire range of speed and load modes were conducted, which showed an increase in maximum engine power and a decrease in fuel consumption with an increase in the compression ratio. The change was provided by the use of cylinder heads with different volumes of combustion chambers. The influence on the environmental performance of the engine of the optimal ignition advance angles, which differ significantly for different, was also analyzed. The obtained dependencies will allow further research into the influence on the performance of the gas engine. Such research is planned to be performed on a mathematical model of calculating the working process in the superpiston cavity of the cylinder.

Keywords: compressed natural gas, gas engine, compression ratio, energy performance, fuel consumption, exhaust gas toxicity.

Вступ

Серед основних переваг природного газу, які роблять його найбільш реальним

заміником рідких нафтових палив, варто виділити високі антидетонаційні властивості. Це дозволяє поліпшити ефективність робочого

процесу двигуна за рахунок підвищення ступеня стиску.

Основна частина

Аналіз шляхів підвищення ефективності використання стиснутого природного газу як моторного палива для двигунів автотранспортних засобів [1] показує, що найбільш широко природний газ застосовують на автомобілях із серійними бензиновими двигунами з додатково встановленою газовою системою живлення з можливістю працювати як на бензині, так і на газі. Хоча цей спосіб і має низку беззаперечних плюсів, однак його застосування не дозволяє повною мірою використовувати переваги високого октанового числа (понад 105 одиниць) природного газу.

Порівняльні дослідження автомобіля категорії N2 під час роботи на бензині і стиснутому природному газі в умовах міського руху [2] продемонстрували, що використання природного газу дає змогу зменшити сумарні (зведені до оксиду вуглецю CO) викиди на 8–20% за рахунок суттєвого (у 3,04–5,59 разів) зниження викидів CO. Викиди вуглеводнів C_mH_n , і оксидів азоту NO_x , а також паливна економічність за еквівалентною питомою витратою близькі в усьому діапазоні завантаження автомобіля.

Однак під час роботи на стиснутому природному газі потужність двигуна знижується на 15–20 % через низьку енергоємність газоповітряної суміші та зменшення наповнення циліндрів повітрям. Це призводить до зниження індикаторних та ефективних показників двигуна і внаслідок цього погіршення тягово-швидкісних властивостей та продуктивності газобалонних автомобілів.

Одним зі способів поліпшення індикаторних та ефективних показників двигуна під час роботи на природному газі є підвищення ступеня стиску ε .

Дослідження щодо впливу ступеня стиску на ефективні показники двигунів з іскровим запалюванням виконували чимало авторів [3]. Однак комплексна оцінка впливу збільшення ε на витрату палива та екологічні показники газового двигуна та газобалонного автомобіля в експлуатаційних умовах проводилась недостатньо.

Тому на першому етапі були проведені експериментальні дослідження ефективних та екологічних показників двигуна з іскровим запалюванням 8Ч100/95, конвертованого з бензинового для роботи на стиснутому природному газі, з різними значеннями ε ($\varepsilon = 6,5$; $\varepsilon = 7,1$ і $\varepsilon = 8,0$) під час роботи на стиснутому природному газі в усьому діапазоні швидкісних і навантажувальних режимів. Зміна ступеня стиску двигуна здійснювалася шляхом зміни головок циліндрів, камери згорання яких забезпечували відповідні значення ε .

Як приклад на **рис. 1** показані навантажувальні характеристики цього двигуна з різними ступенями стиску для частоти обертання $n_d = 2000 \text{ хв}^{-1}$.

Для визначення характеристик використовувались автоматизований гальмівний стенд SAK 670, комплекс газоаналізуючої апаратури (газоаналіз-затори 102ФА01М (CO, CH), INFRALYT-2T1(CO, CO₂), Sincro (CO, CO₂, CH, O₂), 344ХЛ-01 (NO_x)).

Витрата повітря вимірювалася ротаційним лічильником газу РГ-600.

Вимірювання витрати природного газу проводилося прямим шляхом за допомогою ротаційного лічильника газу РГ-40 із подальшим визначенням масової витрати зі зведенням до нормальних умов з урахуванням тиску та температури на вході до газового лічильника.

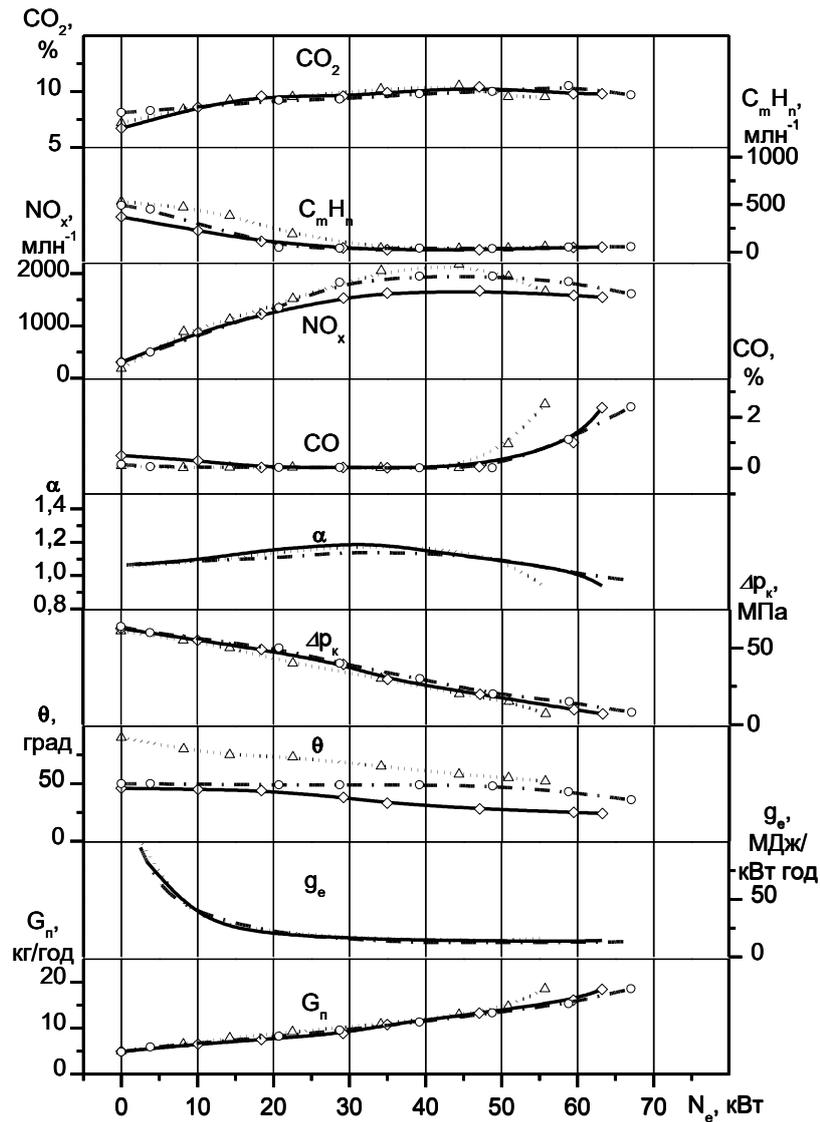


Рис. 1. Навантажувальні характеристики двигуна ВЧ 100/95
(..... $\varepsilon = 6,5$; — $\varepsilon = 7,1$; - · - $\varepsilon = 8,0$)

Як видно з **рис. 1**, збільшення ступеня стиску з 6,5 до 8,0 підвищує максимальну потужність двигуна на 19,3 %, водночас це підвищення не пропорційне ε : зі зміною ε з 6,5 на 7,1 максимальна потужність зростає на 11,8 %, тоді як збільшення ε з 7,1 до 8,0 призвело до зростання максимальної потужності на 7,5%. Очевидно, що, крім ступеня стиску, на ефективні та екологічні показники двигуна впливають інші фактори, зокрема форма камери згорання, а також конструктивні особливості головок циліндрів. Про це свідчить і той факт, що за умови однакового складу газоповітряної суміші значення оптимальних кутів

випередження запалювання θ суттєво відрізняються для різних ε .

Найбільші значення θ характерні для двигуна з $\varepsilon = 6,5$, що й обумовлює найвищі значення концентрацій оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах. Причиною підвищених концентрацій вуглеводнів $C_m H_n$ двигуна з $\varepsilon = 6,5$ також є більш раннє запалювання. Характер зміни вмісту інших продуктів згорання у відпрацьованих газах близький для всіх значень ε .

Концентрації забруднювальних речовин у відпрацьованих газах, витрати повітря і природного газу в навантажувальних режимах у діапазоні частот 1200–2800 $хв^{-1}$ описані

поліноміальними залежностями другого ступеня, визначеними за результатами експериментів, залежно від частоти обертання двигуна та розрідження у впускному трубопроводі.

Загальний вигляд поліноміальних моделей:

$$Y_i = c_0 + c_1 \cdot n_o + c_2 \cdot \Delta p_k + c_{11} \cdot n_o^2 + c_{22} \cdot \Delta p_k^2 + c_{12} \cdot \Delta p_k \cdot n_o$$

де c_{ij} – коефіцієнти поліноміальних моделей.

Як приклад у **табл. 1** наведені значення коефіцієнтів для показників газового двигуна з $\varepsilon = 7,1$.

Таблиця 1

Коефіцієнти поліноміальних моделей для розрахунку показників газового двигуна з $\varepsilon = 7,1$

Показник	Коефіцієнти						Середньоквадратичне відхилення σ
	c_0	c_1	c_2	c_{11}	c_{22}	c_{12}	
Витрата газу, кг/год	0,655	0,729 E-2	-0,806E-2	0,829E-6	0,849E-3	-0,134E-3	0,138
Витрата повітря, кг/год	-0,818E-2	0,145	0,669	0,713E-5	-0,310E-2	-0,201E-2	2,03
Концентрація							
CO , % $\Delta p_k = 20 \dots 60$ кПа	0,795	-0,438E-3	-0,216E-1	0,152E-6	0,244E-3	0,11E-6	0,024
CO , % $\Delta p_k = 8 \dots 20$ кПа	0,421	0,14E-2	0,622E-1	-0,179E-6	-0,595E-2	-0,257E-4	0,05
$C_m H_n$, млн ⁻¹	298,99	-0,253	-4,511	0,645 E-4	0,108	0,75E-3	3,23
NO_x , млн ⁻¹	982,86	0,199	29,06	-0,994E-5	-0,926	-0,297E-2	41,7
CO_2 , %	5,9	0.397E-2	-0,25E-1	-0,11E-5	-0,185E-2	-0,455E-4	0,173

Висновки

Отримані залежності дозволять провести подальші дослідження впливу ε на показники газового двигуна. Такі дослідження планується виконати на математичній моделі розрахунку робочого процесу в надпоршневій порожнині циліндра.

References

1. Kanilo P. M., Bey I. C., Rovenskey O. I. (2000) Avtomobil' ta navkolyshnye seredovyshche. [The car and the environment]. Kharkiv, Prapor. 304.

2. Gytarevich U. F., Mateichik V. P., Klimenko O. I. (1997). Ekonomichni ta ekolohichni pokaznyky avtomobiliv pry zamini benzynu pryrodnym hazom. Systemni metody keruvannya, tekhnolohiya ta orhanizatsiya vyrobnytstva, remontu ta ekspluatatsiyi avtomobiliv, 3 [Economic and environmental performance of cars when replacing gasoline with natural gas. System management methods, technology and organization of production, repair and operation of cars, 3]. Kyiv, TAU, 47-50.

3. Wenpo L., Schafer H. J. (1982). Verbrauchreduzierung am Ottomotor durch Optimierung von Brennraumform und Verdichtungsverhältnis. MTZ, 7-8, 279–284.

© В. В. Масленнікова, канд. екон. наук, доцент,
ORCID: 0000-0002-9694-8271,
e-mail: vicmasl2007@gmail.com
(Державний біотехнологічний університет)

© Viktoriia Maslennikova, PhD in Economic,
Associate Professors,
ORCID: 0000-0002-9694-8271,
e-mail: vicmasl2007@gmail.com
(State Biotechnology University, Kharkiv, Ukraine)

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЗЕЛЕНІЙ АРХІТЕКТУРІ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

ENERGY CONSERVATION IN GREEN ARCHITECTURE: MODERN APPROACHES, TECHNOLOGIES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Анотація: Розглянуто концептуальні, технологічні та практичні аспекти енергозбереження в зеленій архітектурі. Особливу увагу приділено методам пасивного та активного енергоощадного проектування, сучасним матеріалам і системам, впливу містобудівних факторів та зеленої інфраструктури на енергетичний баланс будівель. Окремо досліджено міжнародні стандарти енергоефективності та можливості їхньої адаптації в Україні. Наведено приклади реалізованих об'єктів і дано рекомендації щодо впровадження комплексних енергозберігаючих стратегій у будівництві.

Ключові слова: зелена архітектура, енергозбереження, пасивний будинок, енергоефективність, зелені технології, сталий розвиток.

Abstract: The article discusses conceptual, technological and practical aspects of energy conservation in green architecture. Particular attention is paid to passive and active energy-saving design methods, modern materials and systems, the impact of urban planning factors and green infrastructure on the energy balance of buildings. International energy efficiency standards and the possibilities for their adaptation in Ukraine are examined separately. Examples of completed projects are provided, and recommendations are given for the implementation of comprehensive energy-saving strategies in construction.

Green architecture is a key area of development for the construction industry in the context of global environmental challenges. Energy conservation is its central element, which is determined by a complex of architectural, engineering and technological solutions.

The prospects for green architecture in Ukraine are linked to the improvement of the regulatory framework, the promotion of energy-efficient solutions and the development of professional education. Green architecture is an effective response to the energy and environmental challenges of the 21st century. Passive and active energy-saving methods, the integration of renewable energy sources, the use of green spaces and modern materials can significantly reduce the energy consumption of buildings. International standards and best practices show that it is possible to reduce thermal energy consumption by a factor of ten.

For Ukraine, the implementation of green architecture principles is strategically important. It will increase energy independence, reduce building operating costs, and contribute to improving the environmental condition of cities.

A comprehensive approach to design that takes into account urban planning, structural and technological aspects can make green architecture the foundation for the sustainable development of the domestic construction sector.

Keywords: green architecture, energy conservation, passive house, energy efficiency, green technologies, sustainable development.

Вступ

Проблема енергозбереження набула глобального значення через вичерпність традиційних енергоресурсів, зростання їхньої вартості та негативний вплив викидів на клімат. Будівельний сектор сьогодні є одним із найбільших споживачів енергії у світі, забезпечуючи

до 40 % загального енергоспоживання в розвинених країнах [1]. Зелена архітектура як концепція, що інтегрує екологічні, енергетичні та соціальні аспекти, пропонує системний підхід до зменшення навантаження на довкілля.

Енергозбереження в зеленій архітектурі охоплює декілька рівнів: планувальний, конструктивний, інженерний та експлуатаційний. Кожен із них формує сукупний потенціал скорочення споживання енергії будівлею. Тоді, як традиційне будівництво прагне забезпечити комфорт мешканців за рахунок складних інженерних систем, зелена архітектура робить ставку на оптимізацію природних процесів – інсоляції, вентиляції, акумуляції тепла, біотичного регулювання мікро-клімату.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням енергоефективності в архітектурі присвячено значний масив наукових праць. Теоретичні засади сталої архітектури сформульовано в роботах К. Александера, Н. Фостера, К. Фрея, які підкреслюють необхідність інтеграції будівлі, людини та довкілля. Згідно з Б. Бачером (B. Bacher, 2018), сталий будинок має бути спроектований як енергетично збалансована система, що мінімізує зовнішні витрати ресурсів та максимізує власні енергетичні можливості.

Дослідження енергоефективних технологій показують, що використання високотеплоізоляційних матеріалів, систем рекуперації повітря та пасивних сонячних стратегій дозволяє скоротити споживання енергії на 40–60 %. Наприклад, за даними Європейської комісії (2020), впровадження будівель класу «пасивний будинок» (Passivhaus) забезпечує мінімальні показники енергоспоживання на рівні 15 кВт·год/м² на рік.

У контексті зеленої архітектури важливим є також використання біоорієнтованих рішень. Роботи Т. Мацуяму (T. Matsuyama, 2021) доводять, що зелені дахи та фасади сприяють зменшенню теплових втрат узимку та перегріву влітку, забезпечуючи економію енергії до 25 %.

Українські вчені також приділяють увагу цій темі. Зокрема, Б. Лисенко (2022) розглядає переваги впровадження «зелених» матеріалів в архітектурі, а О. Мельник (2021) досліджує потенціал відновлюваних джерел енергії в будівництві України. Однак вітчизняна практика перебуває на початковому етапі інтеграції комплексних енергозберігаючих систем.

Метою цієї статті є аналіз основних напрямів енергозбереження в зеленій архітектурі, огляд технологій, оцінка їхньої ефективності та визначення перспектив застосування у вітчизняній практиці.

Основна частина

У XXI столітті стрімке зростання урбанізованих територій та підвищення енергоспоживання будівель створюють суттєві виклики для сталого розвитку. За даними міжнародних аналітичних організацій, будівлі споживають до 40 % усієї виробленої енергії та генерують близько третини викидів парникових газів. У відповідь на ці тенденції формується новий підхід до проектування – зелена архітектура, що ґрунтується на принципах енергоефективності, екологічності, низького ресурсоємного використання матеріалів та інтеграції природних елементів у побудоване середовище.

Енергозбереження є ключовою складовою сталої архітектури. Воно охоплює використання інноваційних технологій, новітніх матеріалів, оптимізацію об'ємно-планувальних рішень, впровадження відновлюваних джерел енергії та комплексне управління енергетичними потоками. Дослідження енергозбереження в зеленій архітектурі сьогодні має особливе значення для України, яка впроваджує сучасні стандарти енергоефективності та прагне зменшити залежність від традиційних енергоресурсів.

Методологічна база дослідження ґрунтується на:

1. Аналітичному методі – опрацювання наукових джерел, нормативних документів, міжнародних стандартів енергоефективності.
2. Порівняльному аналізу – зіставлення різних енергозберігаючих технологій, оцінка їхньої ефективності та адаптивності до умов України.
3. Системному підході – розгляд будівлі як цілісної системи, в якій взаємодіють конструктивні, інженерні та екологічні компоненти.
4. Оцінці енергоефективності – аналіз коефіцієнтів теплопередачі матеріалів, ефективності обладнання, потенціалу відновлюваних джерел енергії.
5. Прогнозуванні – визначення перспектив розвитку енергозбереження в українській архітектурі на основі світових тенденцій.

Теоретичні основи енергозбереження в зеленій архітектурі полягають у концепції сталого розвитку та енергетичного балансу будівлі.

Принципи зеленої архітектури ґрунтуються на глобальних засадах сталого розвитку, визначених ООН: економічній ефективності, екологічній безпеці та соціальному добробуті [2]. У контексті енергозбереження це означає:

- зменшення енергоспоживання будівель,
- застосування відновлюваних джерел енергії,
- оптимізацію життєвого циклу будівельних матеріалів,
- адаптацію архітектурних рішень до природно-кліматичних умов.

Енергетичний баланс залежить від:

- теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій,
- інсоляційних властивостей фасадів,
- повітрообміну,
- ефективності інженерних систем,
- поведінки користувачів.

Зелена архітектура прагне мінімізувати втрати та максимізувати природні надходження енергії. Згідно з дослідженнями Європейського енергетичного агентства (ЕЕА), оптимізація архітектурної форми та орієнтації будівлі дозволяє скоротити споживання енергії на 15–25 % без додаткових витрат [3].

Існують пасивні та активні методи енергозбереження.

Пасивні методи є основою зеленого проектування. Вони дозволяють досягти енергоефективності без складних технічних систем. Пасивні методи є основою зеленої архітектури. Серед них:

- орієнтація та форма будівлі з урахуванням інсоляції та вітрових напрямків. Орієнтація будинку з урахуванням траєкторії сонця зменшує потреби в штучному освітленні та опаленні. У північній півкулі оптимально орієнтувати більші площі скління на південь, що забезпечує природну акумуляцію тепла взимку [4]. Доведено, що правильна орієнтація будівлі може зменшити витрати теплової енергії на 15–20 %;
- компактна форма будинку для мінімізації тепловтрат. Така форма будівлі мінімізує теплові втрати через поверхні огорожувальних конструкцій;

- теплоізоляція та герметичність. Сучасні теплоізоляційні матеріали – мінеральна вата, пінополіуретан, а також екологічні альтернативи (конопляні блоки, целюлоза) – забезпечують високий коефіцієнт опору теплопередачі. У концепції *пасивного будинку* опір теплопередачі стін має становити не менше ніж 6–8 м²·К/Вт [5]. Герметичність будівлі критично важлива: неконтрольовані втрати через щілини можуть збільшити споживання енергії на 20–30 %. Сучасна зелена архітектура передбачає застосування: целюлозної ізоляції, ековати, пробкових плит, аерогелів, багатошарових фасадних систем. Аерогелеві матеріали забезпечують теплопровідність на рівні 0,015–0,020 Вт/(м·К), що майже вдвічі ефективніше за традиційну мінеральну вату;

- пасивне сонячне опалення, яке передбачає:

- використання теплової маси (бетон, цегла, вода, камінь, ґрунт) для акумуляції енергії та для стабілізації мікроклімату;

- оптимізацію коефіцієнта світлопроникності скла (площі скління) (південні фасади – більше світла, північні – мінімум втрат);

- застосування сезонних сонцезахисних елементів. (перголи, жалюзі, навісні системи);

- природна вентиляція. Зелена архітектура віддає перевагу гравітаційній, перетинній та шахтній вентиляції. Їхня ефективність підвищується через продумане розташування отворів і повітропроводів. Зменшення навантаження на механічну вентиляцію скорочує до 10–15 % витрат енергії [6].

До активних систем енергозбереження відносять:

- відновлювані джерела енергії. У зеленій архітектурі найчастіше використовують:

- сонячні панелі (фотовольтаїка). Вони можуть покрити 30–70 % річного енергоспоживання житлового будинку;

- інтелектуальні системи управління енергією, а саме сучасні BMS (Building Management Systems) автоматично регулюють: вентиляцію і рекуперацію, освітлення, роботу котлів та теплових насосів;

- сонячні трекери для панелей. Впровадження таких систем дає економію до 30 %;

- геліоколектори для нагрівання води;

- теплові насоси. Геотермальні теплові насоси забезпечують ККД 300–400 % завдяки

використанню стабільної температури ґрунту;

– вітрогенератори малої потужності. Вітрові мікротурбіни в умовах України можуть виробляти до 1500 кВт·год/рік для індивідуальних будинків.

Комбіновані системи можуть забезпечувати до 70–90 % річної потреби будівлі в енергії [7];

• рекуперация тепла. Системи вентиляції з рекуперациєю повертають до 80–95 % тепла, що виходить з будівлі. У низькоенергетичних будівлях рекуператори є обов'язковим елементом;

• «розумні» системи керування. Системи автоматизації контролюють:

- освітлення,
- опалення та кондиціонування,
- роботу жалюзі,
- витрати води.

Згідно з даними міжнародної асоціації *Smart Buildings Alliance*, інтелектуальні системи знижують енергоспоживання на 15–30 % [8].

Зелені насадження виступають як елемент енергозбереження. В зеленій архітектурі застосовують зелені дахи, зелені стіни (вертикальні сади), а також дерева навколо будинків.

Зелені дахи виконують функції:

- теплової ізоляції,
- акумуляції дощових вод,
- зменшення ефекту міського теплового острова.

Дослідження в Німеччині показали, що екстенсивні зелені покрівлі знижують температуру покрівельних конструкцій улітку на 20–30 °С [9].

Зелені стіни або вертикальні сади покращують мікроклімат, забезпечують тінь та зменшують нагрівання фасадів. Поглинання CO₂ і пилу є додатковим екологічним ефектом.

Застосування зелених дахів та фасадів дає переваги у:

- зменшенні теплових втрат;
- ізоляції від перегріву;
- зниженні шуму;
- поглинанні CO₂;
- збільшенні довговічності гідроізоляції.

Зелені фасади знижують температуру поверхні на 10–15 °С влітку.

Дерева навколо будинків, а також посадка листяних дерев на південній стороні

будівель зменшує сонячне навантаження влітку та пропускає світло взимку. Це дозволяє зменшити потреби у кондиціонуванні на 20–40 % [10].

Містобудівними аспектами енергозбереження є:

1. Компактність забудови. Енергоефективні міста мають щільнішу забудову, що зменшує потреби в інфраструктурі та транспорті. Моделі «місто коротких відстаней» та *Transit-Oriented Development (TOD)* прямо впливають на споживання енергії в місті.

2. Інсоляція та аерація. Містобудівні регламенти повинні враховувати:

- розу вітрів,
- доступ до сонячного світла,
- відстані між будівлями.

Правильне планування кварталів зменшує затінення та покращує природну вентиляцію.

3. Інфраструктура відновлюваної енергії. До міських енергетичних мереж можуть відноситися:

- сонячні ферми,
- мікрівітроелектростанції,
- станції акумулювання енергії.

Порівняння енергоспоживання будівель різних типів наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння енергоспоживання будівель різних типів

Тип будівлі	Середнє річне споживання теплової енергії, кВт·год/м ²	Споживання електроенергії, кВт·год/м ²	Клас енергоефективності
Традиційна будівля (Україна, 1980–2000 рр.)	180–240	45–60	E–F
Сучасна будівля з базовою ізоляцією	90–120	30–40	C–D
Енергоощадна будівля (низькоенергетична)	40–60	20–30	B
Пасивний будинок	≤15	10–15	A+
Зелені будівлі з ВДЕ (комбіновані системи)	0–10 (чистий баланс)	0–10 (часте надви-роб-ництво)	A++

Для енергозбереження в зеленій архітектурі широко застосовуються сучасні матеріали та технології, а саме:

1. Високоєфективні теплоізоляційні матеріали, які включають:

- аерогелі,
- вакуумні ізоляційні панелі,
- біопластики,
- ізоляцію з грибного міцелію.

Вони забезпечують високі теплоізоляційні властивості за мінімальною товщиною.

2. Фасади подвійної оболонки забезпечують:

- контрольований рух повітря,
- зимову акумуляцію тепла,
- літнє пасивне охолодження.

3. Екологічні матеріали. Сучасні стандарти рекомендують використання матеріалів:

- з низькою енергоємністю виробництва,
- таких, що підлягають повторному використанню, біодеградованих.

В системі енергозбереження існують міжнародні стандарти та сертифікація:

1. LEED (США). Система оцінює:

- енергоспоживання,
- використання води,
- якість повітря,
- матеріали,
- транспортну доступність.

2. BREEAM (Велика Британія). Фокусується на життєвому циклі будівлі та екологічній ефективності.

3. «Пасивний будинок» (Німеччина). Основні критерії:

- споживання теплової енергії ≤ 15 кВт·год/м² на рік,
- повна потреба в енергії ≤ 120 кВт·год/м² на рік,
- високий рівень герметичності.

4. Потенціал застосування в Україні. В Україні впроваджуються вимоги ДБН В.2.6-31 щодо енергоефективності, проте потенціал міжнародних стандартів залишається значним і може сприяти зменшенню витрат енергії у житловому фонді.

Приклади реалізованих об'єктів зеленої архітектури:

Bosco Verticale (Мілан). У комплексі – понад 21 тис. рослин, що забезпечують природне охолодження та фільтрацію повітря. Енергоспоживання будівлі на 30 % нижче за середнє в регіоні.

The Edge (Амстердам). Один із найенергоєфективніших офісів світу, сертифікований за BREEAM Outstanding. Використовує сонячні панелі, теплові насоси та «розумні» системи.

Будинки пасивного типу у Німеччині та Австрії. Середньорічне споживання теплової енергії таких будівель у 6–10 разів менше, ніж у традиційних [11].

Що стосується енергозбереження в контексті українських реалій, поточний стан в Україні має значний потенціал підвищення енергоефективності, оскільки будівлі радянського періоду характеризуються високими тепловими втратами. За даними державної статистики, близько 70 % житлового фонду потребує термомодернізації.

Серед основних перспективних напрямів розвитку:

- державні програми енергоефективності,
- підтримка встановлення ВДЕ,
- модернізація житлового фонду,
- популяризація зелених технологій серед населення.

Отримані результати демонструють, що зелена архітектура забезпечує значне скорочення енергоспоживання, але її ефективність залежить від комплексного підходу. Впровадження лише окремих технологій не дозволяє досягти високих показників. Найбільший ефект має інтеграція пасивних методів, утеплення, ВДЕ та автоматизації.

Українська архітектурна практика поступово рухається в бік сталого будівництва, але стикається з кількома проблемами:

- недостатня поінформованість забудовників;
- висока вартість інноваційних матеріалів;
- обмежена кількість вітчизняних фахівців із зеленої архітектури;
- слабка державна підтримка «зелених» стандартів.

Попри це потенціал є значним – кліматичні умови України сприяють розвитку сонячної енергетики, зелених фасадів і систем природної вентиляції.

Висновки

Зелена архітектура є ефективною відповіддю на енергетичні та екологічні виклики XXI століття. Пасивні та активні методи

енергозбереження, інтеграція відновлюваних джерел енергії, застосування зелених насаджень і сучасних матеріалів дозволяють значно зменшити енергоспоживання будівель. Міжнародні стандарти та найкращі практики свідчать про можливість скорочення споживання теплової енергії в десятки разів.

Для України впровадження принципів зеленої архітектури є стратегічно важливим. Це підвищить енергетичну незалежність, знизить витрати на експлуатацію будівель і сприятиме покращенню екологічного стану міст.

Комплексний підхід до проектування, який враховує містобудівні, конструктивні та технологічні аспекти, здатен зробити зелену архітектуру фундаментом сталого розвитку вітчизняного будівельного сектору.

Зелена архітектура є ключовим напрямом розвитку будівельної галузі в умовах глобальних екологічних викликів.

References

1. Alexander, C. (2015). *The Nature of Order*. Berkeley: Center for Environmental Structure. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/j.ctv27ftw6>
2. Bacher, B. (2018). *Sustainable Building Design: Energy Efficiency and the Built Environment*. London: Routledge. Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781315172026/handbook-sustainable-building-design-engineering-dejan-mumovic-mat-santamouris>
3. European Commission. (2020). *Energy Performance of Buildings Report*. Brussels. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en
4. Matsuyama, T. (2021). *Green Roofs and Energy Performance: A Comprehensive Review*. *Journal of Sustainable Architecture*. Retrieved from https://www.google.com/search?sca_esv=69f7570c80546219&sxsrf=AE3Tif0y83nAW_azv2iT1WDI0PAF8Jgiew:1763399246417&q=4.+Matsuyama+T.+Green+Roofs+and+Energy+Performance:+A+Comprehensive+Review+.+Journal+of+Sustainable+Architecture,+2021.&sa=X&ved=2ahUKEwic87eN1vmQAxViHxAIHRn_JzsQgwN6BAGKEAE
5. Passivhaus Institut (2020). *Passive House Standards Overview*. Darmstadt, Retrieved from <https://ekolist.cz/cz/publicistika/rozhovory/dan-merta-co-je-to-zelena-architektura>
6. Lisenko, B. (2022). *Energy-efficient materials in modern architecture.* *Architectural Herald*. Retrieved from <https://sites.google.com/site/arhviknuba/%D0%B2%D1%81%D1%96-%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA%D0%B8/%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-24-25-2022>

Енергозбереження – її центральний елемент, який визначається комплексом архітектурних, інженерних та технологічних рішень.

Дослідження показало:

1. Пасивні стратегії забезпечують базовий рівень енергоефективності.
2. Інноваційні теплоізоляційні матеріали значно скорочують тепловтрати.
3. Відновлювані джерела енергії можуть покривати значну частину потреб будівлі.
4. Зелені дахи та фасади мають сильний екологічний та енергозберігаючий ефект.
5. Інтелектуальні системи управління роблять будівлю адаптивною та оптимізованою.

Перспективи зеленої архітектури в Україні пов'язані з удосконаленням нормативної бази, популяризацією енергоефективних рішень та розвитком професійної освіти.

7. Melnik, O. (2021). *Renewable Energy in Ukrainian Construction. Construction and Modern Technologies*. Retrieved from https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/91748/1/Melnyk_Modern_industrial.pdf
8. Sukhenko, V. (2023). 'Green roofs as an element of energy efficiency.' *Urban Studies*. Retrieved from <http://cus.org.ua/%D1%83%D1%80%D0%B1%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96-%D1%81%D1%82%D1%83%D0%B4%D1%96%D1%97/>
9. Maslennikova V. (2024). 'Green architecture' and innovation: a new format for sustainable design. 'Avtoshlyakhovik Ukrainy' Kyiv, 4. Retrieved from https://journal.insat.org.ua/?page_id=7600&lang=uk
10. Maslennikova, V. (2025). *New format of sustainable design of 'green architecture'*. *Scientific problems of architecture and urban planning*, Odessa, 3, 70-79. Retrieved from <https://ptiart.wixsite.com/ogasa/3>
11. Maslennikova, V., & Goptsi, O. (2025). *Integration of modern energy systems into 'green architecture'*. *Municipal Economy of Cities*, Kharkiv, 1 (189), 113-119. Retrieved from <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-113-119>

© С. І. Ілляш, канд. техн. наук, начальник центру,
ORCID: 0000-0002-3001-8012,
e-mail: illiash.s@ukr.net;
© Т. О. Стасюк, завідувач відділу,
ORCID: 0000-0001-5921-4503,
e-mail: wife.stas@ukr.net
(ДП «НІПІ»)

© Sergii Illiash, PhD, Candidate of Technical Sciences, Head of the Center,
ORCID: 0000-0002-3001-8012,
e-mail: illiash.s@ukr.net;
© Tetiana Stasiuk, Head of the Department,
ORCID: 0000-0001-5921-4503,
e-mail: wife.stas@ukr.net
(NIDI SE)

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ СТАНУ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У СУЧАСНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТУВАННЯ

PATTERNS OF CHANGES IN THE CONDITION OF AUTOMOBILE ROADS UNDER MODERN OPERATING CONDITIONS

Анотація. Сучасна практика планування робіт з експлуатаційного утримування автомобільних доріг дедалі більше ґрунтується на прогнозуванні зміни технічного стану дорожніх покриттів у часі. За умов обмеженого фінансування та зростання транспортних навантажень особливого значення набуває науково обґрунтоване визначення строків і обсягів ремонтних втручань на основі моделей деградації дорожніх конструкцій. Ключовим параметром, що узагальнено відображує вплив конструктивних, кліматичних та транспортних факторів, є міцність дорожньої конструкції. У статті розглянуто закономірності зміни міцності дорожніх конструкцій автомобільних доріг у процесі експлуатування. Проаналізовано етапи деградації нежорстких дорожніх одягів, встановлено зв'язок між зниженням міцності, розвитком руйнувань покритву, погіршенням рівності та умов безпеки руху. Залежності можуть бути використані під час обґрунтування заходів з експлуатаційного утримування та плануванні ремонтних робіт.

Підходи до прогнозування стану дорожніх покриттів часто базуються на спрощених емпіричних моделях або не враховують поетапний характер деградації міцності дорожніх одягів. Крім того, універсальні моделі, розроблені для інших країн, не завжди адекватно відображають реальні умови експлуатування автомобільних доріг України, що характеризуються перевищенням розрахункових осьових навантажень, значною нерівномірністю фінансування, а також додатковими руйнівними впливами, спричиненими воєнними діями та зміною структури транспортних потоків.

Метою дослідження є узагальнення та розвиток наукових підходів до моделювання деградації дорожніх покриттів на основі поетапної зміни міцності дорожніх конструкцій, а також обґрунтування можливостей застосування таких моделей для прогнозування транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг в сучасних умовах.

Стаття – оглядова. Використаний системний підхід, що є сукупністю загальнонаукових методологічних принципів (вимог), в основі яких лежить розгляд об'єктів як систем.

Установлено, що деградація дорожніх покриттів має чітко виражений поетапний характер. Зниження міцності дорожньої конструкції є визначальним чинником розвитку руйнувань покритву, зростання площі вибійок і погіршення рівності проїзної частини. Розкрито взаємозв'язок між показниками міцності, рівності та безпеки руху, а також обґрунтовано доцільність використання комбінованих моделей деградації, які поєднують механістично-емпіричні та ймовірнісні підходи. З'ясовано, що застосування локально адаптованих моделей дозволяє підвищити достовірність прогнозування залишкового терміну служби дорожніх покриттів.

Запропонований підхід до моделювання деградації дорожніх покриттів на основі поетапної зміни міцності дорожніх конструкцій може бути використаний як наукова основа для прийняття рішень у системах управління дорожніми активами. Адаптація моделей до реальних умов експлуатування автомобільних доріг України є необхідною умовою підвищення ефективності експлуатаційного утримування та раціонального використання фінансових ресурсів.

Ключові слова: автомобільні дороги, експлуатаційне утримування, дорожній покритв, деградація дорожніх конструкцій, транспортно-експлуатаційний стан.

Abstract. Modern practices of planning road maintenance activities are increasingly based on forecasting changes in pavement condition over time. Under conditions of limited funding and growing traffic loads, scientifically substantiated determination of the timing and scope of maintenance and repair actions based on pavement deterioration models becomes particularly important. The key parameter that integrally reflects the influence of structural, climatic, and traffic-related factors is the structural capacity of the pavement structure. This paper examines the patterns of changes in the structural capacity of road pavement structures during operation. The stages of deterioration of flexible pavements are analyzed, and the relationship between the reduction in structural capacity, the development of pavement distress, deterioration of ride quality, and traffic safety conditions is established. The obtained dependencies can be used to substantiate maintenance strategies and to plan repair works.

Existing approaches to pavement condition forecasting are often based on simplified empirical models or do not adequately account for the stage-wise nature of pavement structural capacity degradation. In addition, universal models developed for other countries do not always adequately reflect the real operating conditions of Ukrainian highways, which are characterized by excessive axle loads, significant irregularity of funding, and additional destructive impacts caused by military actions and changes in traffic flow structure.

The purpose of this study is to generalize and further develop scientific approaches to modeling pavement deterioration based on the stage-wise change in pavement structural capacity, as well as to substantiate the applicability of such models for predicting the serviceability and operational condition of automobile roads under modern operating conditions.

This study is of a review nature. A systems approach was applied, which represents a set of general scientific methodological principles based on considering the objects of study as complex systems.

It was established that pavement deterioration has a clearly defined stage-wise character, in which the reduction of pavement structural capacity is the determining factor governing the development of pavement distress, the increase in the area of potholes, and the deterioration of surface evenness. The interrelation between structural capacity indicators, ride quality, and traffic safety was demonstrated. The feasibility of using combined deterioration models that integrate mechanistic–empirical and probabilistic approaches was substantiated. It was shown that the application of locally calibrated models improves the reliability of residual service life prediction for pavements.

The proposed approach to modeling pavement deterioration based on the stage-wise change in pavement structural capacity can serve as a scientific basis for decision-making in road asset management systems. Adapting deterioration models to the actual operating conditions of Ukrainian highways is a necessary prerequisite for improving the efficiency of road maintenance and the rational use of limited financial resources.

Keywords: *automobile roads, road maintenance, pavement, pavement deterioration, pavement serviceability condition.*

Вступ

Сучасна система експлуатаційного утримування автомобільних доріг дедалі більше орієнтується не на усунення наслідків руйнувань, а на прогнозування змін технічного стану дорожніх покриттів з метою раціонального планування ремонтних заходів. Можливість достовірного прогнозу майбутнього стану покриття є критично важливою з економічної точки зору, оскільки дозволяє формувати оптимальні графіки втручання, визначити пріоритети фінансування та забезпечувати відповідність показників стану дорожнього покриття встановленим нормативним вимогам.

У межах цього дослідження міцність дорожньої конструкції розглядається як узагальнений структурний показник, що характеризує здатність дорожнього одягу сприймати транспортні навантаження протягом нормативного терміну експлуатування. Зміна міцності у процесі експлуатування супроводжується погіршенням нормованих показників стану дорожнього покриття, зокрема рівності, тріщиностійкості та інших параметрів, які використовують для оцінювання його експлуатаційної придатності. Такий підхід дозволяє поєднати аналізування внутрішніх процесів руйнування дорожнього одягу з оцінюванням фактичних показників стану автомобільних доріг.

Наявність ретроспективних даних про експлуатаційні характеристики дорожніх покриттів дає змогу оцінювати залишковий термін служби дорожніх конструкцій і використовувати ці оцінки для прогнозування їх подальшого стану. Це створює передумови для переходу від реактивного реагування на руйнування до превентивного управління станом дорожньої мережі. Водночас розроблення універсальних моделей прогнозування ускладнюється обмеженою доступністю якісних і репрезентативних даних, різноманіттям конструктивних рішень та значною варіабельністю властивостей матеріалів дорожніх одягів.

У світовій практиці для опису деградації дорожніх покриттів застосовуються емпіричні, механістично-емпіричні, імовірнісні та data-driven (орієнтовані на дані) моделі, кожна з яких має власну сферу доцільного використання. Проте без урахування поетапної зміни міцності дорожньої конструкції у часі такі підходи не завжди дозволяють своєчасно виявити момент переходу до критичних стадій деградації.

З огляду на це актуальним є дослідження закономірностей зміни міцності дорожніх конструкцій у часі з метою обґрунтування стратегій експлуатаційного утримування, орієнтованих на недопущення функціонального відмов-

лення покривів та забезпечення довготривалої експлуатаційної надійності автомобільних доріг в умовах України.

Мета й завдання роботи. Проаналізувати закономірності зміни міцності дорожньої конструкції в часі та узагальнити підходи до моделювання деградації дорожніх покривів з метою обґрунтування доцільності застосування планово-попереджувальних ремонтів у системі експлуатаційного утримування автомобільних доріг. Це дозволяє підвищити ефективність управління технічним станом дорожніх покривів, оптимізувати планування ремонтних заходів і забезпечити раціональне використання фінансових ресурсів в сучасних умовах.

Основна частина

У системі показників транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг визначальне місце посідає міцність дорожньої конструкції, яка формується сукупною роботою земляного полотна та шарів дорожнього одягу. Саме рівень міцності значною мірою визначає довговічність покриття, інтенсивність розвитку дефектів, а також рівність проїзної частини і безпеку дорожнього руху

Оцінювання міцності дорожньої конструкції, як правило, здійснюють за коефіцієнтом запасу міцності, який характеризує співвідношення фактичного та необхідного модуля пружності конструкції. При цьому необхідний модуль визначають з урахуванням фактичної або перспективної інтенсивності та складу руху.

$$K_{мц} \leq \frac{E_{заг}}{E_{потр}}, \quad (1)$$

де $K_{мц}$ – коефіцієнт запасу міцності дорожнього одягу;

$E_{заг}$ – загальний модуль пружності дорожньої конструкції, МПа;

$E_{потр}$ – потрібний модуль пружності дорожньої конструкції, МПа, який визначають з урахуванням капітального дорожнього одягу та інтенсивності дії навантаження [1].

Фактичний модуль пружності дорожньої конструкції не є сталою величиною і змінюється у часі під впливом транспортних навантажень та водно-теплого режиму земляного полотна і шарів дорожнього одягу. Мінімальні значення міцності, як правило, спостерігаються у несприятливих за водно-тепловими

умовами періоди, що характеризуються підвищеним зволоженням матеріалів та зниженням їх жорсткості. На відміну від цього, нормативні значення необхідного модуля пружності змінюються незначно, оскільки визначаються переважно параметрами транспортного потоку. Унаслідок цього коефіцієнти міцності та запасу міцності досягають мінімальних значень саме у критичні періоди експлуатування, що зумовлює підвищену ймовірність розвитку дефектів дорожнього покриття. Зниження значень коефіцієнтів міцності нижче нормативних рівнів супроводжується інтенсивністю процесів руйнування, зокрема утворенням вибоїн, тріщин та пластичних деформацій.

Результати спостережень свідчать про наявність тісного зв'язку між зменшенням міцності дорожньої конструкції та зростанням відносної площі деформованих ділянок покриття. За умов недостатнього запасу міцності навіть незначне зростання транспортних навантажень або погіршення кліматичних умов може призвести до різкого погіршення стану покриття.

Погіршення міцності дорожньої конструкції опосередковано проявляється і через зміну рівності проїзної частини, яка є одним із ключових показників транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг. Зростання кількості та площі поверхневих дефектів призводить до збільшення нерівностей, підвищення опору коченню, зниження комфортності руху та зростання аварійності. Таким чином, рівність покриття може бути розглянута як функція часу експлуатування, що відображає накопичення пошкоджень, обумовлених деградацією міцності дорожньої конструкції.

Окрім міцності та рівності, важливими показниками стану покриття залишаються зчипні властивості та знос, однак їхній вплив на загальну працездатність дорожньої конструкції має більш складний і, у ряді випадків, випадковий характер. З цієї причини саме показники міцності доцільно розглядати як базові при обґрунтуванні строків і видів ремонтних втручань у системі експлуатаційного утримування автомобільних доріг.

Зі збільшенням терміну експлуатування покриття зростає потреба в його обслуговуванні. Точне виявлення механізму деградації та прогнозування експлуатаційних характеристик асфальтобетонного покриття є основою

для прийняття наукових рішень щодо його обслуговування. Водночас це також корисно для планування будівництва доріг та розподілу ресурсів.

У наукових дослідженнях, присвячених експлуатаційному утримуванню автомобільних доріг, деградація дорожніх покриттів розглядається як складний багатофакторний процес, що відбувається у часі під впливом транспортних навантажень, природно-кліматичних умов, конструктивних рішень та властивостей матеріалів дорожнього одягу. З позицій інженерної механіки цей процес доцільно інтерпретувати як поетапну зміну ефективної міцності дорожньої конструкції, зовнішніми проявами якої є розвиток дефектів покриття, погіршення рівності та зниження рівня безпеки руху.

Для опису та прогнозування деградації дорожніх покриттів у світовій практиці застосовуються різні класи моделей, які відрізняються рівнем деталізації, вимогами до вихідних даних і ступенем урахування фізичних механізмів руйнування. Найбільш поширеними серед них є емпіричні, механістично-емпіричні, імовірнісні та data-driven моделі.

Найпростішими та найбільш поширеними у практиці управління дорожніми покриттями залишаються емпіричні (регресійні) моделі деградації. Вони ґрунтуються на встановленні статистичного зв'язку між показниками транспортно-експлуатаційного стану покриття та параметрами його експлуатування. Такі моделі, як правило, будуються на основі результатів періодичних обстежень дорожніх ділянок і описують зміну індексів рівності, зчеплення, площі дефектів або інтегральних показників стану за допомогою лінійних чи нелінійних регресійних залежностей. Вони дозволяють відтворити загальні тенденції погіршення стану покриття, однак не відображають внутрішні процеси руйнування дорожньої конструкції та суттєво залежать від якості й повноти вихідних даних, на основі яких були отримані.[2]

Емпіричні (регресійні) моделі ґрунтуються на встановленні статистичного зв'язку між показниками транспортно-експлуатаційного стану покриття та параметрами його експлуатування. Як вихідні змінні в таких моделях зазвичай використовуються індекси рівності та стану покриття (IRI, PCI, відносна

площа дефектів), тоді як пояснювальними параметрами виступають вік покриття, накопичене транспортне навантаження (еквівалентні осі), а також кліматичні умови експлуатування.

Емпіричні моделі дозволяють відтворити загальні тенденції погіршення стану покриття у часі та є зручними для застосування на мережевому рівні. Водночас їх суттєвим обмеженням є те, що вони не відображають внутрішні процеси руйнування дорожньої конструкції та не дають прямої оцінки зміни її міцності. Як наслідок, такі моделі недостатньо чутливі до переходу покриття від стабільної фази експлуатування до стадії прискореної деградації. Для опису зазначених залежностей застосовують лінійні та нелінійні регресійні моделі, у тому числі поліноміальні та логарифмічні залежності, а також підходи, засновані на аналізуванні часу до настання погіршення експлуатаційного стану [3].

$$y(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 EAL + \beta_3 X + \varepsilon, \quad (2)$$

де $y(t)$ – показник стану (наприклад IRI, PSI або індекс деградації),

t – вік покриття;

EAL – сумарне навантаження від руху у вигляді еквівалентних одноосьових навантажень;

X – додаткові змінні (кліматичні, конструктивні, експлуатаційні);

β_n – невідомі параметри, які потрібно оцінити;

ε – випадкова величина.

Подальшим розвитком підходів до прогнозування стали механістично-емпіричні моделі, у яких статистичні залежності поєднуються з фізично обґрунтованим описом напружено-деформованого стану дорожньої конструкції. У межах цього підходу деградація покриття розглядається як результат накопичення пошкоджень у шарах дорожнього одягу під дією повторних навантажень, температурних коливань і впливу вологи. Механістична складова дозволяє визначати напруження та деформації в конструктивних шарах, тоді як емпірична частина встановлює зв'язок між цими величинами та фактичними проявами руйнувань на поверхні покриття.

Механістично-емпіричні моделі є найбільш придатними для аналізування зміни міцності дорожньої конструкції у часі, оскільки

вони безпосередньо пов'язують деградацію покриву зі зміною модулів пружності шарів у процесі експлуатування та накопиченням втомих пошкоджень. Саме цей підхід покладено в основу сучасних методик проектування та оцінювання довговічності дорожніх конструкцій (зокрема MEPDG, HDM-4), які широко застосовуються для прогнозування залишкового терміну служби покривів за умови відповідного калібрування до локальних умов експлуатування [4].

Механістична частина дає напруження/деформації σ , ϵ у шарі при циклічному навантаженні; емпірична частина – закон накопичення пошкодження (наприклад Miner's rule для втоми) [5]:

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i(\sigma_i)}, \quad (3)$$

де n_i – число циклів з напруженням σ_i ,

$N_i(\sigma_i)$ – кількість циклів до відмови при цій величині напруження;

стан вважається «відмовленим», коли $D \geq 1$.

Поряд із детермінованими моделями значного поширення набули ймовірнісні підходи, зокрема марківські та напівмарківські моделі деградації [6]. У таких моделях технічний стан дорожнього покриву подається у вигляді дискретних станів, що відповідають певним рівням експлуатаційної придатності, а процес деградації описується як послідовність випадкових переходів між цими станами. Ймовірності переходів оцінюються на основі статистичних даних спостережень, що дозволяє враховувати стохастичний характер процесів руйнування.

Напівмарківські моделі, на відміну від класичних марківських, додатково враховують тривалість перебування покриву в окремих станах, що забезпечує більш реалістичне відтворення деградації у часі. Такі підходи є особливо доцільними для застосування у системах управління дорожніми активами на мережевому рівні, однак вони опосередковано враховують зміну міцності дорожньої конструкції і не дозволяють безпосередньо оцінювати внутрішні параметри її стану.

Марківські моделі описують деградацію як випадковий процес переходів між дискретними станами (стан 1 – «відмінний», ..., стан n – «недопустимий»). Переходи задаються мат-

рицею ймовірностей $P=(P_{ij})$. Класичне припущення марківських моделей – відсутність пам'яті: ймовірність переходу залежить лише від поточного стану та інтервалу часу.

Марківська модель для дискретного кроку часу:

$$p(t+1) = p(t)P \quad (4)$$

де $p(t)$ – вектор ймовірностей того, що система знаходиться в кожному із своїх можливих станів в момент t ;

$P = [P_{ij}]$ – матриця ймовірностей переходів між станами.

Розвитком ймовірнісних підходів стали стохастичні моделі, у яких невизначеність розглядається як невід'ємна властивість процесу експлуатування дорожніх покривів. У таких моделях випадковими величинами вважаються транспортні навантаження, кліматичні впливи, а також параметри матеріалів дорожнього одягу. Це дозволяє формувати не єдину прогнозну траєкторію деградації, а множину можливих сценаріїв зміни стану покриву та оцінювати ризики досягнення критичних рівнів міцності [7].

Останніми роками у сфері прогнозування стану дорожніх покривів активно розвиваються data-driven (орієнтовані на дані) моделі, що ґрунтуються на аналізованні великих масивів інформації. На відміну від класичних емпіричних підходів, такі моделі не потребують попереднього задання аналітичної форми залежностей між параметрами стану покриву та факторами впливу, а виявляють їх автоматично на основі статистичних закономірностей у даних.

У дослідженнях цього напрямку використовують методи машинного навчання, нейронні мережі, які дозволяють враховувати нелінійні взаємозв'язки між транспортними навантаженнями, кліматичними умовами, конструктивними параметрами та показниками стану покриву. Разом з тим, обмежена інтерпретованість результатів і висока залежність від повноти та якості вихідних даних ускладнюють їх безпосереднє використання для інженерного аналізу міцності дорожніх конструкцій [8].

З огляду на це в сучасних наукових роботах все більшого поширення набувають гібридні підходи, що поєднують data-driven методи

з механістично-емпіричними моделями, у межах яких фізично обґрунтовані параметри міцності використовуються як структурна основа для побудови прогнозів.

Отже, кожен із розглянутих класів моделей деградації має власну сферу доцільного застосування, а вибір конкретного підходу визначається цілями прогнозування, доступністю вихідних даних та рівнем деталізації, необхідним для прийняття управлінських рішень у системі експлуатаційного утримування автомобільних доріг, зокрема в сучасних умовах.

Узагальнення результатів механістично-емпіричних та ймовірнісних моделей деградації дорожніх покриттів дозволяє подати зміну міцності нежорстких дорожніх конструкцій у процесі експлуатування у вигляді характерної кривої, що відображає поетапний характер накопичення пошкоджень (рис. 1). Такий підхід дає можливість пов'язати внутрішні процеси накопичення пошкоджень у шарах дорожнього одягу із зовнішніми проявами погіршення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг [9].

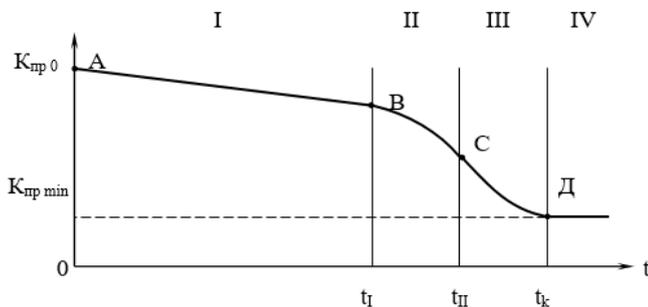


Рис. 1. Залежність зміни міцності дорожньої конструкції в часі

Початковий етап експлуатування (ділянка А–В кривої) охоплює період після завершення будівництва або капітального ремонту і характеризується максимальною ефективною міцністю дорожньої конструкції, визначеною проектними параметрами та властивостями застосованих матеріалів. У цей період конструкція перебуває у стані, близькому до проектно-розрахункового, а її здатність сприймати навантаження транспортного потоку відповідає нормативним вимогам або перевищує їх.

Зміна міцності на початковому етапі відбувається повільно і зумовлена переважно

адаптацією матеріалів дорожнього одягу та земляного полотна до реальних температурно-вологісних умов експлуатування. Для нежорстких дорожніх одягів у перші роки експлуатування накопичення втомних пошкоджень є незначним, а зниження ефективного модуля пружності шарів може бути апроксимоване лінійною або близькою до лінійної залежністю від часу. Цей етап часто відповідає латентній фазі деградації, коли зовнішні дефекти покриття мають поодинокий характер і не впливають істотно на транспортно-експлуатаційні показники.

Початковий етап має важливе значення для калібрування моделей деградації, оскільки саме в цей період формується базовий рівень міцності дорожньої конструкції, відносно якого оцінюється подальше накопичення пошкоджень.

Стадія стабільного експлуатування (ділянка В–С кривої) охоплює основну частину життєвого циклу дорожнього покриття і характеризується поступовим зниженням ефективної міцності під дією циклічних транспортних навантажень, температурних коливань та впливу вологи. На цій стадії кожен окремих навантажувальний цикл має незначний вплив на стан конструкції, однак сумарний ефект великої кількості циклів призводить до накопичення внутрішніх дефектів у шарах дорожнього одягу.

Зниження міцності у стабільній фазі супроводжується поступовим розвитком поверхневих пошкоджень, погіршенням рівності проїзної частини та зростанням значень інтегральних показників транспортно-експлуатаційного стану. Саме на цій стадії найбільш ефективними є заходи планово-попереджувального ремонту, спрямовані на збереження запасу міцності та недопущення переходу конструкції до критичних стадій деградації.

Перехідна стадія прискореної деградації (ділянка С–Д кривої) настає після досягнення певного граничного рівня накопичених пошкоджень, коли внутрішні дефекти починають взаємодіяти між собою та формують масштабні порушення цілісності дорожньої конструкції. Для цієї стадії характерне різке зростання темпів зниження ефективної міцності, що обумовлено розвитком мереж тріщин, утворенням колій, порушенням роботи дренажу та втратою несучої здатності основи.

У цей період емпіричні моделі деградації часто демонструють нелінійний характер зміни показників стану, що проявляється у стрімкому зростанні площі дефектів і показників нерівності. Аналогічні тенденції спостерігаються і в механістично-емпіричних моделях, де прискорене накопичення втомних пошкоджень призводить до швидкого зменшення модулів пружності конструктивних шарів. Перехід до цієї стадії означає суттєве скорочення залишкового терміну служби дорожнього покриття.

Завершальна стадія відповідає стану функціонального відмовлення або структурного руйнування дорожньої конструкції, за якого її міцність знижується до критичного рівня. Такий стан супроводжується масовою появою великих дефектів покриття, значним погіршенням рівності та виходом транспортно-експлуатаційних показників за межі допустимих значень. За цих умов локальні ремонтні заходи втрачають ефективність, а подальше експлуатування без виконання капітального ремонту або реконструкції стає технічно та економічно недоцільним.

Отже, поетапний характер зміни міцності дорожньої конструкції в часі свідчить про доцільність орієнтації системи експлуатаційного утримування на підтримання покриття у межах стабільної стадії експлуатування. Недопущення переходу до стадії прискореної деградації є ключовою умовою продовження терміну служби дорожніх покриттів і раціонального використання фінансових ресурсів.

Отже, проведений аналіз залежності зміни міцності дорожньої конструкції в часі свідчить, що процес деградації покриття має поетапний характер і супроводжується поступовим накопиченням структурних пошкоджень, інтенсивність яких істотно зростає на пізніх стадіях експлуатування. Досягнення завершальної стадії зміни міцності, під час якої формується стан функціонального відмовлення або структурного руйнування дорожньої конструкції, призводить до різкого скорочення залишкового терміну служби та потреби у капітальних втручаннях. У зв'язку з цим доцільним є впровадження стратегії планово-попереджувальних ремонтів, за якої підтримання належного технічного стану дорожнього покриття забезпечується систематичними заходами експлуатаційного утримування, спрямованими на збереження міцності дорожньої конструкції

та запобігання переходу до критичних стадій деградації.

Висновки

У роботі розглянуто деградацію дорожніх покриттів як поетапний процес зміни міцності дорожньої конструкції в часі під впливом транспортних навантажень, природно-кліматичних чинників та конструктивних особливостей дорожнього одягу. Показано, що саме міцність дорожньої конструкції є системоутворювальним параметром, який визначає характер і темпи погіршення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг.

Узагальнено основні підходи до моделювання деградації дорожніх покриттів, зокрема емпіричні, механістично-емпіричні, ймовірнісні та data-driven моделі, встановлено, що ефективність їхнього застосування значною мірою залежить від урахування стадійності процесу зміни міцності дорожньої конструкції. Нехтування поетапним характером деградації знижує достовірність прогнозування та ускладнює своєчасне прийняття управлінських рішень.

Обґрунтовано, що перехід дорожнього покриття до стадії прискореної деградації супроводжується різким зменшенням запасу міцності та стрімким скороченням залишкового терміну служби, що робить подальше експлуатування без капітальних втручань технічно та економічно недоцільним.

Показано, що найбільш ефективними щодо продовження терміну служби дорожніх покриттів є заходи планово-попереджувального ремонту, спрямовані на збереження міцності дорожньої конструкції на стадії стабільного експлуатування та недопущення її переходу до критичних фаз деградації.

Отримані узагальнення можуть бути використані як науково-методична основа для вдосконалення систем управління дорожніми активами, планування заходів з експлуатаційного утримування та обґрунтування пріоритетів фінансування автомобільних доріг з урахуванням реальних умов експлуатування в Україні.

З урахуванням обмежених фінансових ресурсів, характерних для сучасних умов експлуатування автомобільних доріг України, особливого значення набуває обґрунтоване планування заходів з експлуатаційного утриму-

вання, спрямованих на недопущення деградації дорожніх покриттів до стадії функціонального відмовлення або структурного руйнування. Запропонований підхід до моделювання деградації дорожніх покриттів на основі поетапної зміни міцності дорожніх конструкцій може бути використаний як наукова основа для прийняття рішень у системах управ-

ління дорожніми активами. Адаптація моделей до реальних умов експлуатування автомобільних доріг України є запорукою підвищення ефективності експлуатаційного утримування та раціонального використання фінансових ресурсів.

References

1. MUI. (2019). GBN V.2.3-37641918-559:2019. Automobile roads. Flexible pavement. Design. Kyiv (in Ukrainian)
2. Donev, V., Hoffmann, M. (2019). Condition prediction and estimation of service life in the presence of data censoring and dependent competing risks. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, Vol. 20, No. 3, 313–331.
<https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1293264>
3. Hu, A., Bai, Q., Chen, L., Meng, S., Li, Q., Xu, Z. (2022). A review on empirical methods of pavement performance modeling. *Construction and Building Materials*, 342, Article 127968.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127968>
4. Transportation Research Board. (2004). *Flexible Pavement Design: AASHTO 1993 vs. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Washington, DC, 78.
5. PIARC. (2004). *Highway Development and Management Model (HDM-4). Volume 6: Modelling Road Deterioration and Works Effects. Version 2.0*, 297.
6. Thomas, O., Sobanjo, J. (2013). Comparison of Markov Chain and Semi-Markov Models for Crack Deterioration on Flexible Pavements. *Journal of Infrastructure Systems*, 19, 2.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000112)
7. Shahid, C. S., Zainal, Z. A., Yusoff, N. I. M., Mohammad, N., Zamzuri, Z. H., Widyatmoko, I. (2025). Stochastic-based pavement performance and deterioration models: A review of techniques and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 120, 420–437.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.020>
8. Cano-Ortiz, S., Pascual-Muñoz, P., Castro-Fresno, D. (2022). Machine learning algorithms for monitoring pavement performance. *Automation in Construction*, 139, Article 104309.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104309>
9. Demishkan, V. F. (2000). *Improvement of road condition management under limited resources*. PhD thesis. Kharkiv: Kharkiv State Automobile and Highway Technical University (in Ukrainian)

© А. В. Коршак, аспірантка, головний спеціаліст,
ORCID: 0009-0003-3100-1137,
e-mail: alinakorshak18@gmail.com,
(Агентство відновлення)

© Alina Korshak, Postgraduate Student,
Chief Specialist, ORCID: 0009-0003-3100-1137,
e-mail: alinakorshak18@gmail.com,
(Restoration Agency)

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ОБЕРНЕНИЙ РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРИВУ ЗА ДАНИМИ FFWD

FACTORS AFFECTING THE BACKCALCULATION OF PAVEMENT CHARACTERISTICS BASED ON FFWD DATA

Анотація. Оцінювання технічного стану покриттів є важливим для дотримання вимог безпечної експлуатації, своєчасного виявлення дефектів та прийняття рішень щодо ремонтних робіт. Одним із основних та найбільш ефективних методів є обернений розрахунок модулів пружності дорожнього покриття на основі результатів випробувань із застосуванням дефлектометра швидкого падаючого навантаження (Fast Falling Weight Deflectometer – FFWD). Цей метод дозволяє непрямим способом визначити фактичну несну здатність покриття без руйнувань.

У статті розглянуто основні фактори, що впливають на точність та достовірність результатів оберненого розрахунку. Особливу увагу приділено ролі вхідних параметрів, таких як значення модулів пружності, адгезійні властивості, вагові коефіцієнти, а також впливу кліматичних умов, фізичного стану покриття. Температурні зміни, неоднорідність матеріалів у шарах, наявність тріщин, колій, порожнин під плитами чи обмежень передавання навантаги значно змінюють результати прогину, що впливає на розрахунки.

Ключові слова: FFWD, обернений розрахунок, модуль пружності, покритв, дефекти, температура залежність.

Abstract. The evaluation of pavement structural condition is essential for ensuring safe operation, timely detection of defects, and informed decision-making regarding maintenance and rehabilitation. One of the primary and most effective methods for such assessment is the backcalculation of pavement layer moduli based on the results of testing with a Fast Falling Weight Deflectometer (FFWD). This method allows for indirect, non-destructive determination of the actual load-bearing capacity of pavement structures.

Objective. To analyze the influence of input data — including specified thicknesses of structural layers, surface temperature during testing, type and duration of loading impulse, condition of interlayer bonding, and load positioning relative to deformation — on the results of backcalculated elastic moduli derived from FWD data.

The paper examines key factors affecting the accuracy and reliability of backcalculation outcomes. Particular attention is paid to the role of input parameters such as modulus values, interlayer adhesion, weighting coefficients, as well as the influence of climatic conditions and the physical state of the pavement. A theoretical review of scientific and technical literature was conducted, alongside a synthesis of recent experimental studies. The impact of various factors — such as geometric characteristics of layers, temperature, surface and subsurface defects, measurement parameters, and data processing methods — on the accuracy of the backcalculated results is assessed. Variations in temperature, material heterogeneity, presence of cracks, ruts, voids beneath slabs, or poor load transfer conditions significantly affect deflection results and, consequently, the accuracy of computed moduli.

Keywords: FFWD, backcalculation, elastic modulus, pavement, defects, temperature dependency.

Вступ

В умовах інтенсивної експлуатації дорожніх покриттів постає завдання оцінити їхню фактичну несну здатність без руйнувань. Одним з основних методів є обернений розрахунок модулів пружності шарів конструкції на основі вимірної деформаційної реакції покриття (чаші прогинів) від дії динамічного навантаження Falling Weight Deflectometer (FWD).

Обернений розрахунок модулів пружності шарів покриття за даними вимірювань FWD є основним методом непрямого оцінювання несної здатності конструкції. Проте на

точність отриманих результатів суттєво впливають вхідні параметри: температура, товщина шарів, стан міжшарових зчеплень, розташування датчиків, форма імпульсу навантаги та інші.

Основна частина

Через складність безпосереднього лабораторного випробування всіх шарів по-криву в польових умовах широко застосовується метод оберненого розрахунку (беккалькуляції) на основі вимірної реакції покриття на динамічну навантагу. Для цього найчастіше

використовується обладнання типу FWD, яке дозволяє відтворити імпульсне навантаження, подібне до навантаження від реального колеса.

Метод оберненого розрахунку базується на підборі таких значень модулів пружності шарів конструкції, за яких обчислені деформації (прогини) покриву максимально близькі до вимірних. Однак точність отриманих значень суттєво залежить від точності заданих геометричних, фізико-механічних, температурних та контактних характеристик, що в більшості випадків мають наближений, не точний, характер.

Цей метод полягає у знаходженні набору модулів пружності шарів багат шарової конструкції, при якому розрахункове значення вертикальних переміщень (прогинів) у контрольних точках найбільш наближається до виміряного значення, отриманого під час навантаження FWD.

Виміряна чаша прогину шляхом застосування імпульсного навантаження представляє загальну реакцію шарів покриву. Форма чаші прогинів та максимальний прогин можуть бути використані для швидкого та легкого оцінювання несної здатності покриву. Високі значення прогинів часто пов'язані зі слабким покриттям, але вивчення точної форми може надати інформацію про міцність окремих шарів. Незважаючи на те, що процеси проектування на основі максимального відхилення забезпечують надійність аналізу, вони мають значні обмеження. Максимальний прогин показує, як загальна конструкція покриву реагує на навантаження, але це не відображає реакцію окремих шарів, зокрема, чи будуть вони чинити опір втомі або постійній деформації.

Параметром, який впливає на чашу прогинів, є величина прикладених навантажень.

Хоча рівень навантаження може варіюватися від 7 кН до 240 кН, легкі навантаги часто не відображають повної реакції нижніх шарів, таких, як земляне полотно та основа. Це особливо актуально для жорстких покриттів. У таких випадках оцінювання, виконані з недостатнім навантаженням, дають неточні дані. Під час аналізування отриманих даних про прогин часто припускається, що всі шари конструкції реагують як лінійно-пружні. Для більшості конструкцій і умов випробувань таке припущення є обґрунтованим, оскільки більшість матеріалів демонструють лінійно-пружну

реакцію у межах навантажень, які застосовуються під час випробувань. Імпульсне навантаження має коливатися від 90 кН до 240 кН, за умови, що максимальний діапазон навантаження не перевищено.

Рекомендується, щоб тестове навантаження було не менше за половину розрахункового навантаження, визначеного за допомогою аналізування інтенсивності руху та відповідних прогнозувань. Розрахункове навантаження може бути визначено перед виконанням випробування, проаналізувавши інтенсивність руху на ділянці, що перевіряється, та оцінивши майбутнє використання конструкції запроєктованим транспортом. При цьому слід врахувати не лише ті транспортні засоби, що найчастіше використовуються, але й категорії з підвищеним навантаженням, що може суттєво впливати на довговічність конструкції.

Під час виконання оберненого розрахунку в розрахункову модель закладаються певні припущення:

- конструкція має шарувату структуру (2–5 шарів);
- шари є однорідними, ізотропними та пружними;
- у деяких випадках передбачається пружно-пластична поведінка нижніх шарів;
- між шарами – ідеальна адгезія,
- у зоні навантаги відсутні тріщини та дефекти.

Ці дані суттєво впливають на результати і мають бути обґрунтовані під час аналізу.

Одним із основних факторів впливу є геометричні параметри конструкції покриву, зокрема товщина окремих шарів.

Точність визначення товщини кожного шару є одним із головних чинників, що впливають на достовірність оберненого розрахунку. Похибка у 10–15% товщини верхнього шару може спричинити відхилення розрахованого модуля на 20–30% [7]. Якщо товщина верхнього шару завищена, алгоритм беккалькюляції може занижувати його модуль, намагаючись компенсувати більшу товщину меншим модулем.

Нестабільність зростає, якщо товщина шарів визначена непрямыми методами, такими як георадар (GPR), який має похибку, що залежить від типу матеріалу і глибини розміщення.

Помилки у товщині більш критичні для верхніх шарів [2], адже вони безпосередньо

впливають на форму профілю прогину (рис. 1) і передачу навантаження на нижні шари.

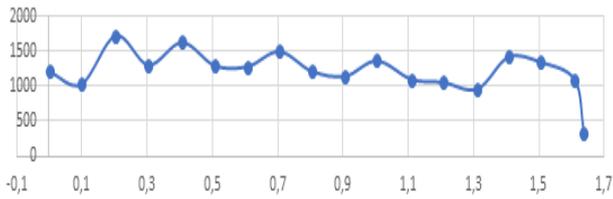


Рис. 1. Прогини на поверхні конструкції

На практиці рекомендується поєднувати дані георадарного зондування (GPR) з контрольним бурінням кернів (рис. 2), а також перевіряти точність отриманих товщин з урахуванням проектної документації.



Рис. 2. Зображення керна конструкції

Під час проведення досліджень було виконано буріння кернів у точках випробувань, які мали товщини зображені на рис. 3, що свідчить про значну розбіжність у товщинах конструктивних шарів та призводить до похибки під час оберненого розрахунку.

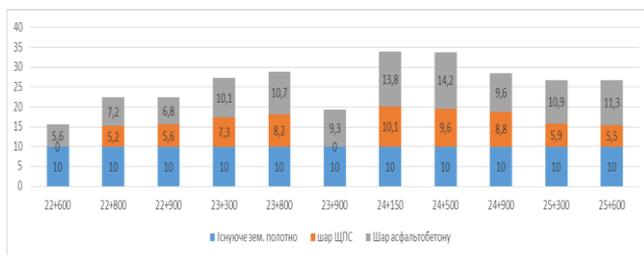


Рис. 3. Порівняння товщин шарів

Клімат має суттєвий вплив на вимірювання відхилення методом FWD. Насамперед температура впливає на прогини як нежорсткого, так і жорсткого покриття. У випадку нежорсткого покриття з асфальтобетону – в'язкопружного матеріалу, температура є

найважливішим фактором, що визначає співвідношення навантаження та прогину. За умови підвищення температури покриття стає м'якшим і демонструє більший прогин під певним навантаженням, ніж за нижчих температур.

У випадку жорсткого покриття вплив температури проявляється через температурний градієнт поблизу стиків та тріщин. Підвищення температури призводить до розширення, що викликає зтягування стиків і, як наслідок, зменшення прогину. Прогин може змінюватися через скручування плит. Під час зниження температури поверхня жорсткого покриття стискається, що призводить до збільшення прогину на краях та кутах.

Асфальтобетонні матеріали мають виражену температурну залежність модулів пружності: з підвищенням температури модуль зменшується в рази. Тому важливим етапом є температурна корекція значень прогинів або модулів відповідно до стандартних умов, зазвичай 20 °C [1]. Такі температурні поправки запропоновано в FHWA-LTPP Protocol P07 [3].

Температурна корекція зазвичай виконується відносно еталонної температури (20°C), з використанням експериментально визначених температурних коефіцієнтів (α), які залежать від типу асфальтобетону:

$$E(T) = E(20^\circ) \cdot 10^{-\alpha(T - 20)}, \quad (1)$$

де α – температурний коефіцієнт (0,02–0,045 залежно від типу суміші) [3].

Несвоєчасне або відсутнє урахування температури призводить до похибки. Вимірювання температури рекомендується проводити безпосередньо перед випробуваннями FWD з використанням інфрачервоних термометрів або термопар та за можливості враховувати температурний градієнт на глибині покриття.

Невиконання температурної корекції може призвести до заниження модулів у 2–3 рази [4].

Крім того, на прогин впливають пори року. Для холодного регіону можна виділити чотири періоди. Під час зимового сезону, коли настають глибокі морози, конструкція перебуває у найбільш жорсткому стані, і прогин в цей період найменший. Коли починається весняна відлига, мороз починає зменшуватися, і прогин поступово збільшується. На початку літа

надлишок води від танення виходить із конструкції, через що прогин зменшується. Період повільного відновлення міцності триває з пізнього літа до осені, коли відхилення повільно вирівнюються через поступове зменшення вмісту вологи. У регіонах, де покрив не піддається циклам заморожування-розморожування, прогин змінюється за синусоїдальною кривою: він збільшується у вологий сезон через високий вміст вологи, тоді як у сухих регіонах більший прогин спостерігається влітку через розм'якшення покриття під впливом високої температури.

Зі зростанням температури прогини також збільшуються. Для однієї й тієї ж ділянки прогини, виміряні влітку, значно вищі, ніж прогини, виміряні взимку. Тому під час використання прогинів для оцінювання конструктивних характеристик покриття слід скоригувати прогини з урахуванням контрольної температури. Скоригований прогин краще відображає міцність покриття, розраховану за допомогою оберненого розрахунку. Цей метод називається першою корекцією температури. Зазвичай прогини слід спочатку нормалізувати, щоб мінімізувати вплив інших факторів (вологість, пошкодження шарів, старіння тощо) на модель залежності прогину від температури.

Для точного моделювання температурної корекції прогину необхідно визначити репрезентативну температуру покриття. Температура асфальтобетонного шару змінюється з глибиною, і вплив температури на напружений стан є більш значним, якщо товщина покриття більша. Для представлення температури асфальтобетонного шару вибирається температура на певній глибині. Різні дослідники мають різні думки щодо того, яку глибину вибрати. Балтцер, Стубстад та ін. брали температуру верхньої третини асфальтобетонного шару як репрезентативну температуру та отримали хороші результати. Нурельдін та ін. виявили, що температура поблизу центру асфальтобетонного шару може представляти фактичну температуру всього шару. Кім та Парк досліджували вплив різних величин навантаження на коефіцієнти корекції температури прогину та отримали лінійну залежність між прогином та температурою в середньому асфальтобетонному шарі в напівлогарифмічних координатах.

Сучасні моделі прогнозування температури асфальтобетонного покриття можна

розділити на дві категорії: методи математичної статистики та теоретичні методи. Метод математичної статистики полягає у використанні фактично виміряної температури покриття в поєднанні з метеорологічними даними на той момент часу для визначення формули розрахунку температури покриття за допомогою регресійного аналізу. Теоретичний метод виводить вираз температури покриття на основі принципу теплопередачі термодинамічних властивостей та метеорологічних даних матеріалу покриття. Порівнюючи ці два методи, метод математичної статистики є відносно простим, тоді як теоретичний метод є занадто складним. Хоча метод математичної статистики має певні особливості: він показав свою ефективність для регіонів зі схожим кліматом.

Отримати обґрунтовані розрахункові модулі пружності для бітумних поверхневих шарів товщиною менше за 75 мм може бути складно. Якщо загальна товщина бітумного шару менша ніж 75 мм, модуль бітумного шару слід фіксувати з урахуванням наведених даних (табл. 1), щоб виконати обернений розрахунок модулів основи та земляного полотна.

Таблиця 1

Залежність модулів пружності асфальтобетонного покриття від температури

	Температура (°C)	Модуль пружності (Мпа)
1	-7	17 852
2	-1	15 066
3	4	11 881
4	10	8 754
5	16	6 027
6	21	3 878
7	27	2331
8	32	1309
9	38	687

Теоретично обернений розрахунок кожного окремого бітумного шару можливий, але зазвичай це не рекомендується через складність оцінювання більше трьох або чотирьох шарів конструкції. У більшості випадків усі бітумні шари слід об'єднати в один узагальнений шар. Винятком є ситуації, якщо шар асфальтобетону має пошкодження. Наявність дефектів (рис. 4) зменшує значення обернено розрахованих модулів. У таких випадках може

знадобитися відбір керн для підтвердження наявності відшаровування.



Рис. 4. Пошкодження покриття

Вплив стану покриття на вимірювання прогину є значним. Під час визначення прогину нежорсткої конструкції результати зазвичай завищені, якщо вона має пошкодження у вигляді тріщин або утворення колій. У випадку жорсткої конструкції наявність порожнин під плитою спричиняє збільшення значення прогину. Крім того, на прогин такого покриття може впливати недостатня передача навантаження вздовж стику плит. Вимірювання прогину на ділянках поблизу або безпосередньо над водопропускальними трубами також демонструють більші значення, ніж очікувалося. Аналогічно, прогини поверхні покриттів у зонах насипу можуть бути не точними, що впливає на достовірність результатів.

Рекомендується додатково аналізувати стан покриття на наявність дефектів (розшарування, тріщини), що значно впливає на чашу прогинів та відповідно на результати оберненого розрахунку. Дослідження показали, що навіть від незначних дефектів у верхньому шарі форма прогину змінюється настільки, що одержані модулі втрачають фізичний зміст [4].

Жоден із наявних методів аналізу безпосередньо не враховує впливу температури або вологості в процесі оберненого розрахунку. Тому рекомендується проводити випробування FWD, коли немає значного градієнта температури (наприклад, коли температура навколишнього повітря нижча за 27 °C), щоб уникнути впливу на результати оберненого розрахунку. Однак, уникнення градієнта температури не вирішить проблеми скручення плити, що може бути присутнім у конструкції.

Обмеження щодо товщини, пов'язані з оберненим розрахунком значення модуля пружності для бетонних покриттів, відсутні.

Наявність тонкого шару основи під товстим поверхневим шаром асфальтобетону або цементобетону часто призводить до занижених модулів пружності основи. Це може бути пов'язано з низькою реакцією основи через жорсткий верхній шар, або ж може бути, що модуль основи занижений через залежність зернистих матеріалів від рівня напруження. У таких випадках доцільно об'єднати основу з земляним полотном та провести обернений розрахунок як для двошарової системи. Якщо ж необхідно розрахувати окремо шар основи, включення жорсткого шару в модель оберненого розрахунку може допомогти визначити модуль пружності основи.

Якщо за результатами оберненого розрахунку визначається надзвичайно високий модуль пружності земляного полотна, ділянку слід дослідити на предмет можливої наявності неглибокого шару порід/жорсткої породи або високого рівня ґрунтових вод (рис. 5).



Рис. 5. Дослідження земляного полотна

Тип зчеплення між шарами (повна адгезія, часткове зчеплення або ковзання) суттєво змінює розподіл напружень у конструкції.

Ідеальна адгезія означає, що шари працюють як єдина цілісна конструкція, це підвищує несну здатність.

У разі часткового або повного ковзання між шарами ефективність передачі навантаження падає, що призводить до збільшення прогинів і розподілу напружень, який відрізняється від моделі ідеальної адгезії.

Зазвичай у моделюванні беккалькуляції використовують різні граничні умови: повне зчеплення, ковзання з коефіцієнтом тертя або повне розділення.

Якщо виявлено тріщини, відремонтовані ділянки, холодні шви, потрібно враховувати ослаблене міжшарове зчеплення в моделюванні.

Програмні комплекси такі, як ELMOD, дозволяють моделювати варіанти з ідеальним зчепленням, частковим ковзанням або повною декореляцією шарів [5]. Некоректний вибір моделі взаємодії призводить до похибок у визначенні модулів: наприклад, застосування моделі з ковзанням зазвичай призводить до зменшення розрахованих модулів несних шарів на 15–25% [6].

Окрему увагу приділяють впливу налаштувань випробувань FFWD: параметрам імпульсного навантаження, жорсткості плити навантаження, радіусу контакту та позиціонуванню геофонів. Відомо, що зміна конфігурації геофонів може впливати на чутливість до різних шарів і, як наслідок, змінювати точність розрахунку глибоких шарів [7].

Динамічний характер навантаження FWD має особливості, які необхідно враховувати при моделюванні. Імпульс FWD триває близько 25–30 мілісекунд і створює силове навантаження з піковою величиною, що призводить до динамічних реакцій.

Застосування класичних статичних моделей для беккалькуляції може ігнорувати частотні ефекти, що призводить до невірної оцінювання деформацій і, відповідно, модулів.

Для покращення точності розрахунків застосовують методи динамічного моделювання, які враховують часові характеристики навантаження, наприклад, використання спектрального аналізу або корекційних коефіцієнтів.

Параметри FWD (діаметр навантажувальної плити, розташування датчиків, вага навантаги, місця випробувань та отримані прогини) необхідно коректно фіксувати та вводити у модель, щоб точно відтворити умови випробувань.

Припустимо, що під час випробування імпульс має меншу тривалість (наприклад, 20 мс) через погане зчеплення плити з поверхнею. Це змінює частотну характеристику деформацій: частотна чутливість бітумних матеріалів означає, що вони поведуться жорсткіше

при коротких імпульсах. Якщо не застосувати нормалізацію до умов стандартного імпульсу, модуль пружності E буде завищеним.

Рекомендація: контролювати час імпульсу та амплітуду кожної точки випробування, застосовувати корекції частотних ефектів.

Величина навантаження та тривалість відіграють важливу роль у вимірюванні прогинів FWD. Прилад FWD призначений для визначення реакції покриття на інтенсивність навантаження. Транспортне навантаження може бути від автомобіля або літака.

Отже, найважливіше полягає в тому, що випробувальне навантаження має бути максимально наближеним до фактичного навантаження, яке діє на покриття у реальних умовах. Нелінійна або напружено-чутлива поведінка матеріалів покриття ускладнює залежність між прикладеним навантаженням і величиною прогину. Зазвичай дорожній покриття зазнає навантажень різної інтенсивності. Тому, якщо випробування проводиться при одному рівні навантаження, але необхідно оцінити прогин при більшому навантаженні, виникає потреба в екстраполяції результатів.

Щоб це зробити, застосовують різні кореляційні або регресійні рівняння, які дозволяють пов'язати прогини, отримані при легшому навантаженні, з тими, що могли б бути при більшому. Проте через особливості будівництва та місцеві кліматичні умови такі кореляції можуть відрізнятися навіть для одного й того самого типу покриття. Також вагомий вплив має вибір математичної моделі розрахунку та оптимізаційного алгоритму.

Найбільш поширеним методом є використання багат шарових лінійно-пружних моделей, які реалізуються, зокрема, у програмних забезпеченнях ELMOD, EVERCALC, MODULUS, BackLayer, але ці методи не враховують в'язкопружність матеріалів і можуть давати значні похибки [5]. З метою підвищення точності запропоновано використовувати чисельні методи. Зокрема, метод скінченних елементів, який враховує геометричні параметри, тріщини, контактні умови та температурні поля [6].

Висновки

Вибір початкових значень модулів, функцій нев'язкості та вагових коефіцієнтів має важливе значення для точності оберненого розрахунку. Якщо отримано нестабільний результат, рекомендується провести кілька

незалежних спроб з різними початковими параметрами і взяти середнє значення. Це дослідження показало, що не варто очікувати повної відповідності між лабораторними випробуваннями і розрахунками, адже матеріали покриття не завжди однорідні, що впливає на різницю отриманих результатів. Зазвичай модулі пружності, отримані з польових випробувань, є точнішими і краще підходять для проектування, тому що під час відбору проб для лабораторії матеріал може пошкоджуватися.

Значну роль під час оберненого розрахунку відіграє вибір початкових значень модулів, зчеплення шарів, вагових коефіцієнтів. Усі ці фактори вказують на необхідність комплексного підходу до побудови моделі оберненого розрахунку: точного визначення геометричних і фізичних параметрів шарів, температурного аналізу, контролю стану покриття, вибору чисельної моделі. Лише поєднання цих елементів забезпечує достовірність результатів діагностування та оцінювання покриття за випробувань результатами FWD.

References

1. Kim, J. R., Daniel, J. S. (2025). Sensitivity of Backcalculated Layer Moduli to Pavement Layer Thickness. *Int. J. of Pavement Engineering*.
2. Von Quintus, H. L., Killingsworth, B. M. (2000). *Nondestructive Testing of Pavements Using the FWD*. FHWA Report.
3. FHWA-LTPP Protocol P07. *Temperature Corrections for AC Layer Moduli*. Federal Highway Administration, 2005.
4. Chou, Y. T., Michalak, C. H. (1987). *Deflection Basin Measurement Errors Due to Surface Defects*. TRR, 1136.
5. Romanoschi, S., Metcalf, J. *Using Genetic Algorithms for Pavement Backcalculation*. ASTM, 2003.
6. Maina, J. W., Matsui, K. (2004). *Application of FEM in Backcalculation of Pavement Layer Moduli*. JTE-ASCE.
7. Leng, Z., Al-Qadi, I. L. (2012). *GPR Indices for Asphalt Concrete Evaluation*. NCHRP Report 630.
8. FHWA. (2006). *LTPP Data Analysis: Seasonal Variations of Temperature and Moisture in Pavements*. FHWA-HRT-06-079.
9. AASHTO. (2003). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.
10. Shell International Petroleum. (1985). *Shell Pavement Design Manual*.
11. Dynatest Consulting Inc.. (2020). *ELMOD 6 Reference Manual*.

© Т. А. Терещенко, канд. хім. наук,
провідний науковий співробітник,
ORCID: 0000-0001-7584-9031,
e-mail: chemistry@nidi.org.ua
(ДП «НІДІ»)

© Tatyana Tereshchenko, Candidate of Chemical
Sciences (PhD), Senior Research Officer,
ORCID: 0000-0001-7584-9031,
e-mail: chemistry@nidi.org.ua
("NIDI" SE)

ПОШКОДЖЕННЯ ТА ДЕФЕКТИ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ. ТЕРМІНОЛОГІЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

DISTRESSES AND DEFECTS OF A ROAD PAVEMENT. TERMINOLOGY AND ASSESSMENT OF THE ROAD PAVEMENT CONDITION

Анотація. Світова практика дорожнього будівництва засвідчує, що ідентифікація пошкоджень та дефектів дорожнього одягу є основою стратегії експлуатаційного утримування, виконання ремонтів і реконструкції автомобільних доріг. Результати такої роботи дозволяють проводити експертне оцінювання стану дорожнього одягу на підставі кількісних критеріїв – індексів стану дорожнього одягу (PCI). Разом з тим результати ідентифікації пошкоджень і дефектів дорожнього одягу є одним зі складників аудиту безпеки доріг згідно з європейськими регуляторними актами щодо управління безпекою дорожньої інфраструктури.

З урахуванням міжнародних практик у статті виконано стислий аналіз об'єктів стандартизації, які забезпечують узгодженість стратегій обстеження, експлуатаційного утримування й виконання ремонтів та реконструкції автомобільних доріг: стандартної термінології щодо пошкоджень та дефектів дорожнього одягу і загальних підходів до кількісного оцінювання стану дорожнього одягу. На підставі результатів аналізу надано висновки щодо доцільності впровадження відповідних практик на рівні національних стандартів.

Ключові слова: дефекти дорожнього одягу; дорожній одяг; індекс стану дорожнього одягу; пошкодження дорожнього одягу; рівень ураження; стан дорожнього одягу.

Abstract. The paper is aimed on recent approaches for the categorization of road pavements distresses and defects for purposes of their identification and road pavement condition estimation to determine the technical and economic strategy for maintenance, repair and rehabilitation of motor roads.

The analysis of the categorization of road pavement damage and defects was performed, on the basis of which approaches to identifying damage and defects of the asphalt concrete road pavements and jointed concrete road pavements as well as the approaches to determining the severity levels were stated. Also the possibilities for using the results of survey of motor roads with estimating the distresses and defects severity level for an extended qualitative evaluation of road pavements by the pavement condition indexes were briefly analyzed.

Conclusions state the necessity for implementation of the world-wide practice of road pavements condition survey and estimation in two interrelated objects of a standardization at national level: development of a national terminology standard for damage and defects in road surfaces, which will ensure the consistency with terminology of various standardization systems; development and implementation of internationally recognized standard schemes for quantitative assessment of road surface condition, which will ensure the consistency of operational maintenance strategies and the implementation of repairs and reconstruction of highways.

Keywords: road pavement; road pavement condition; road pavement condition index; road pavement defects; road pavement distresses; severity level.

Вступ

Ідентифікація пошкоджень і дефектів та визначення рівня ураження є елементами системи управління станом дорожнього одягу, де за результатами оцінювання стану розробляють стратегічні рішення з експлуатаційного утримування, ремонтування та реконструювання автомобільних доріг. Згідно зі світовою практикою відповідні технічні та економічні рішення ґрунтовано на результатах експертного оцінювання стану дорожнього одягу за кількісними критеріями – індексами стану дорожнього одягу (PCI).

Разом з тим результати ідентифікації пошкоджень і дефектів дорожнього одягу є одним зі складників аудиту безпеки доріг відповідно до європейських регуляторних актів щодо управління безпекою дорожньої інфраструктури [1, 2].

Враховуючи викладене, а також наявність міжнародних стандартів [3, 4]²⁾, у цій

²⁾ Згідно з інформацією, наведеною за посиланням <https://store.astm.org/e1778-98ar24.html>, в [3] встановлено терміни та визначення понять для пошкоджень будь-якої функціональності для летовищ, автомагістралей та автомобільних доріг інших категорій, вулиць та стоянок авто-

статті розглянуто структуру категоризації пошкоджень та дефектів дорожніх одягів різних типів і практики оцінювання стану дорожнього одягу для визначення потреби в опрацюванні та впровадженні відповідних стандартних вимог на національному рівні, що дозволить забезпечити узгодженість підходів до ідентифікації дефектів та пошкоджень дорожнього одягу, оцінювання стану дорожнього одягу і стратегії виконання ремонтів та реконструкції автомобільних доріг для різних систем стандартизації.

Загальні підходи до категоризації пошкоджень та дефектів дорожнього одягу

Категоризацію пошкоджень та дефектів дорожнього одягу (далі – пошкодження та дефекти) виконують роздільно для дорожніх одягів з асфальтобетонним і бетонним покритвом. До першого випадку згідно з Наставною [5] відносять також асфальтобетонні покриття, влаштовані на шарі бетону. Для бетонних покриттів пошкодження та дефекти категоризують роздільно для шовних бетонних покриттів і безперервно армованих бетонних покриттів.

В основоположних роботах з цього напрямку [4] зазначено, що з метою виконання категоризації пошкоджень і дефектів дорожнього одягу встановлюють номенклатуру не тільки власне пошкоджень та дефектів, але й номенклатуру елементів дорожньої конструкції як обов'язкового складника такої категоризації.

За результатами практичного застосування стандартної категоризації пошкоджень та дефектів реєструють факт наявності пошкодження та/або дефекту або визначають рівень ураження (*severity level*) дорожнього одягу [5, 6].

Під час роботи над матеріалом статті вжито відповідники найбільш часто застосовуваних за зазначеною тематикою англійських термінів *pavement defects* (також *pavements deficiencies*) і *pavement distresses* – «дефекти дорожнього одягу» та «пошкодження дорожнього одягу» відповідно.

транспортних засобів, проте в цій статті з урахуванням матеріалів, наявних у вільному доступі, розглянуто положення стосовно дорожніх одягів.

Пошкодження та дефекти дорожнього одягу з асфальтобетонним покритвом

Згідно з [5] виділено п'ять категорій пошкоджень та дефектів дорожнього одягу з асфальтобетонним покритвом: розтріскування; ремонтні латки та вибоїни; деформація поверхні; дефекти поверхні; пошкодження змішаного типу.

Категорія «розтріскування» (*cracking*) охоплює такі типи пошкоджень: поперечне розтріскування, поздовжнє розтріскування, втомне розтріскування, блочне розтріскування, розтріскування крайок [проїзної частини] і розтріскування з утворенням відображеної тріщини – результатом останнього є тріщини над розташованими нижче швами бетонних плит, проте для ідентифікації такої тріщини необхідно знати місце розташування шва. Розтріскування крайок віднесено до номенклатури дефектів виключно для конструкцій з узбіччям без монолітного покриття.

В окремих першоджерелах [7] описано також утворення помережених тріщин (*alligator cracking, alligatoring*, згідно зі словниками – також «утворення дрібних тріщин») (рис. 1).

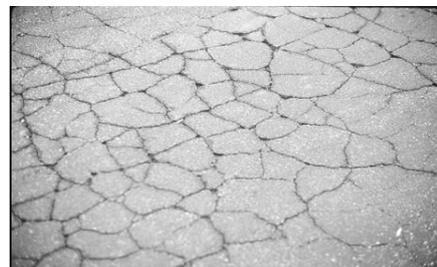


Рис. 1. Сітка дрібних тріщин (помережені тріщини)

Помережені тріщини описано як такі, що утворюються обабіч основних тріщин у процесі втомного розтріскування або як прояв більш пізніх стадій втомного розтріскування; у першоджерелі [5] цей вид розтріскування не розглядають.

Важливою є інформація щодо відмінностей між блочними тріщинами (рис. 2) і сіткою дрібних тріщин – автори [7] зазначають, що утворення блочних тріщин призводить до утворення на покритті «блоків» переважно прямокутної форми з довжиною сторони орієнтовно від 0,3 м до 3 м (у роботі [5] «блоки» характеризують розміром площі); блочні трі-

щини з часом розвиваються на всю товщину шару асфальтобетону.



Рис. 2. Блочні тріщини

Під час проведення ідентифікації дефектів згідно з [5] для всіх типів пошкоджень категорії «розтріскування» визначають рівень ураження з кількісним оцінюванням у одиницях довжини або площі, за винятком розтріскування з утворенням відображених тріщин.

Категорія «ремонтні латки та вибоїни» (*patching and potholes*) відповідно до [5] охоплює, зокрема, ремонтні латки як пошкодження з певним обмеженням щодо розміру площі, де ремонтна суміш обов'язково містить заповнювач. Відремонтовану ремонтною латкою ділянку без дефектів характеризують як низький рівень ураження. Пошкодження/ремонтні латки ідентифікують також для ділянок, відремонтованих на всю ширину смуги, якщо довжина ділянки не перевищує певного значення (у протилежному випадку це є шар перекриття).

Вибоїни характеризуються певними обмеженнями за розмірами; оскільки цей тип пошкоджень має чашоподібну форму, розмір описують як діаметр кола, яке повністю охоплює вибоїну за контуром.

Категорія «деформація поверхні» (*surface deformation*) згідно з [5] охоплює колю та нерівності у вигляді горбкуватості. Колю характеризують за глибиною, проте умови випробувань (вимірювання) в різних системах стандартизації дещо різняться. Горбкуватість є деформацією, що виникає переважно на ділянках зі значним висхідним/низхідним градієнтом у поздовжньому профілі, а також у зонах гальмування та на поворотах. Рівень ураження може бути оцінено за впливом на їздові якості.

Категорія «дефекти поверхні» (*surface defects*) охоплює виступання бітуму, відполірованість заповнювача та викришування ма-

теріалу [5]. Дефекти поверхні можуть утворюватися водночас із розтріскуванням. Перший та останній дефекти поверхні асоціюють із неналежним кількісним та/або якісним складом асфальтобетону.

Дефект «викришування» може поєднуватися з дефектом «старіння» – в роботі [7] викришування та старіння характеризують як процес прогресуючого руйнування асфальтобетонного покриття внаслідок втрати заповнювача і бітуму, що розвивається вглиб шару асфальтобетону і який спричинено втратою адгезії між заповнювачем і бітумом.

Категорія «пошкодження змішаного типу» (*miscellaneous distresses*) відповідно до [5] охоплює спад до узбіччя на стику з проїзною частиною – такий спад у поперечному профілі підлягає вимірюванню – і викиди води / води з дрібними фракціями дисперсного матеріалу на поверхню крізь тріщини в монолітних шарах дорожнього одягу.

Пошкодження та дефекти дорожнього одягу з шовним бетонним покритвом

Згідно з [5] виділено чотири категорії пошкоджень та дефектів жорсткого дорожнього одягу з шовним бетонним покритвом з армованими або неармованими плитами: розтріскування; дефекти шва; дефекти поверхні; пошкодження змішаного типу.

Категорія «розтріскування» охоплює чотири типи пошкоджень: кутові (наріжні) розломи; розтріскування внаслідок неналежної довговічності; поздовжнє розтріскування; поперечне розтріскування. Кутовий розлом ідентифікують як тріщину, що перетинає суміжні поздовжній і поперечний шви та довжина пошкодженої наріжної ділянки вздовж країв плити не перевищує половину ширини плити.

У роботі [7] підкреслено, що кутовий розлом є вертикальною тріщиною на всю товщину бетону – на відміну від кутових відколів, де пошкодження охоплює лише частину шару бетону за товщиною. Кутовий розлом є втомне руйнування плити внаслідок циклічного впливу навантаження й може бути обумовлений також наявністю порожнин під плитою і слабкою, нестабільною основою.

Розтріскування внаслідок неналежної довговічності, або *D*-розтріскування (*durability cracking, D-cracking*), рис. 3, спостерігається переважно як результат впливу циклічного

заморожування-відтавання, наявності води в основі дорожнього одягу, властивостей і розміру крупного заповнювача.



Рис. 3. D-розтріскування бетонного покритву

Згідно з [7] виявлено негативний ефект від впливу заповнювачів з осадових гірських порід вапняків та доломітів, а такі чинники, як характеристики дрібних заповнювачів, уміст утягнутого повітря та марка і склад цементу практично не впливають на виникнення D-розтріскування.

Поздовжнє розтріскування відбувається майже паралельно до осьової лінії і може бути спричинене нестабільністю основи (осідання, здимання), неналежним проектуванням плит (надлишкова ширина), або утворюються як тріщини, що з'єднують наявні поперечні або діагональні тріщини; відповідно до [7] поздовжнє розтріскування бетонного покритву здебільшого не має характеру втомного розтріскування. Рівень ураження для цього типу пошкоджень залежить переважно від ширини тріщини, наявності і розміру відколів бетону і вертикального зміщення в зоні тріщини [5]. Під час ідентифікації цього типу пошкодження має значення відстань від шва.

Поперечне розтріскування відбувається майже перпендикулярно до осьової лінії. Для цього типу пошкодження ідентифікацію і визначення рівня ураження виконують аналогічно до поздовжнього розтріскування [5]. У роботі [7] зазначено, що цей тип пошкоджень є особливо характерним для шовного неармованого бетонного покритву; автори асоціюють поперечне розтріскування зі втомним руйнуванням. Оскільки найбільше напруження від коліс транспортних засобів виникає на зовнішньому краю плити, на середині між по-

перечними швами, поперечне розтріскування відбувається переважно на середині плити. Автори [7] вказують на різний характер розвитку поперечних тріщин для армованого і неармованого бетону плити. В армованому бетоні поперечні тріщини утворюються на ранніх стадіях внаслідок усадки висушування (для шовного бетонного покритву з армованими плитами – переважно на середині плити) і в подальшому, під дією циклічних навантажень від коліс транспортних засобів та інших впливів, може відбуватися руйнування арматури в місці тріщиноутворення, розвивається вертикальне зміщення в зоні тріщини.

У першоджерелах [4, 7] номенклатура видів розтріскування охоплює також утворення сітки волосяних тріщин (*crazing*) – чинниками є неналежне опорядкування та/або надлишок цементного тіста на поверхні. Згідно з [7] під час ідентифікації цього типу дефекту потрібно переконатися, що він не свідчить про лужно-силікатні реакції заповнювача, оскільки у такому разі дефект поширюється на всю товщину бетонної плити.

Категорія «дефекти шва» (*joint deficiencies*) згідно з [5] охоплює руйнування герметика в шві і відколи/викришування в зоні шва, де обидва типи дефектів для ідентифікації розділяють для поздовжніх і поперечних швів.

Руйнування герметика шва ідентифікують за будь-яким станом, що уможлиблює проникнення твердих нестисливих матеріалів або значної кількості води з поверхні крізь шов – інфільтрацію. До типових дефектів шва належить повна втрата герметика, його екструзія зі шва, окрихчування внаслідок окислення, руйнування адгезійного або когезійного характеру, проникнення чужорідних матеріалів у шов а також зростання рослин у шві.

Відколи/викришування в зоні шва ідентифікують за ознаками: розтріскування, розломи, викришування та знос краю плити близько шва, у межах певної відстані від шва. Рівні ураження для поздовжніх та поперечних швів устанавлюють за різними критеріями.

Категорія «дефекти поверхні» відповідно до [5] охоплює три типи дефектів: сітка дрібних усадкових тріщин та лущення; відполірованість заповнювача; раковини.

Утворення сітки дрібних усадкових тріщин не впливає на несну здатність дорожнього одягу, їздові якості та довговічність, проте

розвиток такого дефекту призводить до виникнення лушення, що впливатиме на довговічність та їздові якості.

Лушення ідентифікують як руйнування бетону на глибину від 3 мм до 13 мм, яке може виникати у будь-якій частині бетонної плити (рис. 4).



Рис. 4. Лушення

Дефект «відполірованість заповнювача» проявляється в зниженні зчеплення колеса з поверхнею покриття. Ідентифікація дефекту зазначеного типу не є застосовною щодо бетонних покриттів, де виконано шліфування алмазними дисками, хоча загальний опис стану поверхні дорожнього одягу для обох випадків є ідентичним.

Раковини ідентифікують як дефекти поверхні діаметром орієнтовно до 100 мм і глибиною до 50 мм, що утворюються переважно внаслідок насичування водою приповерхневих зерен крупного заповнювача з подальшим розширенням під час замерзання і відривом бетону на поверхні. Раковини не впливають на несну здатність дорожнього одягу, їздові якості та довговічність, не потребують ремонту, проте можуть спричинити утворення тріщин з просочуванням води і посилювати явище *D*-розтріскування.

Категорія «пошкодження змішаного типу» згідно з [5] охоплює шість типів пошкоджень: здимання; вертикальне зміщення в зоні поперечних швів або тріщин; спад у бік узбіччя на стику з проїзною частиною; відділення узбіччя від проїзної частини; ремонтні латки / руйнування ремонтних латок; викиди води / води з дрібними фракціями дисперсного матеріалу на поверхню.

Здимання (рис. 5) є пошкодженням, прияманним покриттям з армованими бетонними плитами [7].



Рис. 5. Здимання бетонного покриття

У Настанові [5] здимання ідентифікують як локалізоване переміщення вгору поверхні плит у зоні поперечних швів або працюючих тріщин, яке часто супроводжується подрібненням бетону. У роботі [7] зазначено, що здимання відбувається, коли плити розширюються і водночас спостерігається повне закриття шва. Власне здимання, а також подрібнення бетону в місці локалізованого переміщення вгору поверхні плит є вкрай небезпечним пошкодженням і потребує негайного ремонту.

Вертикальне зміщення в зоні поперечних швів або тріщин ідентифікують вимірюванням на певних відстанях від зовнішньої крайки плити – орієнтовно по зовнішній смузі кочення коліс. Якщо висота на плиті за швом (з урахуванням напрямку руху) є більшою, ідентифікують вертикальне зміщення як позитивне, і навпаки.

Спад у бік узбіччя на стику з проїзною частиною ідентифікують як різницю висот на зовнішньому краї проїзної частини та суміжного узбіччя; найчастіше спостерігається внаслідок осідання узбіччя (рис. 6).



Рис. 6. Спад у бік узбіччя на стику з проїзною частиною

Цей тип пошкоджень підлягає вимірюванню (рис. 6), як і ширина тріщини в місцях відділення узбіччя від проїзної частини.

Ремонтні латки / руйнування ремонтних латок відповідно до [5] ідентифікують як пошкодження з певним розміром площі, проте до цього типу дефектів відносять і заміну плити. Визначення рівня ураження ґрунтовано переважно на наявності пошкоджень власне ремонтної латки і вертикального зміщення на стику ремонтної латки і бетонної плити.

Категоризацію пошкоджень та дефектів дорожнього одягу з безперервно армованим бетонним покритвом детально не розглянуто через обмеження обсягу публікацій та практичну відсутність такого типу конструкцій у мережі автомобільних доріг України.

Загальне оцінювання стану дорожнього одягу за результатами ідентифікації пошкоджень з установленням рівня ураження прийнято виконувати за методологією визначення індексів стану дорожнього одягу *PCI* (*Pavement Condition Index*), як це розглянуто нижче.

Практика оцінювання стану дорожнього одягу за показником *PCI*

Одним із кількісних критеріїв оцінювання стану дорожнього одягу є індекс стану дорожнього одягу *PCI*, який ґрунтовано на спостережених пошкодженнях дорожнього одягу; *PCI* не дозволяє оцінювати несну здатність конструкції або, наприклад, іздові якості (рівність поверхні) дороги, проте є раціональним підґрунтям для вибору ефективної стратегії з визначення обсягів і пріоритетності робіт з експлуатаційного утримування й виконання ремонтів та реконструкції автомобільних доріг. Відповідну практику впроваджено в системі стандартів *ASTM*, де стандартизовано метод обстеження з визначення *PCI* для автомобільних доріг і відкритих стоянок автотранспортних засобів [8] і окремо – для аеропортів [9].⁴⁾

На рис. 7 наведено шкалу оцінювання стану дорожнього одягу, як її представлено в роботі [10] з посиланням на стандарт *ASTM* [8] та з пропонуваними автором статті українськими термінами для позначення стану дорожнього одягу.

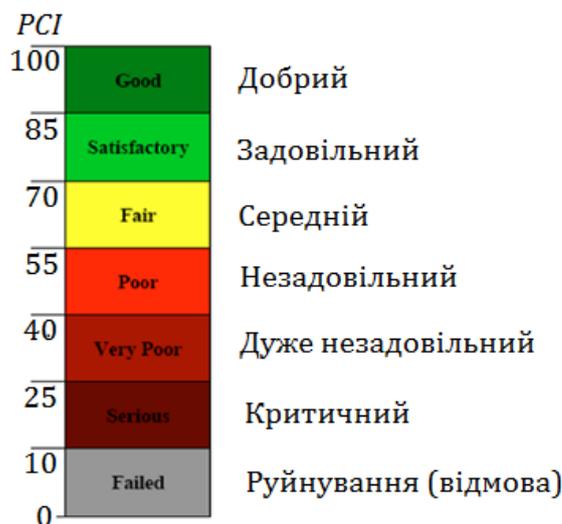


Рис. 7. Шкала оцінювання стану дорожнього одягу за *PCI*; англійська версія представлена авторами [10]

Для виконання стандартних обстежень з оцінювання *PCI* у системі стандартів *ASTM* упроваджено методологію застосування дедуктивних оцінок (*deduct values*), які є своєрідними ваговими коефіцієнтами, що дозволяють визначити «внесок» кожного наявного типу пошкодження, рівня ураження і щільності виникнення пошкодження у величину *PCI*; у цілому характер залежності значень *PCI* від величин дедуктивних оцінок є зворотним.

Згідно з даними [10, 11], для кожного типу пошкодження, відповідно до стандартизованої у [8] номенклатури пошкоджень, розроблено комплекс стандартних дедуктивних оцінок за низького, середнього та високого рівнів ураження, які видобувають за номограмами, що містять шкалу (вісь) щільності виниклих пошкоджень, криві рівнів ураження і шкалу (вісь) дедуктивних оцінок, що мають інтервал значень від 0 до 100.

Згідно з даними авторів [11] у розрахунках *PCI* у поширеній практиці застосовують спеціалізоване програмне забезпечення.

Під час виконання стандартних обстежень, які мають кінцевою метою визначення *PCI*, важливо раціонально виділяти ділянки, які будуть репрезентативними (однорідними) з точки зору конструкції дорожнього одягу, інтенсивності руху, експлуатаційного стану.

Кожна ділянка автомобільної дороги, з метою внесення даних і подальшої роботи з даними *PCI*, повинна мати належним чином задокументовані унікальні ідентифікатори: категорію, дані щодо геометричних параметрів

⁴⁾ У стандарті [9] згідно з інформацією, наведеною за посиланням <https://store.astm.org/d5340-23.html> на час роботи над цим матеріалом, стандартизовано величини в одиницях системи «дюйм-фунт».

рів дороги, дані щодо інтенсивності руху та складу транспортного потоку, дані щодо конструкції дорожнього одягу, архівні дані на час здійснення нового будівництва а також виконання робіт з будь-яких видів ремонтів, реконструкції, та щодо поточного стану дорожнього одягу, виходячи з останніх обстежень.

Висновки

Враховуючи викладене, доцільно на національному рівні забезпечити виконання робіт за двома взаємопов'язаними напрямками:

- розроблення національного термінологічного стандарту щодо пошкоджень та дефектів дорожнього одягу, який забезпечить узгодженість термінології різних систем стандартизації;

- розроблення та впровадження визначених у міжнародній практиці стандартних схем кількісного оцінювання стану дорожнього одягу, які забезпечать узгодженість стратегій експлуатаційного утримування й виконання ремонтів та реконструкції автомобільних доріг.

References

1. European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/96/EC on road infrastructure safety management 16.12.2019. Retrieved from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0096-20191216>
2. Frisoni, R., Dionori, F., Casullo, L., Vollath, C., Devenish, L., Spano, F., ... Stanghellini, A. (2014). European Parliament: Directorate General for Internal Policies. Policy Department b: structural and cohesion policies. Transport and tourism. Ip/b/tran/fwc/2010-006/lot1/c1/sc6. Eu road surfaces: economic and safety impact of the lack of regular road maintenance. Study, 230. Retrieved from: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2014/529059/IPOL_STU\(2014\)529059_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2014/529059/IPOL_STU(2014)529059_EN.pdf)
3. ASTM International. (2024). ASTM E1778-98a. Standard Terminology Relating to Pavement Distress, PA 19428-2959, United States.
4. Highway Research Board. National Research Council. National Academy of Sciences. National Academy of Engineering. (1970). Standard nomenclature and definitions for pavement components and deficiencies. Special Reports 113. Washington D.C., 39. Retrieved from: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr113.pdf>
5. Miller, J. S., and Bellinger, W. Y. (2014). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (Fifth Revised Edition). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. PUBLICATION №. FHWA-HRT-13-092, 146. Retrieved from: <https://highways.dot.gov/research/ltpdp/products/distress-identification-manual-long-term-pavement-performance-program-fifth-revised-edition>
6. Grivas, D. A., Schultz, B. C. and Waite, C. A. (1992). Determination of Pavement Distress Index for Pavement Management. Transportation Research Record, 1344, 75-80. Retrieved from:

trieved from:

<https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1344/1344-010.pdf>

7. Hall, K. T., Correa, C. E., Carpenter, S. H., Elliot, R. P. (2001). NCHRP Web Document 35 (Project C1 -38): Contractor's Final Report. Rehabilitation Strategies for Highway Pavements. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 152. Retrieved from:

https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w35-a.pdf⁵⁾

8. ASTM International. (2024). ASTM D6433-24 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys., PA 19428-2959, United States. 47.

9. ASTM International. (2024). ASTM D5340-24 Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys., PA 19428-2959, United States. 63.

10. Feras, A. R. Temimi, Ameer Hadi M. Ali, Amenah, Hasan. (2021). The Pavement Condition Index (PCI) Method for Evaluating Pavement Distresses of The Roads in Iraq – A Case Study in Al – Nasiriyah City University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences, 11, 2, 17–23. Retrieved from: [http://www.doi.org/10.31663/tqujes.11.2.394\(2021\)](http://www.doi.org/10.31663/tqujes.11.2.394(2021))

11. Mubarak, M. (2014). Identification of Pavement Distress Types and Pavement Condition Evaluation Based on Network Level Inspection for Jazan City Road Network. The Journal of Engineering Research, 11, 1, 44-54. Retrieved from: <https://www.researchgate.net/publication/293117823>

⁵⁾ Додаток А цього звіту розміщено за посиланням https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w35-b.pdf