

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ
ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
STATE AGENCY FOR RESTORATION AND INFRASTRUCTURE
DEVELOPMENT OF UKRAINE**

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ»
(ДП «НІРІ»)
STATE ENTERPRISE
«NATIONAL INSTITUTE FOR DEVELOPMENT INFRASTRUCTURE»
(SE «NIDI»)**



ДОРОГИ І МОСТИ

Збірник наукових праць
Заснований у 2003 р.

Випуск 32

ROADS AND BRIDGES

Collection of scientific papers
Established in 2003

Issue 32

КИЇВ
KYIV

2025

Дороги і мости : збірник наукових праць. Київ, 2025. Вип. 32. с. 376

У збірнику публікуються результати наукових досліджень із питань: впровадження новітніх дорожньобудівельних матеріалів і технологій; проєктування, будівництва та експлуатаційного утримання автомобільних доріг і транспортних споруд на них; організації та безпеки дорожнього руху; ціноутворення та економічної ефективності процесів будівництва та подальшого експлуатаційного утримання об'єктів дорожньотранспортної інфраструктури; захисту навколишнього середовища від шкідливого впливу об'єктів дорожньотранспортної інфраструктури тощо.

Для працівників проєктних і підрядних організацій, науково-дослідних інститутів, викладачів, аспірантів і студентів автомобільно-дорожніх учбових закладів.

Головний редактор: канд. екон. наук, доц. Безуглий А. О.

Заступник головного редактора: д-р техн. наук, проф. Славінська О. С.

Відповідальний редактор: канд. техн. наук, доц. Каськів В. І.

Відповідальний секретар: Гаєвська Н. М.

Члени редколегії: д-р техн. наук, проф. Батракова А. Г.; д-р техн. наук, проф. Бєлятинський А. О.; д-р екон. наук, проф. Бондар О. А.; д-р техн. наук, проф. Внукова Н. В.; д-р техн. наук, проф. Гамеляк І. П.; д-р екон. наук, доц. Іванченко В. О.; д-р техн. наук, проф. Клець Д. М.; д-р техн. наук, доц. Лазаренко С. В.; д-р техн. наук, доц. Меленчук Т. М.; д-р екон. наук, ст. наук. співр. Новікова А. М.; д-р техн. наук, проф. Онищенко А. М.; д-р техн. наук, проф. Прокудін Г. С.; д-р техн. наук, проф. Хрутьба В. О.; д-р екон. наук, доц. Шемаєв В. В.; канд. техн. наук, ст. наук. співр. Бабяк І. П.; канд. екон. наук Бібик Ю. М.; канд. техн. наук Головка С. К.; канд. техн. наук, проф. Грищук О. К.; канд. техн. наук Краюшкіна К. В.; канд. техн. наук доц. Нагайчук В. М.; канд. екон. наук Печончик Т. І.; Ph.D. (Econ.) Стасюк Б. О.; канд. техн. наук Цинка А. О.; канд. техн. наук, доц. Шевчук Н. А.

Зарубіжні члени редколегії: Ph.D. (Eng.), Sen. Research. Бонін Гвідо (Італія); D.Sc. (Eng.), Prof. Гаспар Ласло (Угорщина); Ph.D. (Chem.), Associate Prof. Олівєро Росі Цезаре (Італія); д-р техн. наук, проф. Телтаєв Багдат Бурханбайули (Казахстан); D.Sc. (Eng.), Prof. Біліщук Ян (Польща); D.Sc. (Eng.), Prof. Кужава Мешко (Польща).

Редакційна рада: Безуглий А. О. (голова), Каськів В. І. (заступник голови), Гаєвська Н. М. (секретар), Нагайчук В. М., Славінська О. С.

Технічний редактор: Шевчук О. П.

Адреса редакційної колегії: 03113, м. Київ, просп. Берестейський, буд. 57, ДП «НІПІ», www.dorogimosti.org.ua

Збірник входить до Переліку наукових фахових видань України (Категорія «Б»), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії:

галузь науки — економічні, спеціальності: 051 Економіка, 073 Менеджмент (Наказ Міністерства освіти і науки України від 17.03.2020 № 409);

галузь науки — технічні, спеціальності: 183 Технології захисту навколишнього середовища, 192 Будівництво та цивільна інженерія, 193 Геодезія та землеустрій, 194 Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології, 263 Цивільна безпека (Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886), 275 Транспортні технології (за видами) (Наказ Міністерства освіти і науки України від 17.03.2020 № 409).

Рекомендовано Науково-технічною радою ДП «НІПІ» (протокол від 24.10.2025 № 5).

Збірник наукових праць включено в міжнародні бази даних: CrossRef, Index Copernicus International, Ulrichsweb, Google Scholar, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD).

The Collection publishes the results of scientific research on the following issues: introduction of innovative road construction materials and technologies; design, construction and operational maintenance of roads and transport facilities located on them; traffic safety and traffic management; pricing and economic efficiency of construction processes and further operational maintenance of road infrastructure facilities; protection of the environment from the harmful impact of road infrastructure objects, etc.

For the employees of design and contracting organizations, research institutes, teachers, graduate students and students of motor road-transport educational institutions.

Editor-in-Chief: *Ph.D. (Econ.), Associate Prof. Artem Bezuglyi.*

Deputy Editor-in-Chief: *D.Sc. (Eng.), Prof. Olena Slavinska.*

Executive Editor: *Ph.D. (Eng.), Associate Prof. Volodymyr Kaskiv.*

Executive Secretary: *Natalia Haievska.*

Editorial Board: *D.Sc. (Eng.), Prof. Anzhelika Batrakova; D.Sc. (Eng.), Prof. Adrii Bieliatynskyi; D.Sc. (Eng.), D.Sc. (Econ.), Prof. Olena Bondar; D.Sc. (Eng.), Prof. Nataliia Vnukova; D.Sc. (Eng.), Prof. Ihor Gameliak; D.Sc. (Econ.), Associate Prof. Vitalii Ivanchenko; D.Sc. (Eng.), Prof. Dmytro Klets; Associate Prof. Serhii Lazarenko; D.Sc. (Eng.), Associate Prof. Tetiana Melenchuk; D.Sc. (Eng.), Prof. Artur Onishchenko; D.Sc. (Eng.), Prof. Heorhii Prokudin; D.Sc. (Eng.), Prof. Viktoriia Khrutba; D.Sc. (Econ.), Associate Prof. Volodymyr Shemayev; D.Sc. (Econ.), Sen.Research. Alla Novikova; Ph.D. (Eng.), Sen.Research. Ihor Babyak; Ph.D. (Econ.) Yuliia Bibyk; Ph.D. (Eng.) Serhii Holovko; Ph.D. (Eng.), Prof. Oleksandr Gryshchuk; Ph.D. (Eng.) Kateryna Krayushkina; Ph.D. (Eng.), Associate Prof. Vasyl Nahaichuk; Ph.D. (Econ.) Taras Pechonchyk; Ph.D (Econ.) Bohdan Stasiuk; Ph.D. (Eng.) Anatolii Tsynka; Ph.D. (Eng.), Associate Prof. Nataliia Shevchuk.*

Foreign Members of the Editorial Board: *Ph.D. (Eng.), Associate Prof. Guido Bonin (Italy); D.Sc. (Eng.), Prof. Gaspar Laszlo (Hungary); Ph.D. (Chem.), Associate Prof. Cesare Oliviero Rossi (Italy); D.Sc. (Eng.), Prof. Bahdat Teltayev (Kazakhstan); D.Sc. (Eng.), Prof. Jan Biliszczuk (Poland); D.Sc. (Eng.), Prof. Mieszko Kuzawa (Poland).*

Editorial Council: *Artem Bezuglyi (Chairman), Volodymyr Kaskiv (Deputy Chairman), Natalia Haievska (Secretary), Vasyl Nahaichuk, Olena Slavinska.*

Technical editor: *Oksana Shevchuk.*

Address of Editorial board: 03113, Kyiv, Beresteyskyi Ave., 57, SE «NIDI», www.dorogimosti.org.ua

The collection is included in the List of scientific professional publications of Ukraine (Category «B»), in which the results of dissertations for the degree of Doctor of Sciences, Candidate of Sciences and Doctor of Philosophy can be published:

branch of science – economic, specialties: 051 Economics, 073 Management (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine as of 17.03.2020 No. 409);

branch of science – technical, specialties: 183 Environmental Protection Technology, 192 Construction and Civil Engineering, 193 Geodesy and Land Management, 194 Hydraulic Construction, Water Engineering and Water Technology, 263 Civil Security (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine as of 02.07.2020 No. 886), 275 Transport technology (by type) (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine as of 17.03.2020 No. 409).

Recommended by the decision of the Scientific and Technical Council of SE NIDI (Minutes dated 24.10.2025 No. 5).

The collection of scientific papers is included in the international database: CrossRef, Index Copernicus International, Ulrichsweb, Google Scholar, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD).

ЕКОНОМІКА. МЕНЕДЖМЕНТ*Безуглий А. О., Бібик Ю. М., Гресько І. Л., Мудриченко Н. С.*

Обґрунтування доцільності застосування динамічної договірної ціни під час виконання робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування 11

Безуглий А. О., Комар В. Ю.

Інноваційні форми контрактів для відновлення транспортної інфраструктури України 24

Ілляш С. І., Маковська Ю. А., Стасюк Т. О., Парасюк Л. В.

Удосконалення методичних підходів до розрахунку норм витрат палива на машини і механізми 35

Зеленовський В. А., Завійський О. І.

Впровадження контрактів на утримання автомобільних доріг на основі кінцевих результатів (OPRC) для підвищення ефективності дорожнього господарства України 41

Гець І. М., Галак І. І.

Удосконалення моделей матеріального потоку як основа логістичних ланцюгів циркулярної економіки в умовах динамічного ринкового середовища.....49

Галюк І. Б., Єжак Ф. Ф., Тараєвська Л. С.

Використання ІІІ у маркетингу та логістиці задля оптимального використання ресурсів підприємства 58

Берлоус М. В., Кінаш І. П.

Зарубіжний досвід підготовки професійних менеджерів 67

БУДІВНИЦТВО ТА ІНЖЕНЕРІЯ*Janusz Sobolewski,*

German, british and polish regulations for the use of geosynthetics in road and rail ways structures as separation & filtration and as reinforcement layers 77

Цинка А. О., Копинець І. В., Желтобрюх А. Д., Соколов О. В., Соколова О. Б., Юнак А. Л.

Порівняння вітчизняних і європейських методів випробування асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів.....90

Даценко В. М., Кириченко Г. В., Копинець І. В., Соколова О. Б., Чечуга О. С.

Сучасні вимоги до щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей та щебенево-мастикових асфальтобетонів.....103

Кровяков С. О., Ігнатенко А. В., Фіногенов О. І., Лапіна О. І.

Оптимізація складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття з використанням комплексу експериментально-статистичних моделей 113

Аринушкіна О. О., Костін Д. Ю.

Впровадження технології влаштування крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом армованих поліпропіленовими фіброволокнами 124

Шлюнь Н. В., Засць Ю. О., Шевчук Л. В., Худолій С. М.

Математичне моделювання виникнення термомеханічних ефектів в армованих дорожніх конструкціях, за термопружної несумісності матеріалів покриття та арматури 132

Каськів В. І., Касай К. І.

Математичне моделювання впливу атмосферних опадів на водно-тепловий режим земляного полотна автомобільної дороги 142

Кривобок О. В., Островерхий О. Г.

Сучасні методи укріплення ґрунтів в дорожньому будівництві та способи їх покращення..... 149

Скрипник А. Л., Ячник М. В.

Оцінювання відповідності інноваційних будівельних матеріалів і виробів у контексті впровадження регламенту (ЄС) № 305/2011 (CPR) 155

Терещенко Т. А.

Інтерпретація англomовного терміна «pavement» та похідних словосполучень 168

ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ

Касіянчук Д. В., Штогрин Л. В.

Обробка геовимірів у задачах планування та контролю будівництва, експлуатації доріг у зсувних районах з використанням ГІС..... 173

ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Безуглий А. О., Каськів В. І., Завгородній С. С.

Поточні виклики в управлінні мостовим господарством України 181

Vladyslav Havryshchuk, Bohdan Sossa

Main factors in the formation of surface runoff from the deck of artificial structures 195

Vladyslav Havryshchuk, Bohdan Sossa

Specifics of geodetic works as part of acceptance tests of water drainage systems on bridges..... 206

Лісневський Р. С., Онищенко А. М.

Методика розрахунку термонапружень в дорожньому покритті на металевій плиті автодорожніх мостів 216

Мінюкова А. Д., Сташук П. М.

Розрахунок зусиль і переміщень типових балок прогонових будов посиленних звичайною і попередньо-напруженою арматурою..... 232

Абрамов В. М.

Методика практичного розрахунку аркових дорожніх споруд із гофрованого металу 244

Абрамов В. М.

Аналіз різних підходів до розрахунку із проектування дорожніх споруд із гофрованого металу 252

Гаркуша М. В.

Захист бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва із застосування метилметакрилатів 259

Артёмов В. Є., Андрусяк А. В., Білоус І. І.

Порівняльний аналіз транспортних навантажень
на прогонові будови мостів за нормами проєктування України
та військовими стандартами НАТО STANAG/TDTC 274

Лукін Д. О.,

Моделювання впливу добових температурних коливань
на залізобетонний міст в умовах клімату України 285

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Нагребельна Л. П., Кострульова Т. Є., Шпінь Д. М., Корчевська А. А.

Звуження ширини смуг руху, як захід заспокоєння руху 305

Попович Н. І.

Швидкість руху як фактор безпеки автомобільних доріг 317

Смоляннюк Р. В., Халін С. М.

Штучний інтелект для автоматизованої ідентифікації
та оцінювання стану технічних засобів організації дорожнього руху 332

Стасюк Б. О., Вознюк А. Б., Гуков М. І., Дуля М. В.

Сучасна історія інформаційного забезпечення
дорожнього господарства України 342

Терещенко Т. А.,

Сучасні підходи до проєктування зон взаємодії транспортних потоків
у межах зон забудови згідно з досвідом країн ЄС 352

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Рутковська І. А., Ярошук О. С.

Системний підхід оцінювання впливу
на довкілля впродовж життєвого циклу автомобільної дороги 363

АРХІТЕКТУРА ТА МІСТОБУДУВАННЯ

Василишин В. Я.

Розвиток архітектури та будівництва 372

CONTENTS

ECONOMY. MANAGEMENT

<i>Artem Bezuglyi, Bibyk Yuliya, Ihor Hresko, Natalia Mudrychenko</i> Justification of the feasibility of applying a dynamic contract price when performing work on the operational maintenance of public roads use	11
<i>Artem Bezugliy, Viktor Komar</i> Innovative forms of contracts for the restoration of the transport infrastructure of Ukraine	24
<i>Sergii Illiash, Yulia Makovska, Tetiana Stasiuk, Lyudmila Parasyuk</i> Peculiarities of calculating fuel consumption rates for machinery and equipment	35
<i>Volodymyr Zelenovsky, Oleg Zaviysky</i> Implementation of outcome-based road maintenance contracts (OPRC) to improve the efficiency of the road sector in Ukraine	41
<i>Ivan Hets, Iryna Halak</i> Improvement of material flow models as the basis of circular economy supply chains in a dynamic market environment	49
<i>Iryna Haliuk, Franko Yezhak, Lesia Tarayevska</i> Application of ai in marketing forecasting and logistics activities in order to optimise the use of enterprise resources	58
<i>Maria Berlous, Iryna Kinash</i> Foreign experience in training professional managers	67

CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

<i>Janusz Sobolewski</i> German, british and polish regulations for the use of geosynthetics in road and rail ways structures as separation & filtration and as reinforcement layers	77
<i>Anatolii Tsynka, Ivan Kopynets, Anton Zheltobriukh, Oleksii Sokolov, Oksana Sokolova, Alina Yunak</i> Comparison of domestic and european testing methods for asphalt mixtures and asphalt concretes	90
<i>Volodymyr Datsenko, Anna Kyrychenko, Ivan Kopynets, Oksana Sokolova, Oleksandr Chechuha</i> Modern requirements for stone mastic asphalt mixtures and stone mastic asphalt	103
<i>Sergii Kroviakov, Andrii Ihnatenko, Oleg Finohenov, Olga Lapina</i> Optimisation of the composition of fibre-reinforced concrete for rigid pavement using a set of experimental-statistical models	113
<i>Olena Arinushkina, Dmytro Kostin</i> Implementation of the technology of coarse-graded crushed stone and sand mixtures reinforced with cement and polypropylene fibers application	124
<i>Nataliia Shlyun, Yuliia Zaiets, Lyudmyla Shevchuk, Serhii Hudolij</i> Mathematical modeling of the occurrence of thermomechanical effects in reinforced road structures, due to thermoelastic incompatibility of pavement and reinforcement materials	132

Volodymyr Kaskiv, Kostiantyn Kasai

Mathematical modeling of the effect of atmospheric precipitation
on the hydro-thermal regime of a road embankment 141

Oleksandr Kryvobok, Oleg Ostroverkhyi

Modern methods of soil stabilization in road construction and ways to improve them 148

Andrii Skrypnyk, Mariia Yachnyk

Assessment of the compliance of innovative construction materials
and products in the context of the implementation of regulation (EU) No. 305/2011 (CPR) 154

Tatyana Tereshchenko

Contemporary approaches to the design of traffic flow interaction zones
within built-up areas in accordance with the practice of eu countries 167

CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

Dmytro Kasiianchuk, Liudmyla Shtohryn

Processing of geomeasurement in the tasks of planning and control of construction
and operation of roads in landscape areas using GIS 172

CONSTR HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION, WATER ENGINEERING AND WATER TECHNOLOGIES

Artem Bezugliy, Volodymyr Kaskiv, Serhii Zavgorodnyi

Current challenges in the management of Ukraine's bridge infrastructure 180

Vladyslav Havryshchuk, Bohdan Sossa

Specifics of geodetic works as part of acceptance tests of water drainage
systems on bridges 194

Vladyslav Havryshchuk, Bohdan Sossa

Main factors in the formation of surface runoff from the deck of artificial structures 205

Roman Lisnevskiy, Artur Onyshchenko

Methodology for calculating thermal stresses in the road surface
on the metal slab of highway bridges 215

Anna Miniukova, Pavlo Stashuk

Calculation of forces and displacements of typical bridge
span beams reinforced with ordinary and prestressed reinforcement 231

Volodymyr Abramov

Methodology for practical calculation of arched road structures made of corrugated metal 257

Volodymyr Abramov

Analysis of different approaches to the calculation and design
of road structures from corrugated metal 250

Mykola Harkusha

Protection of concrete and metal structures of transport and hydrotechnical
construction using methyl methacrylates 257

Vitalii Artomov, Andriy Andrusyak, Ihor Bilous

Comparative analysis of traffic loads on bridge superstructures according
to Ukrainian design standards and NATO MILITARY STANDARDS STANAG/TDTC 272

Danylo Lukin

Modeling daily temperature effects on a concrete bridge in the Ukrainian climate conditions	283

TRANSPORT TECHNOLOGIES

Liudmila Nahrebelna, Tetiana Kostrulyova, Denis Shpin, Alina Korchevskaya

Lane narrowing as a traffic calming strategy	302

Nataliya Popovych

Vehicle speed as a factor of road traffic safety	314

Roman Smolyanyuk, Serhii Khalin

Artificial intelligence for automated identification and condition assessment of traffic control devices.....	328

Bohdan Stasiuk, Andrii Vozniuk, Mukola Hukov, Mykhailo Dulia

Modern history of information support for the road transport system of Ukraine	338

Tatyana Tereshchenko

Interpretation of the english-language term «pavement» and derived complex terms	348

ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

Inessa Rutkovska, Lesya Yaroshchuk

Systematic approach to environmental impact assessment throughout the life cycle of a highway	359

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Vitalii Vasylyshyn

Development of architecture and construction in the carpathian territories	368

УДК 338.5:625.08

Безуглий А. О., канд. екон. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-3883-7968>Бібік Ю. М., канд. екон. наук, <https://orcid.org/0000-0002-7197-8909>Гресько І. Л., <https://orcid.org/0000-0002-7175-7436>Мудриченко Н. С., <https://orcid.org/0000-0002-9423-5518>*Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна*

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ДОГОВІРНОЇ ЦІНИ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБІТ З ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО УТРИМАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Анотація

Вступ. Експлуатаційне утримання автомобільних доріг — це комплекс заходів, спрямованих на збереження дорожньої інфраструктури та забезпечення безперервного руху транспорту. З економічної точки зору, це є базовим видом послуг, відповідно до якого формуються поточні витрати на підтримку функціональності дорожньої мережі, забезпечується економія ресурсів та зменшуються майбутні довгострокові витрати, пов'язані з капітальними ремонтами автомобільної дороги.

Динамічна договірні ціна під час експлуатаційного утримання автомобільних доріг є перспективним інструментом, який сприятиме адаптації до реалій сучасної економіки та забезпечить ефективне використання коштів. Однак її впровадження потребує чітких регламентів, прозорості процесів, покращення нормативної бази, розвитку технологій моніторингу та управління проектами.

Якщо під час укладання договору через невизначеність витрат чи інші обставини остаточно встановити вид договірної ціни неможливо, сторони у договорі визначають вид динамічної договірної ціни, а також порядок її коригування в процесі виконання дорожніх робіт чи послуг. Отже, динамічна договірні ціна — кошторис, що підлягає уточненню у разі змінення поточних цін на ресурси, що враховані у договірній ціні, а також з інших підстав, визначених умовами договору.

Тому, використання динамічної договірної ціни при укладанні договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування дозволить підвищити економічну ефективність, оскільки: витрати підлягають уточненню відповідно до коливань цін на матеріально-технічні та трудові ресурси тощо; зменшуватимуться ризики для підрядників, що позитивно вплине на конкуренцію та якість послуг; при цьому державні кошти використовуватимуться раціональніше.

Таким чином, динамічний вид договірної ціни пропонує гнучкішу модель визначення вартості робіт і послуг та проведення взаєморозрахунків, що сприяє зменшенню ризиків для підрядників і замовників, забезпечує більш справедливий розподіл фінансових зобов'язань у разі коливань ринкових цін, а також формує умови для раціонального використання державних коштів та підвищенню економічної ефективності державних інвестицій.

Проблематика. Проблемами щодо визначення вартості робіт із експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, а також значний внесок у розвиток теоретичних та практичних засад, розв'язанню різних питань із розвитком системи управління дорожнім господарством та транспортної інфраструктури України, досліджували у своїх наукових працях автори статті та такі науковці Ілляш С. І., Канін О. П., Ліпський Г. Є., Печончик Т. І., Прусенко Є. Д., Стасюк Б. О., Цинка А. О. та інші.

Питання щодо вірного визначення вартості робіт та послуг на всіх етапах інвестиційного процесу набуває особливої актуальності в умовах і без того складної економічної ситуації, що склалася в країні

на фоні ведення бойових дій з боку російської федерації, а також обмеженого рівня фінансування, існуючого на сьогодні, оскільки неможливо забезпечити повне належне фінансування служб відновлення інфраструктури в областях, за якими закріплені функції замовника робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування.

За результатами здійсненого аналізу державних закупівель через систему електронних закупівель Prozorro видно, що переважна більшість договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування укладається на строк 3 роки. За цей період може відбутись непрогнозоване зростання вартості матеріально-технічних та трудових ресурсів, що може відобразитись у нездатності підрядника виконувати як окремі види робіт, так і роботи взагалі за твердою договірною ціною. Це може мати негативний вплив на забезпечення безперервного, безпечного та зручного руху транспортних засобів на автомобільних дорогах.

У таких умовах необхідно передбачити можливість щодо застосування динамічної договірної ціни під час виконання робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, що відповідатиме сучасним умовам ринкової економіки.

Мета. Метою статті є обґрунтування доцільності застосування динамічної договірної ціни при заключенні договорів на виконання робіт із експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, що створить передумови для внесення змін у відповідні нормативні документи, а також сприятиме більш раціональному та ефективному використанню бюджетних коштів.

Матеріали та методи. Під час проведення даного дослідження виконувався аналіз нормативно-правових актів і нормативних документів, які регламентують порядок застосування договірної ціни при виконанні дорожніх робіт та послуг, а також був проведений аналіз світового досвіду щодо реалізації контрактів за умовами динамічної договірної ціни.

Результати. У ході проведеного дослідження було проаналізовано доцільність застосування динамічної договірної ціни під час виконання робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. З урахуванням практики виконання цих робіт у провідних країнах світу, а також аналізу нормативно-правових актів і документів було зроблено висновки та підготовлено пропозиції щодо застосування динамічної договірної ціни при укладанні договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування.

Висновки. Впровадження змін, що стосуються застосування динамічної договірної ціни стане важливим кроком на шляху покращення механізмів ціноутворення, головний результат якої це гнучка система взаєморозрахунків за виконані роботи чи послуги.

Ключові слова: автомобільна дорога, динамічна договірна ціна, договірні відносини, експлуатаційне утримання.

Вступ

На сучасному етапі розвитку дорожнього господарства України все більшої актуальності набуває питання щодо застосування динамічної договірної ціни під час виконання робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування в процесі здійснення взаєморозрахунків. Традиційна практика укладення договорів із використанням твердої договірної ціни, яка передбачає фіксацію вартості робіт на увесь період реалізації договору, в умовах економічної нестабільності та інфляційних процесів дедалі частіше виявляється економічно неефективною. Коливання вартості матеріально-технічних і трудових ресурсів обумовлюють високий рівень цінових ризиків, що ускладнює забезпечення стабільності договірних відносин між замовником і підрядником.

Тому сьогодні все частіше піднімають питання щодо застосування динамічної договірної ціни при укладанні договорів з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. Відповідно до статті 632 [1] ціна в договорі встановлюється за домовленістю сторін. Зміна ціни після укладення договору допускається лише у випадках і на умовах, встановлених договором або [1].

Оскільки договірна ціна є істотною умовою договору, її методологія формування має ключове значення для забезпечення економічної збалансованості договірних відносин. У цьому контексті особливої уваги набуває впровадження гнучких механізмів ціноутворення, зокрема динамічної договірної ціни, яка дозволяє адаптувати фінансові зобов'язання сторін до актуальних ринкових умов.

Таким чином, розгляд можливості застосування динамічної договірної ціни під час виконання робіт і послуг з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування доцільно здійснювати з позицій підвищення ефективності використання бюджетних ресурсів, зниження цінових ризиків та оптимізації взаємодії між замовниками та підрядниками. Науковий аналіз цього підходу дозволяє стверджувати, що запровадження динамічної договірної ціни сприятиме покращенню економічної складової договірних відносин, а також забезпечить справедливий розподіл ризиків між замовником і підрядником.

Мета й завдання роботи. Метою цієї статті є аналіз та обґрунтування доцільності застосування динамічної ціни при укладанні договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування відповідно до Правил визначення вартості будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування, затверджених наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 02.05.2022 № 273, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 17 травня 2022 р. за № 527/37863 (далі — Правила) [2] та Методики визначення вартості дорожніх робіт та послуг щодо визначення вартості нового будівництва, реконструкції, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, затвердженої наказом Міністерства інфраструктури України 07 жовтня 2022 року № 753 (далі – Методика) [3], а також передбачення відповідних положень в Методиці.

Основна частина

Вид договірної ціни в Україні визначається Законом України «Про публічні закупівлі» [4] та підзаконними нормативними актами, що регулюють дорожню галузь. Стаття 41 [4] встановлює, що умови договору про закупівлю (у тому числі вид договірної ціни) визначаються у тендерній документації та повинні відповідати вимогам законодавства. Постанова КМУ від 01.08.2005 № 668 [5] визначає, що договірна ціна є істотною умовою договору та може бути твердою або динамічною. Якщо договір підряду укладається за результатами переговорів сторін, рішення щодо застосування динамічної або твердої договірної ціни, порядку погодження договірної ціни та проведення розрахунків приймаються за домовленістю сторін.

Що стосується застосування твердої договірної ціни, то необхідно зазначити, що тверда договірна ціна встановлюється незмінною на весь обсяг будівництва з наданням підрядною організацією гарантій, у тому числі фінансових, щодо реалізації проєктних рішень в установлені строки за фіксовану ціну. Здебільшого тверду договірну ціну встановлюють для робіт, які виконують у короткі строки, коли замовник упевнений у своїх витратах на дорожні роботи та послуги і не планує корегування проєктної документації.

Динамічна договірна ціна (приблизний кошторис) — це кошторис, що підлягає уточненню у разі зміни поточних цін на матеріально-технічні ресурси, що враховані у договірній ціні, а також з інших підстав, визначених відповідними умовами договору. За динамічної договірної ціни прямі витрати при визначенні вартості виконаних робіт розраховують на підставі нормативних витрат трудових і матеріально-технічних ресурсів, виходячи із фізичних обсягів виконаних робіт і цін ресурсів, прийнятих у договірній ціні. Компенсацію підряднику витрат, спричинених зростанням вартості матеріально-технічних ресурсів, здійснюють у складі вартості цих ресурсів за поточними цінами відповідно до умов, передбачених договором підряду.

Проаналізувавши основні положення і різницю між видами договірної ціни, основні ознаки за видом договірної ціни наведено в **табл. 1**.

Таблиця 1

Ознаки твердої та динамічної договірної ціни

Ознака	Тверда ціна	Динамічна ціна
Визначення	Визначають на момент підписання договору й не підлягає зміні (крім форс-мажорів або окремо передбачених винятків)	Встановлюють на момент підписання й підлягає коригуванню в процесі виконання
Ризики підрядника	Вищі — підрядник несе відповідальність за всі коливання ринку (цін на матеріали, зарплати тощо)	Нижчі — підрядник має право на перегляд складових ціни (цін на матеріали, зарплати тощо)
Ризики замовника	Нижчі — платіж залишається фіксованим	Вищі — бюджетні витрати можуть зростати
Сфера застосування	Для короткострокових, прогнозованих проєктів, з низькою ймовірністю ринкових коливань	Для довгострокових, масштабних чи непередбачуваних проєктів

Отже, тверду договірну ціну визначають на весь строк дії договору й не змінюють (за винятком випадків, передбачених законодавством), а динамічну договірну ціну уточнюють (коригують) під час виконання робіт і послуг з урахуванням змін вартості матеріально-технічних та трудових ресурсів, заробітної плати та інших складових витрат.

Враховуючи, що [5] передбачено два види договірної ціни, а також те, що [3] передбачає порядок формування договірної ціни саме у сфері дорожнього господарства, то положення про застосування динамічної договірної ціни при укладанні договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування мають бути передбачені також і у [3].

Проаналізуємо переваги та недоліки динамічної договірної ціни (табл. 2).

Таблиця 2

Переваги та недоліки динамічної договірної ціни

Переваги динамічної договірної ціни	Недоліки динамічної договірної ціни
Незважаючи на свої недоліки, динамічна договірна ціна (приблизний кошторис) має ряд переваг, які роблять її привабливим варіантом для певних видів проєктів та договорів, особливо в умовах невизначеності. Ось основні з них: ➤ Гнучкість та адаптивність до змін. Це, мабуть, найбільша перевага. Динамічна ціна дозволяє оперативно реагувати на зміни зовнішніх умов: коливання цін на матеріали, зміну обсягів робіт, непередбачені або додаткові роботи, які можуть виникнути в процесі виконання робіт за укладеним договором. Це особливо важливо при довгострокових або складних проєктах, де початкові умови неможливо точно визначити. ➤ Можливість розпочати проєкт швидше. Якщо на початковому етапі важко точно визначити всі параметри та вартість, фіксована ціна може стати перешкодою для початку робіт. Динамічна ціна дозволяє розпочати проєкт, навіть якщо деякі умови ще не уточнені, що прискорює реалізацію проєкту.	Динамічна договірна (приблизний кошторис) ціна, хоча й пропонує гнучкість, має свої недоліки, які можуть створити проблеми для всіх сторін договору. Ось основні з них: ➤ Непередбачуваність бюджету. Для замовника це створює велику проблему з плануванням. Оскільки кінцева вартість проєкту може змінюватися, дуже складно виділити точний бюджет і уникнути перевитрат. Аналогічно, для підрядника, який залежить від змінних цін на матеріали або послуги, також виникають труднощі з прогнозуванням власної прибутковості. ➤ Вищі ризики для замовника. Замовник бере на себе більшу частину ризиків, пов'язаних зі зростанням цін на ресурси, непередбаченими обставинами або збільшенням обсягів робіт. Це може призвести до значного подорожчання проєкту і створити певні фінансові труднощі.

Переваги динамічної договірної ціни	Недоліки динамічної договірної ціни
➤ Справедливий розподіл ризиків (за певних умов). Здебільшого значна частина ризиків лягає на замовника, в деяких випадках динамічна ціна може забезпечити більш справедливий розподіл ризиків. Наприклад, якщо ціни на певні матеріальні ресурси неможливо спрогнозувати, то і замовник, і підрядник розділяють ризик їх коливання. З точки зору розподілу ризиків це є кращим для підрядника, який не буде нести збитки через різке зростання цін, а для замовника це може бути прийнятно, якщо він розуміє, що це дозволяє розпочати проєкт. ➤ Прозорість витрат. Зазвичай, за динамічної ціни підрядник зобов'язаний надавати детальну звітність про фактичні витрати. Це дозволяє замовнику більш краще контролювати обґрунтованість витрат (за наявності відповідних механізмів аудиту). ➤ Вища якість та гнучкість у роботі. Якщо підрядник не обмежений жорсткими рамками твердої ціни, він може використовувати якісніші матеріали або докладати додаткових зусиль для досягнення кращого результату, знаючи, що ці витрати будуть компенсовані. Також це дає можливість вносити зміни в проєкт без необхідності перегляду всього договору. ➤ Запобігання конфліктам через непередбачені обставини. У проєктах де є висока ймовірність виникнення непередбачених обставин динамічна ціна дозволяє вирішувати ці питання без гострих суперечок і додаткових судових розглядів, оскільки механізм зміни ціни вже закладено в договір.	➤ Певні складнощі при здійсненні контролю та управління. Постійні зміни в ціні вимагають безперервного моніторингу та перегляду умов договору. Це збільшує адміністративне навантаження на обидві сторони, ускладнює облік та може призвести до затримок у прийнятті управлінських рішень. ➤ Можливість зловживань. У деяких випадках недобросовісний підрядник може штучно завищувати витрати, списуючи їх на «динамічні» зміни цін. Без чітких механізмів контролю та аудиту це може викликати певні труднощі у договірних відносинах між сторонами договору. ➤ Зниження мотивації до оптимізації. Якщо ціна автоматично коригується залежно від витрат, у підрядника може бути менше стимулу до пошуку більш ефективних рішень, зниження витрат або оптимізації процесів, оскільки будь-яка економія може просто зменшити договірну ціну. ➤ Тривалі переговори та узгодження. Кожна зміна ціни може вимагати додаткових переговорів, узгоджень та внесення змін до документів. Це забирає час і може сповільнити реалізацію проєкту. ➤ Невизначеність щодо кінцевої вартості може викликати у замовника певні труднощі, який не може бути впевненим у своїх фінансових можливостях.

Отже, проаналізувавши сильні та слабкі сторони застосування динамічної договірної ціни можна зробити висновок, що застосування такої ціни може стати ефективним інструментом при заключенні договорів з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. Якщо в інвестиційному проєкті існують значні ризики, що можуть вплинути на вартість робіт та послуг, то застосування такого виду договірної ціни буде більш раціональним. Однак її запровадження потребує ретельного планування, чітко прописаних умов договору та ефективного механізму контролю з боку замовника. Для замовника важливо забезпечити баланс між гнучкістю та контролем витрат, щоб уникнути необґрунтованого зростання витрат бюджету.

Варто відзначити, що динамічна договірна ціна широко застосовується в багатьох країнах світу, під час реалізації проєктів як з будівництва, так із експлуатаційного утримання автомобільних доріг. Ключовий аспект її успішного впровадження полягає у застосуванні прозорих механізмів ціноутворення, зокрема індексації витрат, що дозволяє враховувати ринкові зміни, як в бік збільшення та і в бік зменшення складових вартості.

Розглянемо міжнародний досвід застосування динамічної договірної ціни як під час будівництва автомобільних доріг, так і під час їх експлуатаційного утримання.

1. США

- Методологія індексації: у США в проєктах дорожнього будівництва часто використовують механізм індексації, базуючись на офіційних індексах, таких як Producer Price Index (PPI) [6], розроблений Міністерством праці. Цей індекс відображає зміни у вартості будівельних матеріалів, палива, обладнання тощо.

- Контракти з розподілом ризиків:

Поширеною є практика укладання контрактів, де ризики зміни цін розподіляються між замовником і підрядником. Наприклад, якщо вартість матеріальних ресурсів перевищує певний поріг, різницю покривають через коригування ціни. Це дозволяє підтримувати якість робіт навіть за умов значних економічних коливань, таких як зростання цін на нафту чи метал тощо. Дослідження FHWA (Техас, 47 штатів) показує, що Price Adjustment Clauses застосовують на дорожніх контрактах по всій країні (47 штатів) з метою стабілізації цін і уникнення банкрутств підрядників [7].

2. Канада

- Гнучкі контракти: У Канаді використовують підхід, відомий як Adjusted Contract Price Mechanism [8]. У цьому випадку ціна контракту може змінюватися залежно від ринкових умов, але такі зміни чітко контролюють через контрактні положення.

- Сезонне коригування [9]: з огляду на суворі кліматичні умови, контракти враховують сезонні витрати, зокрема на зимове утримання доріг.

- Технологічний моніторинг: використовують системи моніторингу стану доріг у реальному часі, що дозволяє обґрунтовувати зміни ціни, пов'язані з додатковими роботами.

3. Європейський Союз

- Регулювання на рівні Європейського Союзу:

Директиви ЄС сприяють застосуванню контрактів з динамічною договірною ціною для великих інфраструктурних проєктів. Основний акцент робиться на прозорості, обґрунтованості витрат, оцінці ризиків та адекватному контролю. Це відображено, наприклад, у доктрині PPP, згаданій у звітах UK Parliament Treasury [10]. У них також зазначається, що такі контракти включають комплексну оцінку витрат упродовж всього дії договору, а не лише початкові витрати.

Це вказує на адаптацію практик ЄС до контрактів з динамічним ціноутворенням, де вирішальне значення має обґрунтованість кожної зміни ціни.

- Інноваційні підходи:

У Німеччині та Франції активно застосовують Performance-Based Maintenance Contracts (PBMC), де оплату визначають не стільки обсягами робіт і витратами на утримання, а скільки їх фактичним результатом — станом дорожньої інфраструктури. Після завершення контракту замовник оцінює рівень технічного стану, що і впливає на остаточну вартість. Європейська практика PBMC описана в дебатах про PPP, де акцент зроблений на «whole-life costing» та «operational risk» [10] саме це типовий підхід у Франції й Німеччині при середньо- і довгострокових контрактах.

У Великобританії популярним є механізм Cost Plus [11], де підрядник отримує відшкодування витрат і фіксовану надбавку за управління. У контрактах типу Cost-Plus підрядник отримує всі дозволені витрати плюс фіксовану надбавку. Водночас, у національних проєктах, таких як HS2, Cost-Plus контракти критикувалися за непрозорість витрат. Наприклад, контракт HS2 уклали 2018 року з дуже слабкими мотиваційними механізмами: якщо витрати зростають, підрядник отримує лише незначну частку штрафу / бонусу.

4. Австралія

- Стимулюючі контракти:

Австралія активно використовує так звані Alliance Contracts [12], в яких договірна ціна є гнучкою, а підрядник заохочується до економії ресурсів. Якщо витрати знижуються без втрати якості, підрядник отримує бонус.

- Інтегровані системи планування [13]:

Використання цифрових систем дозволяє інтегрувати дані про вартість матеріалів, робіт і транспортування, що забезпечує ефективне управління змінами ціни.

5. Азія (Японія, Південна Корея, Китай)

Японія:

Особлива увага приділяється довговічності матеріалів, що знижує потребу у частих змінах ціни на утримання автомобільних доріг. Використовуються контракти з гнучкою структурою, де зміни враховують автоматично через механізм довгострокового планування.

Південна Корея:

Контракти часто базуються на індексах вартості сировини та енергії. У випадку дорожнього будівництва зміни вартості асфальту або бітуму автоматично враховують у ціні.

Китай:

Для великих інфраструктурних проєктів використовують механізми Dynamic Pricing Contracts [14], які базуються на постійній звітності про фактичні витрати.

Отже, проаналізувавши практику міжнародного досвіду провідних країн світу щодо застосування динамічної договірної ціни при укладанні договорів на виконання дорожніх робіт та послуг можна зробити висновок, що для України використання цих напрацювань може стати вдалим практичним прикладом для вдосконалення підходів до ціноутворення в дорожньому будівництві, а саме при заключенні договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування, що дозволить підвищити ефективність впровадження інфраструктурних проєктів.

Відповідно до положень [15], експлуатаційне утримання автомобільних доріг визначається як комплекс заходів, що включає роботи з обстеження та забезпечення належного стану автомобільних доріг загального користування, дорожніх споруд та смуги відведення. У економічному розумінні цей комплекс робіт спрямований на збереженні інфраструктурного активу, продовження його життєвого циклу та оптимізацію витрат, пов'язаних з відновленням транспортно-експлуатаційних характеристик. Цей процес є не лише технічним, але й економічно значущим, оскільки своєчасне виконання планових робіт мінімізує майбутні витрати, пов'язані з капітальними ремонтами.

Згідно з [16], на якість та обсяг робіт з експлуатаційного утримання впливає низка чинників: інтенсивність транспортних потоків, господарська діяльність, природно-кліматичні умови. Їхній негативний вплив призводить до появи дефектів і пошкоджень дорожнього покриття, які знижують ефективність функціонування дорожньої мережі. У довгостроковій перспективі це зумовлює зростання непередбачуваних витрат, що потребують швидкого фінансування та оперативного виконання додаткових робіт. Економічна специфіка цих робіт полягає у високій вартості їх виконання через необхідність мобілізації ресурсів у стислі строки, а також у неплановому характері витрат.

Отже, у процесі експлуатаційного утримання автомобільних доріг, окрім планових заходів, завжди існує потреба у фінансових та організаційних механізмах для швидкого реагування на позапланові та форс-мажорні обставини (стихійні лиха, раптові руйнування тощо). Це формує необхідність гнучкого підходу до фінансування експлуатаційних робіт, що, у свою чергу, обґрунтовує актуальність впровадження динамічних механізмів договірної ціни.

На **рис. 1** наведено основні види непередбачених / не прогнозованих дорожніх робіт, які можуть виникнути під час експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування.

Отже, роботи з експлуатаційного утримання (ямковий ремонт, зимове утримання тощо) часто мають тривалі строки, високі сезонні коливання витрат і залежать від ринкових цін на матеріальні ресурси, ціни на які протягом короткого строку можуть істотно змінюватися. При цьому застосування динамічної ціни дозволить відобразити ринкову ситуацію й уникнути завищення початкової вартості через «страхування» підрядника на непередбачувані зміни, а також мотивуватиме підрядника працювати ефективніше та чесно звітувати про фактичні витрати.

1. Усунення раптових пошкоджень дорожнього покриття:

- ямковий ремонт: термінове усунення вибоїн та тріщин великих розмірів, що створюють загрозу безпеці руху;
- просідання дорожнього покриття: ліквідація просідань, що можуть бути спричинені підмивом ґрунту або іншими чинниками;
- руйнування узбіччя: відновлення узбіччя, якщо його пошкодження створює небезпеку для руху.

2. Ремонт та відновлення елементів дорожнього облаштування:

- екстрений ремонт пошкоджених мостів, шляхопроводів, естакад (наприклад, після ДТП або інших інцидентів);
- відновлення систем освітлення, світлофорних об'єктів у разі аварійних відключень або пошкоджень;
- ремонт або заміна пошкоджених дорожніх знаків, напрямних стовпчиків, огорож, відбійників.

Види дорожніх робіт, які не можна передбачити чи спрогнозувати завчасно та які можуть виникнути раптово і відносяться до робіт з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування

3. Ліквідація наслідків дорожньо-транспортних пригод (ДТП):

- прибирання уламків транспортних засобів, розсипаних вантажів;
- очищення дорожнього покриття від розлитих паливно-мастильних матеріалів, що можуть спричинити втрату зчеплення;
- відновлення пошкоджених елементів дорожньої інфраструктури.

4. Ліквідація наслідків стихійних лих та несприятливих погодних умов:

- снігопади та ожеледиця: розчищення доріг від снігу, обробка протиожеледними матеріалами, ліквідація снігових заметів.
- паводки та повені: відкачування води з проїзної частини, ліквідація підтоплень, укріплення насипів, відновлення пошкоджених водопропускних споруд.
- сильні дощі та грози: ліквідація локальних підтоплень, очищення зливової каналізації від сміття.
- прибирання повалених дерев та гілок з проїзної частини, відновлення пошкоджених дорожніх знаків та світлофорів.

Рисунок 1 — Види непередбачених / не прогнозованих дорожніх робіт під час експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування

Вищенаведені види робіт не завжди можна передбачити, вони завжди викликають додаткові ризики як у замовника, так і у підрядника, а також включають додаткові затрати під час взаєморозрахунків за виконані роботи. Важливо зазначити, що успішне використання динамічної договірної ціни вимагає високого рівня довіри між сторонами договору, чіткого визначення механізмів перегляду ціни, прозорості у звітних документах та ефективного контролю.

Порядком укладання та виконання договорів підряду, що визначено у [5] уточнено, що кошторис — це зведені витрати, зведені кошторисні розрахунки, об'єктні та локальні кошторисні розрахунки, об'єктні та локальні кошториси, кошториси на окремі види робіт, кошториси на проєктні та пошукові роботи, інші розрахунки витрат на будівництво, складені за встановленою формою, на основі яких визначають кошторисну вартість будівництва і договірну ціну.

Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 11.07.2024 № 627 «Про затвердження Змін до Правил визначення вартості будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування» було внесено зміни, якими передбачено наступне:

— у договорах про закупівлю дорожніх робіт з нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту, дорожніх послуг з поточного ремонту крім твердого кошторису може застосовуватися динамічна договірна ціна (приблизний кошторис);

— ціна тендерної пропозиції розраховуватиметься, виходячи з виду договірної ціни, встановленої замовником, на підставі обсягів та видів робіт, що передбачені Відомістю обсягів робіт (BoQ);

— при динамічній договірній ціні ці показники розраховуються учасником процедури закупівлі — з наданням обґрунтування розрахунків складових вартості, визначених відповідно до методик визначення вартості дорожніх робіт і послуг;

— на стадії проведення взаєморозрахунків вартість виконаних дорожніх робіт / наданих послуг під час застосування динамічної договірної ціни взаєморозрахунки проводяться відповідно до методик визначення вартості дорожніх робіт та послуг.

З метою практичного впровадження положень змін до Правил, всіма зацікавленими сторонами ведуться дискусії, активне обговорення, а також розробляється проєкт змін до [3] у частині застосування динамічної договірної ціни при укладанні договорів з експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. Тому, незважаючи на внесення змін до [2] виникає необхідність щодо внесення змін також і до [3].

Зміни до [3], що стосуються застосування динамічної договірної ціни, мають передбачити наступне:

— динамічна договірна ціна — вартість дорожніх послуг, визначена та узгоджена сторонами (замовником та підрядником) у договорі про закупівлю дорожніх послуг з утримання автомобільних доріг загального користування у вигляді кошторису, складові якого (обсяги дорожніх послуг, поточні ціни на матеріально-технічні та трудові ресурси тощо) можуть бути уточнені під час взаєморозрахунків в межах ціни договору;

— вартість дорожніх робіт і послуг визначають на стадії визначення ціни пропозиції учасника процедури закупівель та узгодження договірної ціни на експлуатаційне утримання — у динамічній договірній ціні або твердій договірній ціні за укрупненими показниками вартості (УПВ);

— за динамічної договірної ціни вартість дорожніх послуг визначають з використанням витратного підходу шляхом застосування розрахунків витрат ресурсів.

Висновки

Отже, запровадження динамічної договірної ціни при укладанні договорів на експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування в Україні може бути реалізовано з урахуванням наступного:

1. Регуляторно-інституційний контекст.

Нормативна база. В Україні вже існують норми щодо перегляду кошторисних показників відповідно до індексів цін у будівництві та коливань вартості матеріалів. Наприклад, нормативні документи та постанови Кабінету Міністрів України визначають порядок використання індексів під час коригування кошторисної вартості.

Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України забезпечує прозорість і збір даних (Prozorro, база даних цін на будівельні матеріали ДП «НІРІ» [17], яка також дозволяє розрахувати вартість перевезення дорожньо-будівельних матеріалів тощо). Така інформація дозволяє застосовувати механізми динамічного коригування ціни на підставі реальних ринкових даних і використовувати як основні «фактичні» ціни на дату звітування для коригування договору.

Для державних і місцевих бюджетів необхідно передбачати резервні кошти або механізми страхування ризику значного зростання вартості. Запровадження динамічного механізму слід супроводжувати чітким бюджетним процесом із оцінкою ймовірних коливань на основі історичних індексів.

2. Джерела та індекси для коригування ціни.

Індекси цін на будівельно-монтажні роботи та індекси цін на паливо, які регулярно публікуються на порталах Minfin / Державної служби статистики України. Наприклад, індекс цін на будівельні роботи у червні 2025 склав 100,4 % порівняно з базовим періодом

<https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/buildprice/> [18]. На практиці ці індекси використовують для загального коригування кошторисної вартості, коли договір передбачає зміну ціни залежно від загального рівня індексів будівництва.

Список літератури

1. Цивільний кодекс України // База даних законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (дата звернення: 03.10.2025).
2. Правила визначення вартості будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування, затверджених наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 02.05.2022 № 273, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 17 травня 2022 р. за № 527/37863. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0527-22#Text> (дата звернення: 03.10.2025).
3. Методики визначення вартості дорожніх робіт та послуг щодо визначення вартості нового будівництва, реконструкції, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування, затвердженої наказом Міністерства інфраструктури України 07 жовтня 2022 року № 753, Київ, 2022. 95 с. (Інформація та документація). (дата звернення: 03.10.2025).
4. Закон України «Про публічні закупівлі» // База даних законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text>. (дата звернення: 03.10.2025).
5. Постанова Кабінету Міністрів України від 01.08.2005 № 668 «Про затвердження Загальних умов укладення та виконання договорів підряду в капітальному будівництві» // База даних законодавство України / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/668-2005-%D0%BF.#Text> (дата звернення: 03.10.2025).
6. URL: <https://www.bls.gov/ppi/publications/price-adjustment-guide-for-contracting-parties.htm> (дата звернення: 03.10.2025).
7. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/25973/dot_25973_DS1.pdf (дата звернення: 03.10.2025).
8. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/catalogue/62F0014M2022012> (дата звернення: 03.10.2025).
9. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/25410/chapter/3> (дата звернення: 03.10.2025).
10. URL: <https://publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmtreasy/1146/1146vw28.htm> (дата звернення: 03.10.2025).
11. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cost-plus_contract (дата звернення: 03.10.2025).
12. URL: <https://www.whitecase.com/insight-our-thinking/constructing-low-carbon-economy-geopolitical-challenges-australias-construction> (дата звернення: 03.10.2025).
13. URL: <https://cms.law/en/media/international/files/publications/guides/cms-guide-to-contract-alliancing-in-construction> (дата звернення: 03.10.2025).
14. URL: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-on-price-increases-in-commercial-contracts/china> (дата звернення: 03.10.2025).
15. ДСТУ 8747:2017 «Автомобільні дороги. Види та переліки робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання», прийнято та надано чинності наказом Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від 20 грудня 2017 року № 434 з 2020.01.01, Київ, 2017. 11 с. (Інформація та документація).
16. Порядок здійснення контролю якості утримання та ремонту автомобільних доріг, Київ 2007, 8 с. (Інформація та документація).
17. URL: <https://prices.restoration.gov.ua/sum/> (дата звернення: 03.10.2025).
18. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/buildprice/> (дата звернення: 03.10.2025).

References

1. Tsyvilnyi kodeks Ukrainy // Baza danykh zakonodavstvo Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].

2. Pravyla vyznachennia vartosti budivnytstva, rekonstruktsii, remontu ta utrymannia avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia, zatverdzhenykh nakazom Ministerstva rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy vid 02.05.2022 No. 273, zareiestrovanykh v Ministerstvi yustytzii Ukrainy 17 travnia 2022 r. za No. 527/37863. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0527-22#Text> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
3. Metodyky vyznachennia vartosti dorozhnykh robot ta posluh shchodo vyznachennia vartosti novoho budivnytstva, rekonstruktsii, remontiv ta ekspluatatsiinoho utrymannia avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia (Rules for determining the cost of construction, reconstruction, repair and maintenance of public roads, approved by Order of the Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine), zatverdzhenoï nakazom Ministerstva infrastruktury Ukrainy 07 zhovtnia 2022 roku No. 753, Kyiv, 2022. 95 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
4. Zakon Ukrainy «Pro publichni zakupivli» // Baza danykh zakonodavstvo Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/922-19#Text> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
5. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 01.08.2005 № 668 «Pro zatverdzhennia Zahalnykh umov ukladennia ta vykonannia dohovoriv pidriadu v kapitalnomu budivnytstvi» // Baza danykh zakonodavstvo Ukrainy / Verkhovna rada Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/668-2005-%D0%BF.#Text> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
6. URL: <https://www.bls.gov/ppi/publications/price-adjustment-guide-for-contracting-parties.htm> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
7. URL: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/25973/dot_25973_DS1.pdf (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
8. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/en/catalogue/62F0014M2022012> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
9. URL: <https://nap.nationalacademies.org/read/25410/chapter/3> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
10. URL: <https://publications.parliament.uk/pa/cm201012/cmselect/cmtreasy/1146/1146vw28.htm> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
11. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cost-plus_contract (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
12. URL: <https://www.whitecase.com/insight-our-thinking/constructing-low-carbon-economy-geopolitical-challenges-australias-construction> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
13. URL: <https://cms.law/en/media/international/files/publications/guides/cms-guide-to-contract-alliancing-in-construction> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
14. URL: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-on-price-increases-in-commercial-contracts/china> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
15. DSTU 8747:2017 «Avtomobilni dorhy. Vydy ta pereliky robot z remontiv ta ekspluatatsiinoho utrymannia» (Motorways. Types and lists of repair and maintenance works,), pryiniato ta nadano chynnosti nakazom Derzhavnoho pidpriemstva «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs») vid 20 hrudnia 2017 roku No. 434 z 2020.01.01, Kyiv, 2017. 11 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
16. Poriadok zdiisnennia kontroliu yakosti utrymannia ta remontu avtomobilnykh dorih (Procedure for quality control of maintenance and repair of motorways), Kyiv 2007, 8 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
17. URL: <https://prices.restoration.gov.ua/sum/> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].
18. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/buildprice/> (data zvernennia: 03.10.2025) [in Ukrainian].

Artem Bezuglyi, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-3883-7968>

Bibyk Yuliya, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-7197-8909>

Ihor Hresko, <https://orcid.org/0000-0002-7175-7436>

Natalia Mudrychenko, <https://orcid.org/0000-0002-9423-5518>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructurt» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

JUSTIFICATION OF THE FEASIBILITY OF APPLYING A DYNAMIC CONTRACT PRICE WHEN PERFORMING WORK ON THE OPERATIONAL MAINTENANCE OF PUBLIC ROADS USE

Abstract

Introduction. Operational maintenance of highways — is a set of measures aimed at preserving road infrastructure and ensuring continuous traffic. From an economic point of view, this is a basic type of service, according to which current costs for maintaining the functionality of the road network are formed, resource savings are ensured and future long-term costs associated with major repairs of the road are reduced.

The dynamic contract price for the operational maintenance of highways is a promising tool that will contribute to adaptation to the realities of the modern economy and ensure the effective use of funds. However, its implementation requires clear regulations, transparency of processes, improvement of the regulatory framework, development of project monitoring and management technologies.

If it is impossible to finally establish the type of contract price during the conclusion of the contract due to uncertainty of costs or other circumstances, the parties to the contract determine the type of dynamic contract price, as well as the procedure for its adjustment during the performance of road works or services. Therefore, the dynamic contract price — is an estimate to be specified in the event of a change in the current prices for resources taken into account in the contract price, as well as for other reasons determined by the terms of the contract.

Therefore, the use of a dynamic contractual price when concluding contracts for the operational maintenance of public highways will increase economic efficiency, since: costs are subject to clarification in accordance with fluctuations in prices for material, technical and labor resources, etc.; risks for contractors will be reduced, which will positively affect competition and the quality of services; at the same time, state funds will be used more rationally.

Thus, the dynamic type of contractual price offers a more flexible model for determining the cost of works and services, and carrying out mutual settlements, which helps to reduce risks for contractors and customers, ensures a fairer distribution of financial obligations in the event of fluctuations in market prices, and also forms conditions for rational use of public funds and increasing the economic efficiency of public investments.

Issues. The following scientists Ilyash S. I., Kanin O. P., Lipskyi G. E., Pechonchyk T. I., Prusenko E. D., Stasyuk B. O., Tsinka A. O. and others investigated the problems of determining the cost of works on the operational maintenance of public highways, as well as a significant contribution to the development of theoretical and practical foundations, solving various issues with the development of the road management system and transport infrastructure of Ukraine.

The issue of correctly determining the cost of works and services at all stages of the investment process becomes especially relevant in the conditions of the already difficult economic situation that has developed in the country against the background of hostilities on the part of the Russian Federation, as well as the limited level of financing that exists today, since it is impossible to ensure full proper financing of infrastructure restoration services in the areas under which the functions of the customer of works on the operational maintenance of public highways are assigned.

According to the results of the analysis of public procurement through the Prozorro electronic procurement system, it can be seen that the vast majority of contracts for the operational maintenance of public highways are concluded for a period of 3 years. During this period, there may be an unpredictable increase in

the cost of material, technical and labor resources, which may be reflected in the inability of the contractor to perform both certain types of work and work in general at a firm contractual price. This can have a negative impact on ensuring continuous, safe and convenient movement.

Purpose. The purpose of the article is to substantiate the expediency of applying a dynamic contractual price when concluding contracts for the operational maintenance of public highways, which will create prerequisites for making changes to the relevant regulatory documents, as well as contribute to a more rational and effective use of budget funds.

Materials and methods. During this study, an analysis of normative legal acts and normative documents regulating the procedure for applying the contract price in the performance of road works and services was carried out, as well as an analysis of world experience in the implementation of contracts under the terms of the dynamic contract price was carried out.

Results. In the course of the conducted research, the expediency of using a dynamic contract price in the performance of works on the operational maintenance of public highways was analyzed. Taking into account the practice of performing these works in the leading countries of the world, as well as the analysis of normative legal acts and documents, conclusions were drawn and proposals were prepared for the application of a dynamic contractual price when concluding contracts for the operational maintenance of public highways.

Conclusions. Therefore, the implementation of changes related to the application of a dynamic contract price will be an important step on the way to improving pricing mechanisms, the main result of which is a flexible system of mutual settlements for completed works or services.

Keywords: road, operational maintenance, dynamic contractual price, contractual relations.

УДК 341.242

Безуглий А. О., канд. екон. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-3883-7968>Комар В. Ю., <https://orcid.org/0000-0002-2634-9257>*Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна*

ІННОВАЦІЙНІ ФОРМИ КОНТРАКТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Анотація

Вступ. Транспортна інфраструктура України зазнала руйнування та пошкоджень через воєнні дії на території України. Запроваджений воєнний стан у 2022 року відкоригував пріоритети з розвитку транспортної інфраструктури на її відновлення та відбудову для зменшення негативних ефектів на соціально-економічну сферу. Особливостями транспортної інфраструктури слід вважати синергетичний вплив на обороноздатність та обслуговування потреб оборони країни, вплив на соціальну стабільність суспільства та обслуговування гуманітарних потоків, вплив на економічну активність і забезпечення ланцюгів постачання для виробничих, торгівельних, аграрних і підприємств інших галузей економіки, мобільність населення для потреб освіти, охорони здоров'я, зайнятості тощо. Транспортна інфраструктура України до 2022 року активно оновлювалася через реалізацію Національної транспортної стратегії України на період до 2023 року та програму «Велике будівництво», що мало наслідком формування нової філософії у транспортній сфері і дорожньому господарстві.

Проблематика. Зміна основного фокусу інфраструктурних проєктів з розвитку та розширення транспортної інфраструктури на відновлення та відбудову доповнюється сукупністю інших викликів, що пов'язані з воєнними діями на території України, економічною невизначеністю, фіскальними дисбалансами, дефіцитом на ринку праці через мобілізацію та інші соціально-економічні проблеми, що вимагають реформування інституційного забезпечення. Як наслідок, було схвалено оновлену редакцію Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затверджено операційний план заходів з її реалізації у 2025-2027 роках, удосконалено публічне адміністрування відновлення транспортної інфраструктури України, залучено міжнародних партнерів до реалізації інфраструктурних проєктів, у тому числі через екосистему DREAM. Проте окремого наукового обґрунтування вимагають інші складові інституційного забезпечення інфраструктурних проєктів, а саме впровадження нових (інноваційних) форм контрактів.

Метою дослідження. Метою дослідження є узагальнення основних положень інноваційних форм контрактів (проєктуй-будуй) у контексті досвіду реалізації інфраструктурних проєктів у 2019-2024 роках та обґрунтування їх потенціалу для відновлення транспортної інфраструктури України.

Матеріали та методи. Науковим і теоретичним підґрунтям дослідження слугують загальнонаукові положення економічної теорії щодо реалізації контрактів у дорожньому господарстві із застосуванням методів історичного аналізу та наукового узагальнення для визначення особливостей реалізації інфраструктурних проєктів, економіко-статистичного аналізу за оголошеними публічними закупівлями інфраструктурних проєктів. Інформаційною базою дослідження стали офіційні статистичні дані Міністерства фінансів України щодо розмірів бюджетного фінансування дорожнього господарства та дані електронної системи Prozorro за оголошеними публічними закупівлями проєктних робіт за інфраструктурним проєктами за 2019-2024 роки, у тому числі проєкти за типом Design-Build.

Результати. Узагальнено основні виклики відбудови транспортної інфраструктури та напрацювання покращення інституційної складової реалізації інфраструктурних проєктів, що реалізовані з початку 2023 року: започаткування функціонування екосистеми DREAM для створення, фінансування, управління і контролю над проєктами; з липня 2025 року започаткування реалізації нового національного проєкту «Проєктуй і будуй»; оновлення нормативно-правового забезпечення

реалізації інфраструктурних проєктів та зміна розподілу повноважень між органами виконавчої влади. Узагальнено досвід впровадження більш ефективних форм контрактів для дорожнього господарства за довідником Ресурсного центру державно-приватного партнерства групи Світового банку та визначено перспективи подальших наукових розвідок за інноваційними формами контрактів. Проаналізовано ретроспективу впровадження інноваційних форм контрактів в Україні за даними електронної системи Prozorro, що розпочалася з 2018 року. Позитивною тенденцією розроблення і реалізації інфраструктурних проєктів визначено набуття досвіду як замовниками, так і підрядниками за контрактами Design-Build та формування сукупності постачальників послуг з розроблення проєктної документації та виконання дорожніх робіт. Ідентифіковано сукупність дискусійних особливостей реалізації контрактів Design-Build, а саме складність визначення вартісних показників (очікувана вартість, цінові пропозиції, договірна ціна), відсутність високого рівня конкуренції, обмеженість чисельності підрядників інфраструктурних проєктів з переважанням суб'єктів господарювання-резидентів до 2022 року та переважанням суб'єктів господарювання — нерезидентів з 2022 року; укладення переважно контрактів на поточний середній ремонт автомобільних доріг, рідше — будівництво; дострокове розірвання більшості контрактів через воєнний стан тощо.

Висновки. Обґрунтовано, що відбудову транспортної інфраструктури України слід вважати пріоритетом національної відбудови в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення з високим рівнем суспільної цінності та корисності, окремі аспекти високого рівня суспільної цінності та корисності відбудови отримали інституційну підтримку Уряду України, міжнародних фінансових і гуманітарних організацій через нормативне закріплення принципу «build back better» — «відбудуй краще, ніж було», налагодження роботи екосистеми DREAM і перегляд пріоритетності форм контрактів інфраструктурних проєктів із запровадженням національного проєкту «Проєктуй і будуй». Досліджено інноваційні форми контрактів для відновлення транспортної інфраструктури за сукупністю позитивних ефектів у розвинутих країнах і потенціал для подальшого впровадження в Україні. Інноваційні форми контрактів, наприклад, проєктуй-будуй, мають потенціал для відновлення транспортної інфраструктури з реалізацією проєктів на умовах пріоритетності, прозорості, публічності та конкурентності, ефективного використання бюджетних коштів і коштів міжнародної фінансової допомоги для потреб відновлення та розвитку конкурентоспроможної та ефективної транспортної системи, інтегрованої до транс'європейської транспортної мережі.

Ключові слова: автомобільна дорога, вартість, контракт, інфраструктурні проєкти, договірна ціна, проєктуй-будуй, проєктування-будівництво, Design-Build, Prozorro, екосистема DREAM.

Вступ

Воєнні дії на території України мають множинні та синергетичні негативні наслідки на різні сфери соціально-економічного життя суспільства. Особливої уваги потребує проблематика руйнування транспортної інфраструктури, оскільки саме руйнування транспортної інфраструктури яскраво демонструє синергетичність негативних наслідків через порушення ланцюгів постачання, що має визначальний вплив на економічні процеси виробничих, торгівельних, аграрних та підприємств інших галузей економіки, мобільність населення для потреб освіти, охорони здоров'я, зайнятості тощо. Основними негативними проявами визначають вплив на економічну стабільність [1, с. 160], можливість економічного зростання країни [2, с. 598] чи окремих регіонів [3, с. 142], логістичні можливості / логістичні ланцюги [1, с. 160; 4, с. 201], зниження експортного потенціалу [4, с. 201] та мобільність населення [1, с. 160; 3, с. 142], що вказує на актуальність відновлення транспортної інфраструктури як пріоритет та ключовий вектор відновлення України.

Змін також зазнали основні цілі розвитку транспортної інфраструктури, якщо за НТСУ розвиток транспортної інфраструктури мав на меті покращити якість надання транспортних послуг та їх конкурентоспроможність, сприяння економічному розвитку та інші екологічні, адміністративні, антикорупційні ефекти, то відбудова першочергово реалізується «для цілей соціальних, гуманітарних або воєнних» [5, с. 132]. Однак, обслуговування економічної активності та безперебійного виробництва не слід виключати та заперечувати, оскільки зайнятість населення, фіскальний потенціал виробництва через сплату податків та інших обов'язкових платежів, надходження експортної виручки формує фіскальний та валютний потенціал для суспільства, в тому числі його відбудови і відновлення. «Розвиток транспортної інфраструктури має найбільший потенціал для прискорення економічного

зростання України» [1, с. 160], такої думки дотримуються інші українські вчені та наполягають на інтенсивному відновленні транспортної інфраструктури [3, с. 142].

Проблематику транспортної інфраструктури України досліджували провідні українські науковці резюмуючи, що до 2022 року ідентифікувалася як необхідність розвитку транспортної інфраструктури, покращення її якості та модернізацію, схвально підтримуючи Національну транспортну стратегію України на період до 2023 року (НТСУ) [1, с. 159–160; 6, с. 491; 7] та програму «Велике будівництво» [6, с. 491], проте вказуючи на недостатність інвестицій для розвитку та модернізації транспортної інфраструктури [2, с. 608; 7; 8, с. 13], відсутність ефективної конкуренції [2, с. 608], численні факти корупції у сфері транспортного будівництва [2, с. 608] за умови вольтильності бюджетного фінансування інфраструктурних проєктів [8; 9], також світова наукова спільнота вказує на важливість транспортної інфраструктури для забезпечення соціально-економічного розвитку.

З 2022 року основний напрямом наукових досліджень стає необхідність відновлення та відбудови пошкодженої чи зруйнованої транспортної інфраструктури: «війна не лише змусила поставити на паузу всі масштабні плани інфраструктурного будівництва країни, але й розставила першочергові акценти відновлення» [5, с. 132] або досягнення цілей сталого розвитку [1], відновлення інвестиційної привабливості України [4]. Варто відмітити наукові розробки Ю. Бібик, І. Линник, О. Парубця, Т. Печончика, М. Пусевої, Є. Смуригіна, Б. Стасюка, І. Турченко, В. Червякової та інших з проблем руйнування та відновлення транспортної інфраструктури, в яких проводиться аналіз втрат транспортної інфраструктури [2; 10; 11], обґрунтовуються алгоритми визначення пріоритетних об'єктів під час ініціації проєктів відновлення транспортної інфраструктури в умовах обмежених фінансових ресурсів [3], механізми залучення приватного сектору та розвиток державно-приватного партнерства (ДПП) [6; 12], залучення міжнародних інвестицій та донорських коштів [2; 6; 13], вивчення іноземного досвіду відбудови транспортної інфраструктури [14]. Основними умовами відновлення транспортної інфраструктури визначають дотримання рівня міжнародних стандартів по технічних характеристиках [15, с. 50], цифровізація [2, с. 613; 4, с. 201; 5, с. 136; 7], розроблення ефективних правових механізмів для спрощення процедур відновлення [4, с. 202; 15, с. 51], залучення інвестицій та міжнародної допомоги [4, с. 202; 7; 15, с. 51; 16], використання принципу «everyone sees everything» [15, с. 52].

Погоджуємося з твердженням А. Устименка, що слід вважати «очевидною необхідність комплексного підходу до вирішення проблем у транспортній галузі, який має поєднувати як проблеми, що існували до війни, так і виклики, спричинені військовими діями» [1, с. 160], вимога комплексного підходу описана у працях О. Парубця [4, с. 201] та інших. За власними дослідженнями і науковою позицією маємо додати, що комплексність повинна бути доповнена не лише врахуванням набутого досвіду та викликів воєнного стану, а вимогами євроінтеграції та міжнародного співробітництва у транспортній сфері з дотриманням принципу «build back better» — «відбудуй краще, ніж було» [17] та запровадженням у практичне застосування інноваційних форм контрактів.

Враховуючи наукові напрацювання у царині відновлення транспортної інфраструктури України визначаємо спільність наукових позицій щодо необхідності та пріоритетності відновлення транспортної інфраструктури, проте окремого наукового обґрунтування вимагає інституційне забезпечення даного процесу, а саме впровадження нових (інноваційних) форм контрактів.

Основна частина

Відбудова транспортної інфраструктури України слід вважати стратегічно важливим завданням з чисельними викликами, що ускладнює процес реалізації інфраструктурних проєктів. Одним з таких викликів є покращення інституційної складової реалізації проєктів з відбудови транспортної інфраструктури та удосконалення адміністрування проєктів, пошук кращих форм контрактів, покращення методичних підходів до визначення вартісних показників інфраструктурних проєктів тощо. Для покращення інституційної складової реалізації інфраструктурних проєктів розпочато у 2023 році функціонування екосистеми DREAM для створення, фінансування, управління і контролю над проєктами, за ініціатииви Уряду України з липня 2025 року розпочинається реалізація нового національного проєкту «Проєктуй і будуй» терміном на два роки. Було оновлено нормативно-правове забезпечення реалізації інфраструктурних проєктів, також змін зазнав розподіл повноважень між органами виконавчої влади. Таким чином, відбудова транспортної інфраструктури України передбачає

пошук кращих та більш ефективних форм адміністрування інфраструктурних проєктів, форм контрактів та їх інституційного забезпечення, спрямування власних фінансових ресурсів на відбудову стратегічно важливої компоненти соціально-економічного розвитку і забезпечення обороноздатності України (видатки Зведеного бюджету на дорожнє господарство (код функціональної класифікації видатків — 0456) коливалися від 57 436,30 млн грн до 97 960,30 млн грн у 2022 – 2024 роках, **рис. 1**), залучення фінансування від міжнародних організацій за умови дефіцитності бюджету України.

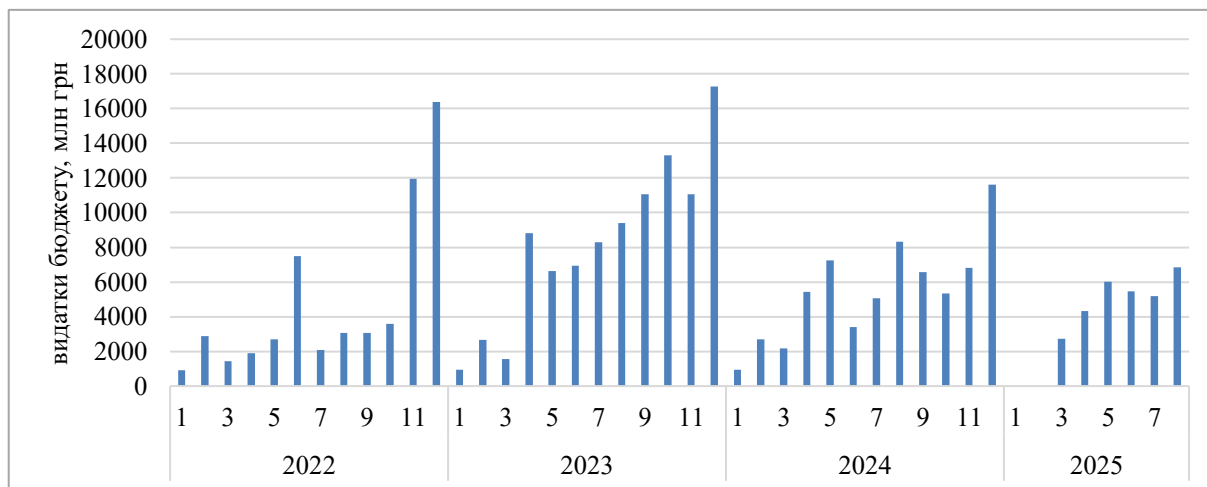


Рисунок 1 — Видатки Зведеного бюджету України на дорожнє господарство у 2022-2025 роках, млн грн

Актуальним для вітчизняного досвіду є не лише пошук додаткових (крім бюджетних) джерел фінансування інфраструктурних проєктів, а актуальним є впровадження більш ефективних форм контрактів для дорожнього господарства, що набули поширення в іноземних країнах та мають потенціал для України та підвищення ефективності видатків на інфраструктурні проєкти. Ресурсний центр державно-приватного партнерства групи Світового банку сформував Довідник ДПП (*Reference Guide*) який визначає типові функції проєктів: проєктування (design), будівництво або реконструкція (build), фінансування (finance), підтримка (maintain), експлуатація (operate). На основі поєднання різних функцій реалізуються наступні контракти: з функцією проєктування: проєктування — будівництво (Design-Build, DB), проєктування — будівництво — експлуатація (DBO), проєктування-будівництво — фінансування — експлуатація — обслуговування (DBFOM), проєктування — будівництво-фінансування-експлуатація (DBFO), проєктування — будівництво — управління — фінансування (DCMF); без функції проєктування: будівництво — експлуатація — передача (BOT), будівництво — володіння — експлуатація — передача (BOOT), будівництво — передача — експлуатація (BTO) тощо. Особливої уваги вимагають контракти «проєктування — будівництво», альтернативно «проєктуй-будуй» через їхні переваги та активне застосування в країнах з високим рівнем економічного розвитку, публічного адміністрування та транспортної інфраструктури.

Ретроспектива впровадження інноваційних форм контрактів в Україні розпочалася з 2018 року, коли за ініціатииви Всесвітньої дорожньої асоціації, Мінінфраструктури України, професійних об'єднань та науковців проведено ряд заходів з імплементації контрактів Design-Build для розбудови транспортної інфраструктури. Першим з контрактів Design-Build був реалізований за ініціатииви та за вимогою іноземних кредиторів реалізованого проєкту. За даними електронної системи Prozorro, перший оголошений тендер за контактами Design-Build у 2019 році на будівництво (влаштування) надземного пішохідного переходу на автомобільній дорозі загального користування державного значення М-06 Київ-Чоп (розробка проєктної документації з будівництва автомобільних доріг, інженерних споруд, її експертиза, виконання будівельних робіт) (UA-2019-06-18-000377-с; UA-2019-06-18-000404-с; UA-2019-06-18-000429-с; UA-2019-06-18-000447-с; UA-2019-07-16-000979-б),

тобто за першими чотирма тендерними пропозиціями торги не відбувалися через відсутність або недостатню кількість учасників торгів та укладений договір був розірваний за згодою сторін (ДП «Фінансування інфраструктурних проєктів» та ТОВ «Виробнича компанія «Укрстальспецконструкція»). У наступних роках контакти Design-Build набували свого поширення. Протягом 2020 року укладено понад двадцять контрактів, проте переважна їх кількість укладалася на поточний середній ремонт (найбільш вартісними тендерними пропозиціями з очікуваною вартістю понад 100 млн грн були UA-2020-12-30-005378-с, UA-2020-10-20-010998-с, UA-2020-07-30-001992-а, UA-2020-07-02-003835-а, UA-2020-12-30-003413-б, UA-2020-12-30-003484-б, UA-2020-07-24-004220-с, UA-2020-07-02-004159-а, UA-2020-07-22-003632-с, UA-2020-06-24-001366-с, UA-2020-07-22-001842-а), винятковими слід вважати контракти на капітальний ремонт з розробкою тендерної документації автомобільної дороги загального користування місцевого значення О-210823 Старий – Салтів – Приколотне км 0+000 – км 24+600 (окремими ділянками) у Харківській області (UA-2020-08-06-001841-б) за очікуваною вартістю 431,6 млн грн та капітальний ремонт дороги по вул. Петра Василенка в с. Мартове Печенізького району Харківської області (UA-2020-07-29-001210-б) за очікуваною вартістю 2,8 млн грн. Перший контракт не був виконаний повною мірою та розірваний 2023 року, другий контракт виконано та оплачено повністю (2,4 млн грн).

Позитивна тенденція застосування контактів Design-Build продовжилася у 2021 року, на поточний середній ремонт протягом року укладено понад сто контактів за умови підвищення рівня середньої очікуваної вартості, збільшення чисельності учасників торгів та інших позитивних зрушень, проте більшість таких контрактів частково (UA-2021-07-12-001878-а, UA-2021-07-27-001105-с, UA-2021-09-14-011792-б, UA-2021-08-03-003438-а, UA-2021-10-12-002670-с, UA-2021-06-24-003193-а, UA-2021-05-24-003586-а, UA-2021-09-24-005682-б, UA-2021-05-28-002556-а, UA-2021-05-24-003551-а, UA-2021-07-28-000939-а, UA-2021-09-09-011766-с, UA-2021-05-13-004479-а) чи повністю (UA-2021-12-13-006649-а, UA-2021-10-01-001260-с, UA-2021-10-22-003032-с, UA-2021-11-17-013238-а, UA-2021-12-09-009313-а, UA-2021-12-10-008370-а, UA-2021-08-13-008620-а, UA-2021-10-29-000308-с) не вдалося виконати через запровадження у лютому 2022 року воєнного стану та відбувалося дострокове розірвання контрактів, окремі з них продовжують реалізовуватися (UA-2020-12-30-003314-б, UA-2021-03-18-004970-б, UA-2021-10-12-004075-с, UA-2021-06-18-002928-а). Контракти на капітальний ремонт автомобільних доріг з розробкою проєктної документації були для автомобільної дороги загального користування місцевого значення О-211027 Дергачі – Дворічний Кут км 0+102 – км 0+787; км 0+867 – км 18+372 у Харківській області (UA-2021-10-28-002159-б), проте договір розірвано з урахування воєнного стану в країні та воєнних дій, що мало місце у реалізації інших договорів Харківської області (UA-2021-10-28-003524-с, UA-2021-10-28-003953-с, UA-2021-10-28-008239-а, UA-2021-05-21-002676-с, UA-2021-06-25-004532-б, UA-2021-07-30-000525-а).

Таким чином, запровадження воєнного стану на території України для більшості укладених контрактів став основною причиною їх розірвання, інколи неможливості реалізації через воєнні дії чи втрату контролю над територією, що ускладнює наукове дослідження та робить неможливим визначення показників ефективності реалізації контрактів Design-Build. Позитивною тенденцією розроблення і реалізації інфраструктурних проєктів стало набуття досвіду як замовниками, так і підрядниками та формування сукупності постачальників послуг з розроблення проєктної документації та виконання дорожніх робіт, на прикладі робіт з капітального ремонту автомобільних доріг: ТОВ «БК Євродор» (переможець за UA-2020-08-06-001841-б, UA-2021-10-28-003524-с), ТОВ «Дортехстрой» (UA-2020-07-29-001210-б), ПП «Будгарант-7» (UA-2021-10-28-002159-б), ТОВ «Євро-Буд Плюс» (UA-2021-10-28-008239-а, UA-2021-06-25-004532-б, UA-2021-05-19-003185-а), ТОВ «Паокінг+» (UA-2021-05-21-002676-с), ТОВ «Техно-Буд-Центр» (UA-2021-12-29-010290-с), ТОВ «Інтех Комплект» (UA-2021-07-30-000525-а).

У вересні-жовтні 2022 році розпочався новий етап розвитку транспортної інфраструктури на умовах її відбудови та відновлення, що має підтвердженням оприлюднені тендерні пропозиції на будівництво міжнародного пункту пропуску на українсько-румунському кордоні (UA-2025-06-13-011931-а), капітальний ремонт мостів (UA-2022-10-06-007229-а, UA-2022-10-06-007838-а, UA-2022-10-06-008119-а, UA-2022-10-06-008358-а (детально у табл. 1),

капітальний ремонт шляхопроводів та доріг (UA-2022-10-06-008534-а, UA-2023-06-13-013412-а), реконструкція мостового переходу (UA-2022-12-16-011131-а) та поточний середній ремонт автомобільних доріг (UA-2022-02-28-001635-а, UA-2022-06-23-007127-а, UA-2022-01-04-004677-с, UA-2022-02-22-002323-с) з розробкою проєктної документації.

Таблиця 1

Узагальнюючі дані за інфраструктурними проєктами
із застосуванням контрактів Design-Build за мостами та мостовими переходами
(ДК 021:2015: 45221000-2 та ДК 021:2015: 45230000-8)

ID в системі Prozorro	Статус закупівлі	Очікувана вартість, млн грн	Кількість учасників торгів	Переможець
		Вартість договору, млн грн		
Вінницька обл.				
UA-2021-04-30-001829-a	завершено	3460,00	2	ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Автострада»
		3386,40		
UA-2022-11-01-006250-a	завершено	131,00	1	ТОВ «Енергетично-дорожнє будівництво»
		130,70		
UA-2021-12-29-010553-c	торги відмінено	105,00	-	-
UA-2021-10-08-002395-a	торги не відбулися	25,20	-	-
UA-2022-08-15-004028-a	завершено	64,24	1	ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Автострада»
		64,24		
UA-2022-12-15-018738-a	завершено	40,40	1	ТОВ «Енергетично-дорожнє будівництво»
		40,01		
Житомирська обл.				
UA-2021-05-18-011020-b	завершено	5,00	2	ТЗОВ «РБП Транс-Мост»
		4,99		
UA-2022-10-07-001638-a	завершено	72,31	1	ТОВ «РДС»
		72,31		
Київська обл.				
UA-2022-10-06-007229-a	завершено	47,55	2	Doğuş İnşaat Ve Ticaret A.Ş.
		47,13		
UA-2022-10-06-007838-a	завершено	49,80	2	Onur Taahhut Tasimacilik Insaat Ticaret Ve Sanayi Anonim Sirket
		49,42		
UA-2022-10-06-008119-a	завершено	449,80	2	Onur Taahhut Tasimacilik Insaat Ticaret Ve Sanayi Anonim Sirket
		447,32		
UA-2022-10-06-008358-a	завершено	25,38	2	Onur Taahhut Tasimacilik Insaat Ticaret Ve Sanayi Anonim Sirket
		25,25		
UA-2022-10-06-006829-a	завершено	198,52	2	Doğuş inşaat ve ticaret a.ş.
		197,35		
UA-2024-09-23-004691-a	завершено	16,95	1	ТОВ «Автомобільна Південь»
		16,57		
Рівненська обл.				
UA-2022-10-05-004504-a	завершено	390,00	1	ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Автострада»
		389,99		

Оскільки особливої актуальності набуває капітальний ремонт мостів, сформуємо узагальнені дані за проектами капітального ремонту мостів у довоєнний період та період воєнного стану можна визначити такі особливостям як відсутність високого рівня конкуренції між учасниками та наявність публічних закупівель з одним учасником (UA-2022-11-01-006250-a, UA-2022-08-15-004028-a, UA-2022-12-15-018738-a, UA-2022-10-07-001638-a, UA-2022-10-05-004504-a, UA-2024-09-23-004691-a), що є підставою для формування рекомендацій з підвищення інвестиційної привабливості та популяризації інфраструктурних проєктів на будівельному ринку України, обмеженість чисельності реалізаторів інфраструктурних проєктів з переважанням суб'єктів господарювання — резидентів до 2022 року (ТОВ «Спільне українсько-німецьке підприємство «Автострада», ТОВ «Енергетично-дорожнє будівництво», ТОВ «РДС», ТЗОВ «РБП ТРАНС-МОСТ») та переважанням суб'єктів господарювання — нерезидентів з 2022 року (Onur Taahhut Tasimacilik Insaat Ticaret Ve Sanayi Anonim Sirket та Doğuş inşaat ve ticaret a.ş., резиденти Турецької Республіки), обмежена географія реалізації інфраструктурних проєктів із застосуванням контрактів Design-Build (Вінницька, Житомирська, Київська, Рівненська обл.).

Висновки

Відбудову транспортної інфраструктури України слід вважати одночасно пріоритетом відбудови в умовах воєнного стану та повоєнного відновлення з високим рівнем суспільної цінності та корисності, що вимагає усвідомленості всіма членами суспільства та міжнародною спільнотою для забезпечення соціальних, гуманітарних та оборонних цілей, а також відбудови і сталого розвитку економічного потенціалу країни. Окремі аспекти високого рівня суспільної цінності та корисності відбудови отримали інституційне забезпечення та підтримку Уряду України, міжнародних фінансових та гуманітарних організацій через нормативне закріплення принципу «build back better» — «відбудуй краще, ніж було», у тому числі з урахуванням стандартів, передбачених міжнародно-правовими зобов'язаннями України у сфері європейської інтеграції, права Європейського Союзу (acquis EC), зокрема стандартів щодо безпеки на транспорті та декарбонізації транспорту, налагодження роботи екосистеми DREAM і перегляд пріоритетності форм контрактів із запровадженням національного проєкту «Проєктуй і будуй».

Інноваційні форми контрактів для відновлення транспортної інфраструктури задекларували позитивні ефекти у розвинутих країнах і мають потенціал для подальшого впровадження в Україні, оскільки окремі проєкти будівництва, середнього та капітального ремонту автомобільних доріг і мостів у 2019-2022 роках реалізовувалися комплексом робіт з проєктування та виконання дорожніх робіт, українські підприємства мають досвід реалізації таких проєктів, що формує передумови для відновлення транспортної інфраструктури на умовах пріоритетності, прозорості та публічності, конкурентності, ефективного використання бюджетних коштів і коштів міжнародної фінансової допомоги для потреб відновлення та розвитку конкурентоспроможної й ефективної транспортної системи, інтегрованої до транс'європейської транспортної мережі.

Список літератури

1. Устименко А. В. Стійкий розвиток транспортної інфраструктури в контексті забезпечення досягнення Цілей сталого розвитку України. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія : Право*. 2024. Вип. 85(3). С. 156–161. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.85.3.24>.
2. Червякова В. Організаційно-методологічні підходи до післявоєнного відновлення транспортно-логістичної інфраструктури України. *Журнал європейської економіки*. 2023. Т. 22, № 4. С. 597–622.
3. Тригуба А. М., Демчина В. Р., Ратушний А. Р., Коваль Л. С. Метод та результати визначення пріоритетних об'єктів під час ініціації проєктів відновлення транспортної інфраструктури у післявоєнний час. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 29. С. 141–151. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.15>.
4. Парубець О. М. Модернізація транспортно логістичної інфраструктури України під час війни: правовий аспект та економічне значення для відновлення держави. *Dictum factum*. 2024. № 2. С. 201–209. DOI: <https://doi.org/10.32703/2663-6352/2024-2-16-201-209>.

5. Бойченко М. В. Відновлення та розвиток транспортної інфраструктури у повоєнний період. *Економічний вісник Донбасу*. 2023. № 3 (73). С. 132–137. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-3\(73\)-132-137](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-3(73)-132-137).
6. Радченко О. В., Кучабський О. Г., Козенко Р. В. Державна політика України у сфері транспорту й транспортної інфраструктури в передвоєнне десятиліття. *Суспільство та національні інтереси*. 2024. № 6. С. 480–496. DOI: [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-6\(6\)-480-496](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-6(6)-480-496).
7. Пусева М. Стратегічні напрями відновлення та розвитку транспортної інфраструктури України. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 49. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-49-37>.
8. Безуглий А. О., Стасюк Б. О., Печончик Т. І., Мудриченко Н. С., Дуля М. В. Концептуальні засади визначення ефективності виконання завдань і заходів державних цільових програм розвитку для підвищення ефективності управління автомобільними дорогами. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. С. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.013>.
9. Бойко С. В., Гошовська В. В., Бойко Н. В. Волатильність бюджетного фінансування дорожнього господарства в Україні. *Modern Economics*. 2019. № 14(2019). С. 26–32. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V14\(2019\)-04](https://doi.org/10.31521/modecon.V14(2019)-04).
10. Линник І. Е. Аналіз втрат транспортної інфраструктури України внаслідок російської агресії. *Просторовий розвиток*. 2024. Вип. 8. С. 302–314. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.302-314>.
11. Безуглий А. О., Каськів В. І., Стасюк Б. О., Ілляш С. І., Бібик Ю. М. Теоретичні аспекти та методичні підходи до визначення розміру шкоди та збитків, завданих автомобільним дорогам внаслідок збройної агресії. *Дороги і мости*. 2023. Вип. 28. С. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.019>.
12. Смуригін Є. О. Державно-приватне партнерство у сфері інфраструктури в умовах воєнних викликів та загроз: адміністративно-правові засади. *Dictum factum*. 2025. № 1. С. 190–197. DOI: <https://doi.org/10.32703/2663-6352/2025-1-17-190-197>.
13. Турченко І. В. Контракти «під ключ» у сфері розбудови транспортної інфраструктури України. *Міжнародний науковий журнал Інтернаука. Серія : Юридичні науки*. 2024. № 11. С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2308-2024-11-10479>.
14. Науменко Н., Засекін О. Стратегія повоєнного відновлення транспортної інфраструктури України: транзитна складова. *Міжнародні відносини, суспільні комунікації та регіональні студії*. 2023. № 3 (17). С. 353–381. DOI: <https://doi.org/10.29038/2524-2679-2023-03-353-381>.
15. Кирчата І. М., Шершенюк О. М., Кирчатий Ю. В. Стратегічні орієнтири відновлення та розвитку транспортної інфраструктури: проєктний підхід. *Проблеми та перспективи розвитку підприємництва*. 2024. № 32. С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.32.48>.
16. Линник І. Е. Поствоєнне відновлення об'єктів транспортної інфраструктури за допомоги міжнародних партнерів. *Містобудування та територіальне планування*. 2025. Вип. 88. С. 283–294. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.88.283-294>.
17. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках: Постанова Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n22> (дата звернення 09.07.2025).

References

1. Ustymenko A. V. Stiiky rozvytok transportnoi infrastruktury v konteksti zabezpechennia dosiahnennia Tsilei staloho rozvytku Ukrainy (Sustainable development of transport infrastructure in the context of ensuring the achievement of the Sustainable Development Goals of Ukraine). *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seriya : Pravo*. 2024. Issue 85(3). P. 156–161. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.85.3.24> [in Ukrainian].
2. Cherviakova V. Orhanizatsiino-metodolohichni pidkhody do pisliavoiennoho vidnovlennia transportno-lohistychnoi infrastruktury Ukrainy (Organizational and methodological approaches to the post-war restoration of Ukraine's transport and logistics infrastructure). *Zhurnal yevropeiskoi ekonomiky*. 2023. T. 22, No. 4. P. 597–622 [in Ukrainian].

3. Tryhuba A. M., Demchyna V. R., Ratushnyi A. R., Koval L. S. Metod ta rezultaty vyznachennia prioritetykh ob'ektiv pid chas initsiatsii proektiv vidnovlennia transportnoi infrastruktury u pisliavoiennyi chas (The method and results of determining the priority objects during the initiation of projects for the restoration of transport infrastructure in the post-war period). *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*. 2024. No. 29. P. 141–151 DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.15> [in Ukrainian].
4. Parubets O. M. Modernizatsiia transportno lohistychnoi infrastruktury Ukrainy pid chas viiny: pravovyi aspekt ta ekonomichne znachennia dlia vidnovlennia derzhavy (Modernization of the transport and logistics infrastructure of Ukraine during the hour of war: legal aspect and economic significance for the modernization of the state). *Dictum factum*. 2024. No. 2. P. 201–209. DOI: <https://doi.org/10.32703/2663-6352/2024-2-16-201-209> [in Ukrainian].
5. Boichenko M. V. Vidnovlennia ta rozvytok transportnoi infrastruktury u povoiennyi period (Restoration and development of transport infrastructure in the post-war period). *Ekonomichnyi visnyk Donbasu*. 2023. No. 3 (73). P. 132–137. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-3\(73\)-132-137](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-3(73)-132-137) [in Ukrainian].
6. Radchenko O. V., Kuchabskyi O. H., Kozenko R. V. Derzhavna polityka Ukrainy u sferi transportu y transportnoi infrastruktury v peredvoienne desiatylittia (). *Suspilstvo ta natsionalni interesy*. 2024. No. 6. P. 480–496. DOI: [https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-6\(6\)-480-496](https://doi.org/10.52058/3041-1572-2024-6(6)-480-496) [in Ukrainian].
7. Pusieva M. Stratehichni napriamy vidnovlennia ta rozvytku transportnoi infrastruktury Ukrainy (Strategic directions of restore and development of the transport infrastructure of Ukraine). *Ekonomika ta suspilstvo*. 2023. Issue 49. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-49-37> [in Ukrainian].
8. Bezuhlyi A. O., Stasiuk B. O., Pechonchuk T. I., Mudrychenko N. S., Dulia M. V. Kontseptualni zasady vyznachennia efektyvnosti vykonання завдан і заходів державних тсільових програм розвитку дlia pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia avtomobilnymy dorohamy (Conceptual framework for determining the effectiveness of tasks and measures implementation in state targeted development programs to improve road management efficiency). *Dorohy i mosty*. 2024. Issue 30. P. 13–24. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.013> [in Ukrainian].
9. Boiko S. V., Hoshovska V. V., Boiko N. V. Volatylnist biudzhethnoho finansuvannia dorozhnogo hospodarstva v Ukraini (Volatility of Budget Financing of Road Economy in Ukraine). *Modern Economics*. 2019. No. 14(2019). P. 26–32. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V14\(2019\)-04](https://doi.org/10.31521/modecon.V14(2019)-04) [in Ukrainian].
10. Lynnyk I. E. Analiz vtrat transportnoi infrastruktury Ukrainy vnaslidok rosiiskoi ahresii (Analysis of losses to the transport infrastructure of Ukraine as a result of Russian aggression). *Prostorovyi rozvytok*. 2024. Issue 8. P. 302–314. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.302-314> [in Ukrainian].
11. Bezuhlyi A. O., Kaskiv V. I., Stasiuk B. O., Illiash S. I., Bibyk Yu. M. Teoretychni aspekty ta metodychni pidkhody do vyznachennia rozmiru shkody ta zbytkiv, zavdanykh avtomobilnym doroham vnaslidok zbroinoi ahresii (Theoretical aspects and methodological approaches to determining the amount of damage and losses caused to roads as a result of armed aggression). *Dorohy i mosty*. 2023. Issue 28. P. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.019> [in Ukrainian].
12. Smuryhin Ye. O. Derzhavno-pryvatne partnerstvo u sferi infrastruktury v umovakh voiennykh vyklykiv ta zahroz: administrativno-pravovi zasady (Public-private partnership in the sphere of infrastructure in the minds of military movements and threats: administrative and legal ambushes). *Dictum factum*. 2025. No. 1. P. 190–197. DOI: <https://doi.org/10.32703/2663-6352/2025-1-17-190-197> [in Ukrainian].
13. Turchenko I. V. Kontrakty "pid kliuch" u sferi rozbudovy transportnoi infrastruktury Ukrainy (Turnkey contracts in the development of Ukraine's transport infrastructure). *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal Internauka. Seriia : Yurydychni nauky*. 2024. No. 11. P. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2308-2024-11-10479> [in Ukrainian].
14. Naumenko N., Zasiakin O. Stratehiia povoiennoho vidnovlennia transportnoi infrastruktury Ukrainy: tranzitna skladova (strategy for the post-war restoration of Ukraine's transport infrastructure: transit component). *Mizhnarodni vidnosyny, suspilni komunikatsii ta rehionalni studii*. 2023. No. 3(17). P. 353–381. DOI: <https://doi.org/10.29038/2524-2679-2023-03-353-381> [in Ukrainian].

15. Kyrchata I. M., Shersheniuk O. M., Kyrchatyi Yu. V. Stratehichni oriientyry vidnovlennia ta rozvytku transportnoi infrastruktury: proiektnyi pidkhid (Strategic directions of restoration and development of transport infrastructure: project approach). *Problemy ta perspektyvy rozvytku pidpryiemnytstva*. 2024. No. 32. P. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.32.48> [in Ukrainian].

16. Lynnyk I. E. Postvoienne vidnovlennia ob'ektiv transportnoi infrastruktury za dopomohy mizhnarodnykh partneriv. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia* (Post-war reconstruction of transport infrastructure facilities with the assistance of international partners). 2025. Issue 88. P. 283–294. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.88.283-294> [in Ukrainian].

17. Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025-2027 rokakh: Resolution of the Cabinet Ministers of Ukraine of 27.12.2024 r. No. 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n22> (Last accessed: 09.07.2025) [in Ukrainian].

Artem Bezugliy, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-3883-7968>

Viktor Komar, <https://orcid.org/0000-0002-2634-9257>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

INNOVATIVE FORMS OF CONTRACTS FOR THE RESTORATION OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF UKRAINE

Abstract

Introduction. The transport infrastructure of Ukraine has been destroyed and damaged due to military operations on the territory of Ukraine. The martial law introduced in 2022 adjusted the priorities for the development of transport infrastructure to its restoration and reconstruction in order to reduce the negative effects on the social sphere and the economy. The features of transport infrastructure should be considered to be the synergistic impact on the defense capability and servicing the country's defense needs, the impact on the social stability of society and servicing humanitarian flows, the impact on economic activity and ensuring supply chains for production, trade, agricultural and other sectors of the economy, population mobility for the needs of education, healthcare, employment, etc. The transport infrastructure of Ukraine by 2022 was actively updated through the implementation of the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2023 and the «Great Construction» program. This resulted in the formation of a new philosophy in the transport sector and road management.

Objective. The change in the main focus of infrastructure projects on the development and expansion of transport infrastructure to restoration and reconstruction is complemented by a set of other challenges. These are military operations in Ukraine, economic uncertainty, fiscal imbalances, labor market shortages due to mobilization, and other social and economic problems. To reform the institutional support for the reconstruction of transport infrastructure, the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030 was approved and an operational plan of measures for its implementation in 2025-2027 was approved, and public administration for the restoration of Ukraine's transport infrastructure was improved, international partners were involved in the implementation of infrastructure projects, including through the DREAM ecosystem. However, other components of the institutional support of infrastructure projects require separate scientific justification, namely the introduction of new (innovative) forms of contracts.

The purpose. The purpose of the study is to generalize the main provisions of innovative forms of contracts (design-build) in the context of the experience of implementing infrastructure projects in 2019-2024 and to substantiate their potential for the restoration of the transport infrastructure of Ukraine.

Materials and methods. The scientific and theoretical basis of the study is the general scientific provisions of economic theory on the implementation of contracts in the road sector using methods of historical analysis and scientific generalization to determine the features of the implementation of infrastructure projects, economic and statistical analysis of announced public procurements for infrastructure projects. The information base of the study was the official statistical data of the Ministry of Finance of Ukraine on the size

of budget financing of the road sector and data from the Prozorro electronic system on announced public procurements of design works for infrastructure projects, road works for 2019-2024, including Design-Build.

Results. The main challenges of rebuilding transport infrastructure and the development of improving the institutional component of implementing infrastructure projects are summarized, which are implemented through the start of the ecosystem DREAM in 2023 for the creation, financing, management and control of projects. Since July 2025, the implementation of the new national project "Design and Build" has begun, the regulatory and legal support for the implementation of infrastructure projects has been updated, and the distribution of powers between executive bodies has undergone changes. The experience of implementing more effective forms of contracts for the road sector according to the directory of the Public-Private Partnership Resource Center (World Bank Group) has been summarized and the prospects for further scientific exploration of innovative forms of contracts have been identified. The retrospective of the implementation of innovative forms of contracts in Ukraine, which began in 2018 according to the data of the Prozorro electronic system, has been analyzed. A positive trend in the development and implementation of infrastructure projects is the acquisition of experience by both customers and contractors under Design-Build contracts and the formation of a set of service providers for the development of project documentation and the implementation of road works, and a set of debatable features of the implementation of Design-Build contracts has been identified (the difficulty of determining cost indicators, the lack of a high level of competition, the limited number of implementers of infrastructure projects with a predominance of resident business entities until 2022 and a predominance of non-resident business entities from 2022; the conclusion of mainly contracts for current medium repairs, less often - construction; early termination of most contracts due to martial law, etc.).

Conclusions. It is substantiated that the reconstruction of Ukraine's transport infrastructure should be considered simultaneously a priority of reconstruction under martial law and post-war recovery with a high level of social value and utility, certain aspects of the high level of social value and utility of reconstruction have received institutional support from the Government of Ukraine, international financial and humanitarian organizations through the regulatory consolidation of the principle of «build back better» — «rebuild better than it was», the establishment of the ecosystem DREAM and the review of the priority of contract forms for infrastructure projects with the introduction of the national project «Design and Build». Innovative forms of contracts for the restoration of transport infrastructure are studied in terms of the totality of positive effects in developed countries and the potential for further implementation in Ukraine. Innovative forms of contracts, such as design-build, have the potential to restore transport infrastructure with the implementation of projects on the basis of priority, transparency and publicity, competitiveness, effective use of budget funds and international financial assistance for the needs of restoration and development of a competitive and efficient transport system integrated into the trans-European transport network.

Keywords: transport infrastructure restoration, infrastructure projects, design-build, Prozorro, DREAM ecosystem.

УДК 338.5:625.7/.8

Ілляш С. І., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-3001-8012>Маковська Ю. А., канд. екон. наук, <https://orcid.org/0000-0003-1107-7727>Стасюк Т. О., <https://orcid.org/0000-0001-5921-4503>Парасюк Л. В., <https://orcid.org/0000-0002-2482-4464>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»),
м. Київ, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ НОРМ ВИТРАТ ПАЛИВА НА МАШИНИ І МЕХАНІЗМИ

Анотація

Вступ. У статті розглядаються особливості розрахунку норм витрати палива для машин і механізмів. Проаналізовано основні методи визначення паливних норм, враховано вплив технічних, експлуатаційних і зовнішніх факторів та розглянуто екологічну складову, зокрема вплив витрат палива на навколишнє середовище та застосування SCR-систем для зниження шкідливих викидів.

Рациональне використання паливно-енергетичних ресурсів є одним із ключових завдань у сфері експлуатації транспортних засобів та дорожньо-будівельної техніки. Важливу роль у цьому процесі відіграють сучасні методи оцінки витрати палива та застосування систем селективної каталітичної нейтралізації (SCR), що дозволяють зменшити шкідливі викиди. Для досягнення максимальної паливної ефективності необхідно враховувати широкий спектр факторів, які впливають на роботу техніки.

Проблематика. Розрахунок норм витрати палива є складним процесом через різноманітність факторів, які на нього впливають. Основними проблемами, що постають перед дослідниками та інженерами, є велика варіативність умов експлуатування техніки (рельєф місцевості, кліматичні умови, тип ґрунту тощо), залежність витрати палива від технічного стану машин, способу керування та рівня автоматизації процесів, відсутність універсальної методики, що враховує всі аспекти роботи різних типів техніки, потреба у розробленні ефективних алгоритмів оптимізування паливоспоживання.

Мета. Метою дослідження є аналізування сучасних підходів до розрахунку норм витрати палива, визначення ключових факторів, що впливають на споживання палива, та розроблення рекомендацій щодо оптимізації використання паливних ресурсів у машинобудуванні та транспортній сфері.

Матеріали та методи. Стаття носить оглядовий характер. У статті використовується системний підхід, який представляє собою сукупність загальнонаукових методологічних принципів (вимог), в основі яких лежить розгляд об'єктів як систем.

Результати. У статті розглядаються питання розрахунку норм витрат палива для дорожніх машин і механізмів як важливого етапу планування та оптимізації витрат у будівництві, транспортній та комунальній галузях. Обґрунтовано необхідність визначення нормативного споживання палива для зниження експлуатаційних витрат та раціонального використання ресурсів підприємств.

Висновки. Проведене дослідження дозволило виявити основні чинники, що впливають на витрату палива, та оцінити ефективність різних методів розрахунку норм витрати палива. Встановлено, що для забезпечення оптимального використання паливно-енергетичних ресурсів необхідно враховувати комплекс технічних, експлуатаційних і зовнішніх параметрів. Розроблено рекомендації щодо вдосконалення методик розрахунку, що дозволить підвищити ефективність роботи машин і механізмів, знизити витрати на паливо та зменшити негативний вплив транспортних засобів на довкілля..

Ключові слова: витрата палива, машина, механізм, норма, нормування, паливна ефективність.

Вступ

Рациональне використання паливно-енергетичних ресурсів є одним із ключових завдань сучасної транспортної та промислової галузей. Витрати палива безпосередньо впливають на економічну ефективність експлуатації машин і механізмів, а також на рівень шкідливих викидів в атмосферу. У зв'язку з цим питання розрахунку норм витрати палива набуває особливої актуальності, оскільки правильне визначення цих показників дозволяє не лише знизити експлуатаційні витрати, а й мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Визначення норм витрати палива є складним завданням, що потребує врахування багатьох факторів, зокрема технічних характеристик обладнання, умов експлуатації, режимів роботи та зовнішніх впливів. Наявні методики розрахунку можуть базуватися як на емпіричних даних, так і на математичних моделях, проте їх ефективність значною мірою залежить від точності вихідної інформації та методологічного підходу.

Метою цієї роботи є аналізування сучасних методів розрахунку норм витрати палива на машини і механізми, визначення ключових чинників, що впливають на споживання палива, а також розроблення рекомендацій щодо підвищення точності та ефективності цих розрахунків.

Основна частина

Розрахунок норм витрат палива для дорожніх машин і механізмів є важливим етапом планування та оптимізації витрат у будівництві, транспортній та комунальній галузях. Визначення нормативного споживання палива дозволяє забезпечити раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів, знизити експлуатаційні витрати та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Нормування витрат палива – це встановлення допустимої кількості споживання палива в певних умовах експлуатації, для чого застосовуються базові лінійні норми, встановлені по моделях (модифікаціях) машин, та система нормативів і коригуючих коефіцієнтів, які дозволяють враховувати виконану роботу, кліматичні, дорожні та інші умови експлуатації [2].

Один із ключових аспектів ефективного використання палива полягає в розумінні чинників, що визначають його споживання, зокрема типу двигуна. Конструктивні особливості силового агрегата значним чиним визначають рівень споживання палива. Наприклад, дизельні двигуни характеризуються вищою економічністю порівняно з бензиновими завдяки підвищеному коефіцієнту корисної дії (далі — ККД). Крім того, сучасні двигуни, оснащені системами впорскування палива, турбонаддувом та електронним управлінням, демонструють нижчий рівень споживання палива порівняно із застарілими карбюраторними моделями.

Навантага відіграє важливу роль у споживанні палива, оскільки збільшення маси перевезеного вантажу або обсягу виконуваної роботи спричиняє підвищення витрат. Значний вплив на рівень споживання палива має також технічний стан транспортного засобу. Зношеність двигуна, засміченість повітряного чи паливного фільтра, некоректне регулювання системи впорскування палива та незадовільний стан шин можуть призводити до збільшення витрат.

Кліматичні умови є ще одним важливим чинником, що впливає на витрату палива. У зимовий період вона зростає через необхідність прогріву двигуна та підвищену в'язкість моторного масла. У спекотну погоду робота кондиціонера або системи охолодження створює додаткове навантаження на двигун, що також спричиняє підвищення витрат. Урахування впливу цих чинників дає змогу оптимізувати споживання палива та підвищити ефективність роботи транспортних засобів. Проте важливу роль відіграє також розрахунок витрати палива, що дозволяє оцінити ефективність роботи машин і механізмів, контролювати витрати та приймати обґрунтовані рішення щодо їх оптимізації.

Розрахунок норм витрати палива є ключовим етапом у плануванні його використання. Для визначення оптимальних показників застосовують різні методики, які залежать від типу техніки, умов її експлуатації та доступних вихідних даних. Основними методами розрахунку є емпіричний, аналітичний, нормативний та експериментальний.

Емпіричний метод базується на аналізуванні фактичних даних про витрати палива за попередні періоди експлуатування техніки. Ураховується середній рівень витрат для конкретного типу машин або механізмів, які працюють у схожих умовах.

Таблиця 1

**Емпіричні дослідження витрати палива
для різних моделей екскаваторів-навантажувачів**

Тип обладнання	Тип двигуна	Потужність двигуна кВт (к.с.)	Норми витрат палива л/маш.год
Екскаватор-навантажувач Cukurova-883	дизель Perkins 1104C-4TT	74,5 (101,4)	9,40
Екскаватор-навантажувач New Holland B110	дизель CNH F4GEO484	82,0 (112,0)	10,40
Екскаватор-навантажувач JCB 3CX	дизель JCB 444T3	68,5 (93,0)	8,70
Екскаватор-навантажувач АМКОДОР 702 ЕА	дизель Д-245.5	65,0 (89,0)	7,74
Екскаватор-навантажувач JCB-410	дизель Perkins AA	67,0 (91,0)	9,40
Екскаватор-навантажувач Caterpillar 428F2	дизель Cat C4.4	70,0 (95,0)	9,81
Екскаватор-навантажувач MST M 544 Plus	Дизель Perkins 1104C-44T	77,5 (94)	9,22
Екскаватор-навантажувач JCB 4CX	Дизель JCB	70 (95,0)	8,33
Екскаватор-навантажувач Cat 428F	дизель Cat C4.4	74,5 (101)	8,9
Екскаватор-навантажувач Cat 434E	дизель Cat C4.4	74,5 (101)	8,9

Джерело — статистичні дані ДП «НІРІ»

Розрахунок витрат палива для екскаваторів-навантажувачів (табл. 1) за допомогою емпіричного методу базується на практичних вимірах і статистичних даних.

На основі реальних умов експлуатування кожної моделі екскаватора-навантажувача визначають кількість використаного палива за певний період роботи. Наприклад, для JCB 3CX зафіксовано середню витрату 8,70 л/маш.год, а для Caterpillar 428F2 — 9,81 л/маш.год. На підставі зібраних даних обчислюють середню витрату палива для кожної моделі. Це значення залежить від потужності двигуна та його типу наприклад, для New Holland B110 з 82,0 кВт (112 к.с.) витрата становить 10,40 л/маш.год, а для JCB 4CX з 70 кВт (95,0 к.с.) 8,33 л/маш.год. Оскільки експлуатаційні умови можуть відрізнятися, базові значення коригуються на основі додаткових чинників (збільшення навантаження, стан двигуна та фільтрів, кліматичні умови тощо).

Проте для більш точного прогнозування витрат використовують аналітичний метод, який доповнює емпіричний підхід. Він дозволяє враховувати не лише фактичні дані, а й технічні характеристики обладнання та режими його роботи. У [3] представлено аналітичний метод розрахунку норм споживання бензину та дизельного палива, що ґрунтується на комплексному підході. Він базується на двох ключових джерелах: паспортних даних машини та результатах виробничого (дослідного) визначення витрат палива.

На основі паспортних характеристик визначають розрахункові норми витрат палива на одну машино-годину роботи.

Якщо в паспортних даних вказані витрати палива в режимі номінальної потужності на одну мото-годину роботи, то витрати палива на одну машино-годину визначають за формулою:

$$q = H \cdot K_{\Pi}, \quad (1)$$

де q — норма витрат палива, кг/маш.год;

N — норма витрат палива під час роботи машини в режимі номінальної потужності, кг/мото-год.

K_{Π} — коефіцієнт внутрішньозмінного використання машин, що враховує перехід від середньорічного наробітку машин в мото-годинах до середньорічного наробітку машин в машино-годинах (річний режим роботи), приймають згідно з додатком 32 [4].

Якщо в паспортних даних наведено питомі витрати палива, то загальні витрати палива на одну машино-годину визначають за іншою формулою:

$$q = q_0 \cdot N_e \cdot K_{\Pi}, \quad (2)$$

де q_0 — питомі витрати палива за номінальної потужності двигуна, г/кВт год, приймають за даними інструкції з експлуатації двигуна;

N_e — номінальна потужність двигуна машини, кВт, приймають за даними інструкції з експлуатації машини;

0,001 — перевідний коефіцієнт грамів у кілограми.

Отже, аналітичний метод використовує паспортні характеристики техніки та точні розрахункові формули, тоді як емпіричний базується на практичних даних. Поєднання обох підходів допомагає ефективно оцінювати та оптимізувати витрати палива. Проте існує ще один важливий підхід — нормативний метод. На відміну від попередніх, він спирається на офіційно затверджені норми, розроблені державними та галузевими органами. Такі нормативи базуються на комплексних дослідженнях і встановлюють стандартизовані показники для кожного типу техніки. В Україні такими основними нормативними документами є [1], [2].

Кожен із розглянутих методів має свої особливості та сферу застосування. Аналітичний і емпіричний методи дозволяють прогнозувати витрати палива на основі технічних характеристик і статистичних даних, тоді як нормативний підхід забезпечує узгодженість із державними стандартами. Однак у деяких випадках для максимальної точності необхідні безпосередні вимірювання у реальних умовах експлуатації. Саме на цьому базується експериментальний метод, який передбачає практичні випробування для визначення фактичної витрати палива.

Відповідно до [1], якщо в технічній документації заводу-виробника обладнання відсутні норми або технічні дані, необхідні для їх розрахунку, комісією проводяться контрольні заміри витрати палива.

Для проведення замірів відбираються три технічно справних автомобілі (якщо суб'єкт має таку кількість автомобілів однієї моделі, в іншому випадку допускається виконати заміри на меншій кількості автомобілів). Заміри витрати палива проводять за температури навколишнього середовища не нижче 10 °C (крім автомобілів, які призначені для виконання робочих операцій лише в зимовий час — снігонавантажувальні автомобілі, снігоочисники тощо).

Рекомендується виконати не менше ніж три заміри витрати палива на одну технологічну операцію (л), на годину роботи обладнання (л/год) чи на пробіг спецавтомобіля під час виконання спеціальної роботи (л/100 км). Результати замірів оформлюють актом, усереднюють і пропонують для застосування як тимчасову норму витрати палива.

Застосування різних методів розрахунку витрат палива дозволяє отримати максимально точні результати залежно від умов експлуатації техніки. Проте, окрім економічної складової, важливим аспектом залишається екологічний вплив споживання палива.

Сучасні технології дозволяють не лише оптимізувати витрати палива, а й значно зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Одним із ключових рішень для зниження викидів шкідливих речовин у дизельних двигунах є система реагентів селективної каталітичної нейтралізації відпрацьованих газів.

До розрахунку норм витрат палива відповідно до [1], [3] були включені дані щодо споживання реагентів системи селективної каталітичної нейтралізації (SCR) відпрацьованих газів. Ця система є ключовою технологією для зниження рівня оксидів азоту (NOx) у вихлопних газах дизельних двигунів, що дозволяє відповідати сучасним екологічним стандартам, таким як Євро-5 та Євро-6.

Система SCR працює шляхом впорскування спеціального реагенту (AdBlue — водного розчину сечовини) у потік відпрацьованих газів. У результаті хімічної реакції під впливом високої температури оксиди азоту перетворюються на нешкідливі азот і водяну пару, що суттєво знижує екологічне навантаження [5].

Згідно з [3], витрату реагента системи селективної каталітичної нейтралізації (SCR) визначають на основі паспортних даних техніки або, за їх відсутності, шляхом використання розрахункових коефіцієнтів.

Якщо в паспортних даних зазначені витрати реагенту на одну мото-годину роботи, їх коригують за допомогою понижувального коефіцієнта для переведення літрів у кілограми. Після цього розраховують витрату реагента на одну машино-годину роботи, використовуючи коефіцієнт, який враховує режим експлуатації.

У разі відсутності фактичних даних, норму витрати реагента встановлюють залежно від витрати палива. Для цього застосовують спеціальний коефіцієнт витрати реагента, що враховує конструктивні особливості транспортного засобу, технічний стан і умови експлуатації.

Висновки

Розрахунок і планування витрат палива є важливими складовими раціонального використання ресурсів у сфері експлуатації дорожніх машин, транспортних засобів та обладнання. Використання точних методик дозволяє визначати реальні потреби у паливі, що сприяє підвищенню загальної ефективності експлуатації техніки. Застосування розрахункових підходів дає змогу здійснювати економічне обґрунтування використання паливно-енергетичних ресурсів, прогнозувати їхню витрату та визначати шляхи підвищення паливної ефективності. Додатково, урахування сучасних екологічних вимог у процесі розрахунку сприяє зниженню рівня викидів шкідливих речовин, що досягається завдяки впровадженню технологій нейтралізації вихлопних газів, зокрема застосуванню реагентів селективної каталітичної нейтралізації, таких як AdBlue. Таким чином, комплексний підхід до планування витрат палива не лише оптимізує використання ресурсів, а й забезпечує відповідність сучасним екологічним та економічним стандартам.

Список літератури

1. Методичні рекомендації з нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою. Київ, 2023. 42 с. (Інформація та документація).
2. СОУ 42.1-37641918-094:2017 Дорожні машини та механізми. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів. Київ, 2017. 57 с. (Інформація та документація).
3. М 42.1-37641918-792:2024 Методика розроблення розрахунків витрат ресурсів на експлуатацію дорожніх машин і механізмів. Київ, 2024. 43 с. (Інформація та документація).
4. Кошторисні норми України. Настанова з визначення вартості будівництва, затверджені наказом від 01.11.2021 № 281. Київ, 2021. 67 с. (Інформація та документація).
5. Що таке AdBlue — навіщо та коли його потрібно використовувати. 2024 р. URL: <https://www.systopt.com.ua/article-shho-take> (дата звернення 20.08.2025).

References

1. Metodychni rekomendatsii z normuvannia vytrat palyva, elektrychnoi enerhii, mastylnykh, inshykh ekspluatatsiinykh materialiv avtomobiliamy ta tekhnikoju (Methodological recommendations for the regulation of fuel consumption, electric energy, oil, other operating materials for automobiles and equipment). Kyiv, 2023. 42 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. SOU 42.1-37641918-094:2017 Dorozhni mashyny ta mekhanizmy. Normy vytrat palyvno-mastylnykh materialiv (SOU 42.1-37641918-094:2017) Road vehicles and mechanisms. Fuel and oil consumption standards). Kyiv, 2017. 57 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. М 42.1-37641918-792:2024 Metodyka rozroblennia rozrakhunkiv vytrat resursiv na ekspluatatsiiu dorozhnikh mashyn i mekhanizmiv (М 42.1-37641918-792:2024) Methodology for the development of resource consumption calculations for road vehicles and mechanisms). Kyiv, 2024. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

4. Koshtorysni normy Ukrainy. Nastanova z vyznachennia vartosti budivnytstva (osting standards of Ukraine. Regulations on the determination of construction costs), zatverdzeni nakazom vid 01.11.2021 No. 281. Kyiv, 2021. 67 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

5. Shcho take AdBlue — navishcho ta koly yoho potribno vykorystovuvaty (What is AdBlue — when and how it should be used). 2024 p. URL: <https://www.systopt.com.ua/article-shho-take> (Last accessed 20.08.2025) [in Ukrainian].

Sergii Illiash, Ph.D, <https://orcid.org/0000-0002-3001-8012>

Yulia Makovska, Ph.D, <https://orcid.org/0000-0003-1107-7727>

Tetiana Stasiuk, <https://orcid.org/0000-0001-5921-4503>

Lyudmila Parasyuk, <https://orcid.org/0000-0002-2482-4464>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

PECULIARITIES OF CALCULATING FUEL CONSUMPTION RATES FOR MACHINERY AND EQUIPMENT

Abstract

Introduction. The article considers the features of calculating fuel consumption rates for machines and mechanisms. The main methods for determining fuel rates are analyzed, the influence of technical, operational and external factors is taken into account, and the environmental component is considered, in particular, the impact of fuel consumption on the environment and the use of SCR systems to reduce harmful emissions.

The rational use of fuel and energy resources is one of the key tasks in the field of operation of vehicles and road construction equipment. An important role in this process is played by modern methods of assessing fuel consumption and the use of selective catalytic neutralization (SCR) systems, which allow reducing harmful emissions. To achieve maximum fuel efficiency, it is necessary to take into account a wide range of factors that affect the operation of equipment.

Issues. Calculating fuel consumption rates is a complex process due to the variety of factors that influence it. The main problems facing researchers and engineers are the great variability of equipment operating conditions (terrain relief, climatic conditions, soil type, etc.), the dependence of fuel consumption on the technical condition of machines, the control method and the level of process automation, the lack of a universal methodology that takes into account all aspects of the operation of different types of equipment, the need to develop effective algorithms for optimizing fuel consumption.

Purpose. The purpose of the study is to analyze modern approaches to calculating fuel consumption rates, identify key factors affecting fuel consumption, and develop recommendations for optimizing the use of fuel resources in mechanical engineering and the transport sector.

Materials and methods. The article is of a review nature. The article uses a systematic approach, which is a set of general scientific methodological principles (requirements), based on the consideration of objects as systems.

Results. The article considers the issues of calculating fuel consumption rates for road machines and mechanisms as an important stage of planning and optimizing costs in the construction, transport and municipal industries. The need to determine the standard fuel consumption to reduce operating costs and rational use of enterprise resources is substantiated.

Conclusions. The study allowed us to identify the main factors affecting fuel consumption and assess the effectiveness of various methods for calculating fuel consumption standards. It was established that to ensure optimal use of fuel and energy resources, it is necessary to take into account a complex of technical, operational and external parameters. Recommendations have been developed to improve calculation methods, which will increase the efficiency of machines and mechanisms, reduce fuel costs and reduce the environmental impact of vehicles.

Keywords: fuel consumption, machine, mechanism, norm, standardization, fuel efficiency.

УДК 625.7/8

Зеленовський В. А., <https://orcid.org/0000-0001-5834-5456>Завійський О. І., канд. екон. наук, <https://orcid.org/0000-0002-3883-0259>*Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна*

**ВПРОВАДЖЕННЯ КОНТРАКТІВ НА УТРИМУВАННЯ
АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ НА ОСНОВІ КІНЦЕВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ (OPRC)
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ**

Анотація

Вступ. Сучасні тенденції розвитку транспортної інфраструктури засвідчують зростання ролі ефективних механізмів управління дорожнім господарством, які забезпечують високу якість обслуговування під час оптимального використання фінансових ресурсів. У статті розглянуто сутність, принципи та особливості контрактів з утримування автомобільних доріг загального користування, орієнтованих на кінцеві результати (Output and Performance-Based Road Contracts — OPRC), які є ефективною альтернативою традиційним формам контрастування, що базуються на оплаті за обсяг виконаних робіт. Підкреслено ключові проблеми класичного підходу до утримування дорожньої мережі, зокрема відсутність стимулів до довгострокового збереження технічного стану активів, недостатній рівень інновацій та перевитрати бюджетних коштів.

Проблематика. Традиційна система утримування автомобільних доріг в Україні базується на оплаті за обсяг виконаних робіт, що часто призводить до неефективного використання бюджетних коштів, недостатнього стимулювання підрядників до підтримання довгострокової якості дорожніх активів та ускладнює контроль за результатами. У поєднанні зі зношеністю мережі та обмеженим фінансуванням ці фактори формують потребу у впровадженні нових підходів до управління дорожнім господарством.

Мета роботи. Дослідити суть, принципи та ефективність впровадження OPRC у порівнянні з традиційними формами утримування автомобільних доріг, а також узагальнити результати першого пілотного проекту такого типу в Україні з урахуванням світового досвіду.

Матеріали та методи. У дослідженні застосовано аналітичний, порівняльний та системний підходи, а також елементи економічного аналізу. Проведено огляд міжнародної практики впровадження OPRC (Канада, Бразилія, Австралія та країни ЄС), а також та аналізування національного пілотного проекту на автомобільній дорозі М-06 «Київ – Чоп» (км 434 – 621), реалізованого у 2014–2021 роках.

Результат. Установлено, що впровадження OPRC забезпечує економію бюджетних коштів у межах (10 – 40) % порівняно з традиційними підходами, сприяє підвищенню технічного стану дорожніх активів та рівня безпеки руху. Результатно орієнтована модель управління створює чіткі стимули для підрядників щодо впровадження інноваційних технологій та ефективного планування, підвищує прозорість взаємодії між замовником і виконавцем та покращує якість дорожніх послуг для користувачів.

Висновки. Контракти на основі кінцевих результатів є ефективним інструментом модернізації системи утримування автомобільних доріг України. Їх широке застосування сприятиме раціональному використанню коштів, підвищенню довговічності дорожніх покриттів, активізації участі приватного сектору та підвищенню рівня безпеки дорожнього руху. Досвід пілотного проекту на М-06 підтверджує доцільність масштабування цієї практики на національному рівні.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожня інфраструктура, ефективність управління, контракти на основі кінцевих результатів, OPRC, традиційні контракти, утримування автомобільних доріг.

Вступ

Сучасна світова практика утримування автомобільних доріг охоплює широкий спектр підходів, від внутрішнього виконання робіт державними службами до повного аутсорсингу приватним виконавцям. За оцінками Світового банку, ефективне управління такими активами забезпечує віддачу інвестицій на рівні (50 – 100) %, що значно перевищує ефект від будівництва нових доріг (близько 10 %) [2]. Водночас домінуючим методом залишається «традиційний» підхід, де оплата залежить від обсягів виконаних робіт — наприклад, від тоннажу матеріалів чи годин роботи машин і механізмів. Проте емпіричні дослідження останніх десятиліть, проведені міжнародними організаціями, неодноразово доводять його неефективність: часті ремонтні заходи призводять до перевитрат на (20 – 40) %, обмежують впровадження інновацій і ускладнюють перевіряння якості [1, 3]. В українському контексті, де понад 80 % мережі автомобільних доріг зношене, а фінансування покриває лише (30 – 40) % реальних потреб, ці недоліки особливо гостро гальмують інтеграцію в європейські транспортні коридори та загальну економічну конкурентоспроможність [1].

Саме такий виклик стимулює глобальний перехід до результатно-орієнтованих моделей управління, серед яких вирізняється контракт на утримування автомобільних доріг на основі кінцевих результатів (OPRC). Ця модель ґрунтується на принципах ефективності та сталого розвитку, перетворюючи фокус з процесів на кінцеві показники. OPRC передбачають укладення довгострокових угод (зазвичай (3 – 10) років) між дорожньою організацією (Замовником) та підрядником (Виконавцем), з метою досягнення чітко визначених рівнів утримування — наприклад, міжнародний показник нерівності дорожнього покриття IRI менше ніж 3 м/км, площа вибоїн не перевищує (0,1 – 0,5) м² на 100 м² поверхні, а час реагування на ліквідування дефектів становить (3 – 28) днів залежно від навантаження. Оплата здійснюється у формі фіксованих щомісячних платежів на кілометр автомобільної дороги, скоригованих на інфляцію та інтенсивність трафіку, з механізмами штрафів (5 – 20) % за невідповідності та бонусами (до 10 %) за перевиконання [1, 3]. Замовник надає виконавцю повну автономію у виборі технологій і методів (за умов дотримання чинних нормативних документів), що стимулює превентивне утримування та загальну економію ресурсів на рівні (15 – 50) %.

Поряд з «чистими» OPRC, у світовій практиці переважають гібридні форми, які органічно поєднують елементи об'ємного та результатно-орієнтованого підходів (понад 70 % усіх контрактів), забезпечуючи гнучкість адаптації до конкретних умов [3]. Термінологія цих угод варіюється залежно від національних традицій: у Західній Австралії вони відомі як «Performance Contracts», у США — «Asset Management Contracts», у Новій Зеландії — «Performance Specified Maintenance», в Аргентині та Бразилії — «Rehabilitation and Maintenance Contracts», у Фінляндії та Канаді — «Area Service Contracts», а у Великій Британії — «Managing Agent Contracts» [1]. Світовий банк уніфікує термін «OPRC», акцентуючи на його універсальності для країн з обмеженими ресурсами.

В Україні процес впровадження OPRC розпочався на початку 2000-х за ініціатииви, на той час, Державного агентства автомобільних доріг, з активною підтримкою Уряду та Європейського банку реконструкції та розвитку. Перший пілотний проект реалізовано на автомобільній дорозі М-06 «Київ – Чоп» (км 434–621, протяжністю 187 км) у 2014 – 2021 роках: це гібридна угода з елементами капітального ремонту (9 км), встановленням LED-освітлення у 27 населених пунктах, моніторингом трафіку, двома ваговими комплексами та метеостанціями. Результат — (92 – 98) % відповідності нормам та економія (20 – 30) % [1, 6]. Нижче ми детально розглянемо ключові аспекти реалізування OPRC з урахуванням світового досвіду.

Виклад основного матеріалу

OPRC суттєво відрізняються від традиційних форм контракування, що базуються на оплаті за обсяг виконаних робіт, формуючи таким чином парадигму управління, орієнтовану на стале збереження інфраструктури та оптимізацію ресурсів. Насамперед, цей тип контракту передбачає виплату підряднику (Виконавцю) за комплексне управління та утримування дорожніх активів, де чітко

визначені рівні експлуатаційного обслуговування, які підрядник зобов'язаний досягти під час надання послуг. Такі рівні включають, зокрема, граничні показники деформацій дорожнього покриття (площа вибоїн не перевищує $(0,1 - 0,5) \text{ м}^2$ на 100 м^2 поверхні), коефіцієнт зчеплення (менше ніж 0,4), міжнародний показник нерівності (IRI більше ніж 3 м/км) та терміни реагування на ліквідування дефектів (від 3 днів для високонавантажених ділянок до 28 днів для низькоінтенсивних) [1, 3]. Виплати безпосередньо пов'язані з успішним виконанням або перевиконанням цих мінімумів і формуються як фіксована щомісячна сума на кілометр дороги, скоригована на інфляцію та трафік. Невідповідність рівням або затримки в усуненні недоліків тягнуть за собою негативні наслідки у вигляді штрафних санкцій у розмірі $(5 - 20) \%$ від платежу, що стимулює превентивні заходи та проактивний підхід до управління ризиками [1, 3].

На відміну від традиційних контрактів, де замовник детально регламентує методи робіт, матеріали та технології, OPRC надають підряднику повну свободу у виборі стратегій, за умови дотримання національних будівельних норм. Відповідальність за планування робіт, проєктування, впровадження інноваційних матеріалів, процесів та систем управління покладається на виконавця, що підвищує його ризики, але водночас відкриває можливості для зростання рентабельності через оптимізацію ефективності. Як наслідок, це забезпечує зниження витрат на довгострокове утримування на $(20 - 30) \%$, сприяючи ефективнішому керуванню життєвим циклом дорожніх активів [3]. Такий підхід не лише мінімізує бюрократичні бар'єри, але й заохочує інновації, наприклад, використання цифрових систем моніторингу стану доріг (GIS-технології) для прогнозування деградації та планування втручань.

Ця модель несе певні виклики для підрядника, зокрема:

- організацію управління та впровадження інновацій;
- прогнозування деградації стану автомобільних доріг;
- планування заходів з утримування;
- розрахунок обсягів робіт на основі детальної оцінки поточного стану об'єктів.

Саме тому у світовій практиці перевага надається приватним компаніям з доведеною кваліфікацією та досвідом, які здатні мінімізувати ці ризики за рахунок передових практик, таких як інтеграція даних зі спеціальних давачів для реального часу моніторингу.

Історія впровадження OPRC сягає кінця 1980-х років. У 1988 р. у Британській Колумбії (Канада) приватні компанії почали залучатися до утримування автомобільних доріг з визначеними рівнями обслуговування. Невдовзі в Аргентині значні обсяги державних доріг передали на управління з фіксованими показниками, включаючи періодичні та реабілітаційні роботи, з системою штрафів за несвоєчасне усунення дефектів. У 1990-х рр. пілотні проєкти реалізовано в Перу, Чилі, Уругваї та Бразилії, після чого модель поширилася на Австралію, Нову Зеландію, Фінляндію, Данію, Естонію та США. Швидко глобальне поширення OPRC підтвердило їхню ефективність: підрядники досягли вищих прибутків, а замовники — гарантій високого експлуатаційного стану доріг порівняно з традиційними методами. У сучасних умовах, з урахуванням кліматичних змін та зростання трафіку, OPRC еволюціонують, інтегруючи елементи сталого розвитку, такі як використання екологічно чистих матеріалів для ремонтування та зниження вуглецевого сліду від робіт.

Головним мотиватором переходу до OPRC у розвинених країнах стала економія ресурсів, що сягає $(15 - 30) \%$ порівняно з традиційними контрактами за одиничними розцінками. Ця економія зумовлена здоровою конкуренцією, модернізацією процесів, підвищенням продуктивності, своєчасним обслуговуванням та впровадженням інновацій. Найбільше зниження витрат спостерігається після набуття підрядниками досвіду в умовах конкуренції, особливо для фіксованих контрактів, де стимулюється підтримка оптимального стану активів за мінімальні витрати. Водночас, за відсутності достатньої конкуренції очікувана економія може не реалізуватися, що підкреслює важливість регуляторного середовища для стимулювання ринку. Наведена нижче **табл. 1** відображає економію коштів у деяких країнах.

Таблиця 1

Економія коштів порівняно з традиційними контрактами

Країна	Економія коштів у порівнянні з «традиційними контрактами» (одиничних розцінок), %
Австралія	10 – 40
Бразилія	15 – 35
Канада	орієнтовно 20
Естонія	20 – 40
Фінляндія	18
Нідерланди	30 – 40
Нова Зеландія	15 – 38
США	10 – 15

Окрім фінансової вигоди, OPRC пропонують низку переваг для ключових стейкхолдерів, які посилюють їхню привабливість у постпандемійний період та в умовах геополітичних викликів:

Для дорожніх організацій (Замовників):

- зниження витрат на ремонткування завдяки підтримці оптимального стану доріг;
- уникнення непередбачених витрат через претензії щодо додаткових обсягів робіт;
- підвищення якості послуг та безпеки дорожнього руху;
- посилення контролю за станом активів за допомогою автоматизованого моніторингу.

Для підрядників (Виконавців):

- зростання прибутковості;
- стабільне завантаження працівників та машин і механізмів;
- можливості для бізнес-розвитку через доступ до довгострокових проєктів.

Для користувачів доріг:

- безпечніші та якісніші автомобільні дороги за експлуатаційними показниками;
- зменшення витрат на технічне обслуговування транспортних засобів, що особливо актуально в умовах зростання цін на паливо.

Ці переваги роблять OPRC особливо актуальними для країн з обмеженим фінансуванням та незадовільним станом автомобільних доріг, сприяючи інтеграції з цілями сталого розвитку ООН (Інфраструктура та промисловість).

У світовій практиці OPRC застосовують на дорогах національного, регіонального, місцевого та міського рівнів, з урахуванням типу покриття та обсягу робіт. Розрізняють такі типи:

- контракти із значним обсягом ремонтування та періодичного утримування на старті (включаючи поточне та зимове утримування), типові для доріг у поганому стані;
- контракти з мінімальними початковими роботами для досягнення базового рівня, окремо від періодичного утримування;
- контракти виключно на поточне та зимове утримування;
- контракти для доріг з твердим покриттям (частіше для місцевих доріг);
- контракти для доріг без твердого покриття.

Особливістю OPRC є їхня тривалість, яка повинна охоплювати щонайменше один цикл періодичного обслуговування: (4 – 5) років для непокритих доріг, (8 – 10) років для покритих. У країнах-початківцях терміни скорочують до (1 – 4) років для набуття досвіду; контракти (6 – 10) років включають поточне, періодичне та аварійне утримування, іноді ремонткування; понад 10 років — повний спектр робіт, включно з новим будівництвом. Зростання терміну підвищує складність реалізації (рис. 1). Для доріг у критичному стані з великими обсягами ремонтування терміни становлять (3 – 7) років, з акцентом на початкові інвестиції в відновлення.

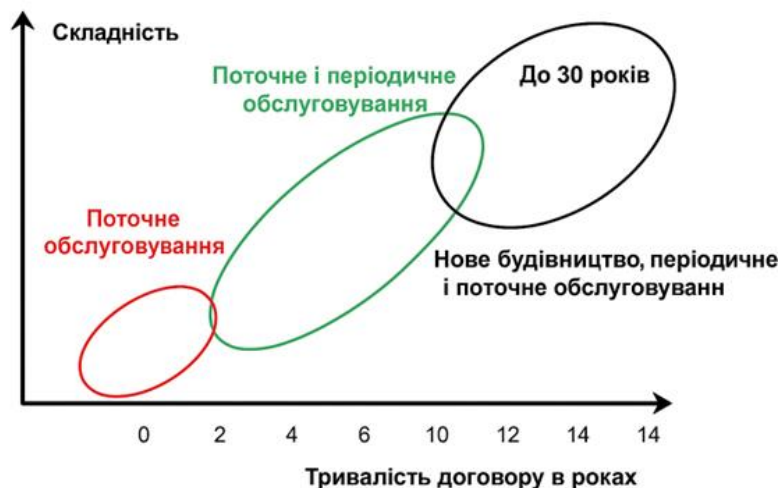


Рисунок 1 — Схема залежності терміну реалізації OPRC та його складність

Протяжність контрактів зазвичай сягає (200 – 500) км, пілотні проекти — меншу, хоча винятки, як у Малайзії (7 000 км), демонструють гнучкість моделі. Успішна реалізація OPRC вимагає від підрядників спеціалізованих навичок: аналізу деградації активів за допомогою систем управління якістю, активами та інформаційними технологіями. За потреби залучають інженерів консультантів. На відміну від традиційних контрактів, OPRC передбачають партнерські відносини з аудитом результатів, який може проводити замовник, незалежний експерт або обидві сторони, з використанням KPI для об'єктивної оцінки.

Успішна реалізація OPRC вимагає від підрядників значного досвіду та спеціалізованих компетенцій. Зокрема, виконавці повинні володіти навичками аналізу деградації експлуатаційного стану дорожніх активів з використанням сучасних систем управління якістю, активами та інформаційними технологіями впродовж усього терміну договору. Такі кваліфікації найчастіше притаманні незалежним консультантам, яких залучають як підрядні організації, так і замовники у разі недостатнього внутрішнього досвіду.

На відміну від традиційних контрактів, OPRC передбачають особливий тип відносин між Замовником і Виконавцем, заснований на принципах партнерства та прозорості. Оплата робіт і послуг здійснюється виключно за досягненнями, тому договір включає положення про регулярний аудит результатів, який може проводити замовник самостійно, незалежний експерт або обидві сторони спільно. Такий механізм забезпечує об'єктивний контроль і стимулює відповідальність усіх учасників.

В Україні підготовка до впровадження OPRC розпочалась на початку 2000-х років, коли Державне агентство автомобільних доріг («Укравтодор») проаналізувало міжнародний досвід, зокрема рекомендації Світового банку та практики Великобританії. Цей етап тривав доволі довго через високу відповідальність завдання, спрямованого на створення правових і організаційних передумов для довгострокових договорів з утримування автомобільних доріг. За підтримки Уряду України та Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР) у 2014 році стартував перший пілотний проект на автомобільній дорозі державного значення М-06 «Київ – Чоп» (км 434 – 621) у Львівській області. Ділянка загальною протяжністю 187 км включала 42 км дороги 1-ї категорії та 145 км — 3-ї категорії; термін реалізації становив 7 років і завершився у 2021 році. Проект мав гібридний характер: на початковій стадії проведено ремонтування спеціальних ділянок шляхом повної заміни конструктивних шарів дорожнього покриття на 9 км, а також заходи з покращення інфраструктури, зокрема влаштування штучного LED-освітлення у 27 населених пунктах, будівництво двох вагових комплексів для контролю маси транспортних засобів та двох метеорологічних станцій. Крім того, договір передбачав періодичне ремонтування верхнього шару покриття з повною заміною на критичних ділянках, визначених на основі моніторингу реального стану дороги та прогнозів зростання транспортного навантаження.

Окремо варто наголосити, що перші шість місяців реалізації пілотного проєкту надали Виконавцю період для приведення всієї ділянки до нормативного стану без застосування штрафів за недотримання встановлених рівнів експлуатаційного утримування.

З урахуванням світового досвіду та позитивних результатів українського пілотного проєкту можна стверджувати, що OPRC перетворюються на загальноприйняту форму утримування автомобільних доріг, поступово витісняючи традиційні контракти. Вони забезпечують оптимальне співвідношення вартості та якості, стабільне фінансування робіт, суттєве покращення експлуатаційного стану активів, зниження витрат для користувачів доріг, підвищення безпеки руху, зменшення потреб у частому ремонті, кращу прозорість бюджетування для Замовників, розвантаження відповідальності власників доріг, посилення інтересу приватного сектору до дорожньої сфери та створення основ для тривалого стратегічного партнерства між сторонами.

Висновки

На основі комплексного аналізу теоретичних засад, світового досвіду та практичних аспектів впровадження контрактів на утримування автомобільних доріг на основі кінцевих результатів (OPRC), можна сформулювати ключові висновки, що підкреслюють їхню стратегічну цінність для модернізації дорожнього господарства України.

1. OPRC представляють собою прогресивну альтернативу традиційним методам утримування автомобільних доріг, оскільки фокусуються на досягненні об'єктивних рівнів експлуатаційного обслуговування, а не на механічному виконанні обсягів робіт, що сприяє переходу від реактивного до проактивного управління інфраструктурою.

2. Механізм оплати за результатами стимулює підрядників до раціонального використання ресурсів, впровадження інноваційних технологій (наприклад, цифрового моніторингу та екологічних матеріалів) та підвищення загальної якості послуг, мінімізуючи неефективні витрати та ризики.

3. Гібридні форми контрактів, що інтегрують елементи традиційних і результатно-орієнтованих підходів, домінують у глобальній практиці завдяки своїй адаптивності, дозволяючи враховувати специфіку початкового стану доріг та поступово нарощувати фокус на довгостроковій стійкості.

4. Емпіричні дані свідчать про значну економію бюджетних коштів — від 15 % до 40 % порівняно з традиційними контрактами, залежно від рівня конкуренції, кваліфікації виконавців та національних регуляторних умов, що робить OPRC привабливим інструментом фіскальної оптимізації.

5. OPRC генерують мультиплікативні переваги для стейкхолдерів: для Замовників — зниження витрат на ремонті та посилення перевіряння якості; для Виконавців — стабільність доходів і можливості бізнес-розвитку; для користувачів — підвищення безпеки та комфорту руху, з потенційним зменшенням витрат на експлуатацію транспортних засобів.

6. Успішне впровадження таких контрактів вимагає не лише високої кваліфікації виконавців, але й інтеграції сучасних інструментів моніторингу, управління активами та залучення незалежних консультантів, особливо на початкових етапах для мінімізації ризиків.

7. Пілотний проєкт на ділянці М-06 «Київ – Чоп» (2014 – 2021 рр.) в Україні продемонстрував практичну ефективність моделі, незважаючи на виклики підготовчого періоду та необхідність адаптації до локальних умов.

8. У контексті воєнних реалій 2024 – 2025 рр., коли значна частина дорожнього фонду була спрямована на оборонні потреби, перехід до OPRC набуває критичного значення для відновлення інфраструктури, сприяючи залученню інвестицій, розвитку державно-приватного партнерства та інтеграції з європейськими стандартами, як передбачено Національною транспортною стратегією до 2030 р.

Таким чином, впровадження контрактів на основі кінцевих результатів є потужним інструментом трансформації дорожнього сектору України, що забезпечує ефективне використання обмежених ресурсів, стимулює інновації, посилює партнерство між державою та приватним сектором, а також сприяє підвищенню безпеки, комфорту та економічної стійкості для громадян. Подальший розвиток моделі потребує посилення регуляторної бази та моніторингу для максимізування її потенціалу в посткризовий період.

Список літератури

1. Pakkala, P., Jong, M. de, Pakkala, P. (2007). *International Overview of Innovative Contracting Practices for Roads*. PIARC (World Road Association), Technical Committee on Road Contracts. 76 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/INTERNATIONAL-OVERVIEW-OF-INNOVATIVE-CONTRACTING-Pakkala-Jong/8984b3f714ccf2afeef9089a9f4b142e91e66856> (дата звернення: 02.10.2025).
2. CAREC Program. (2014). *Guide to Performance-Based Road Maintenance Contracts*. Asian Development Bank. 64 p. URL: <https://www.carecprogram.org/uploads/Guide-Performance-Based-Road-Maintenance-Contracts.pdf> (дата звернення: 26.09.2025).
3. Zietlow, G. *Performance-based Management and Maintenance of Roads (PMMR)*. University of Birmingham, 2009. URL: <http://www.performance-based-roadcontracts.com/pres/Birmingham2009.ppt> (дата звернення: 01.10.2025).
4. World Bank. (2005). *Performance-Based Contracting for Maintenance*. NCHRP Synthesis 353. Transportation Research Board. URL: <https://nap.nationalacademies.org/download/14266> (дата звернення: 09.10.2025).
5. Onur Group. (2021). *The Maintenance, Rehabilitation and Operation (OPRC) Project of Kiev–Chop Highway (M-06), Ukraine*. Project Report. URL: <https://www.onurgroup.com/en/proje/the-maintenance-rehabilitation-and-operation-oprc-project-of-kiev-chop-highway-m-06-ukraine/> (дата звернення: 08.10.2025).
6. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2018, оновлено 2024). *National Transport Strategy of Ukraine 2030*. Approved by Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 430-p on 30.05.2018; updated and endorsed on 27.12.2024. URL: <https://mtu.gov.ua/files/NTSU%25202030.pdf> (дата звернення: 25.09.2025).
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). *Procedure for the Use of Funds Provided for the Road Development and Maintenance in 2025*. Resolution No. 174 dated 18.02.2025. URL: <https://avnbm.com.ua/en/news/the-funds-usage-procedure-for-the-road-development-and-maintenance-in-2025-has-been-approved/> (дата звернення: 25.09.2025).
8. World Bank. (2025). *Procurement Plan for Ukraine Road Sector Development Project (Textual Part)*. Project ID: P504999. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099052025063535922/pdf/P504999-a8531ce3-576f-428f-a06c-1f039c677a33.pdf> (дата звернення: 09.10.2025).
9. European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). (2024). *Ukraine Road Corridors Project: Board Report*. URL: https://www.ebrd.com/content/dam/ebd_xdp/documents/project/50831/ukraine-road-corridors-board-report.pdf (дата звернення: 09.10.2025).
10. VoxUkraine. (2024). *Analysis and Evaluation of Government Forecasts for 2025–2027*. URL: <https://voxukraine.org/en/budget-declaration-analysis-and-evaluation-of-government-forecasts-for-2025-2027> (дата звернення: 09.10.2025).

References

1. Pakkala, P., de Jong, M., & Pakkala, P. (2007). *International Overview of Innovative Contracting Practices for Roads*. PIARC (World Road Association), Technical Committee on Road Contracts. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/INTERNATIONAL-OVERVIEW-OF-INNOVATIVE-CONTRACTING-Pakkala-Jong/8984b3f714ccf2afeef9089a9f4b142e91e66856> [in English].
2. CAREC Program. (2014). *Guide to Performance-Based Road Maintenance Contracts*. Asian Development Bank. URL: <https://www.carecprogram.org/uploads/Guide-Performance-Based-Road-Maintenance-Contracts.pdf> [in English].
3. Zietlow, G. (2009). *Performance-based Management and Maintenance of Roads (PMMR)* [PowerPoint presentation]. University of Birmingham. URL: <http://www.performance-based-roadcontracts.com/pres/Birmingham2009.ppt> [in English].
4. World Bank. (2005). *Performance-Based Contracting for Maintenance* (NCHRP Synthesis 353). Transportation Research Board. URL: <https://nap.nationalacademies.org/download/14266> [in English].
5. Onur Group. (2021). *The Maintenance, Rehabilitation and Operation (OPRC) Project of Kiev–Chop Highway (M-06), Ukraine* [Project Report]. URL: <https://www.onurgroup.com/en/proje/the-maintenance-rehabilitation-and-operation-oprc-project-of-kiev-chop-highway-m-06-ukraine/> [in English].
6. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2018, updated 2024). *National Transport Strategy of Ukraine 2030* (Approved by Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 430-p on 30.05.2018; updated and endorsed on 27.12.2024). URL: <https://mtu.gov.ua/files/NTSU%25202030.pdf> [in English].

7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). *Procedure for the Use of Funds Provided for the Road Development and Maintenance in 2025* (Resolution No. 174 dated 18.02.2025). URL: <https://avnbm.com.ua/en/news/the-funds-usage-procedure-for-the-road-development-and-maintenance-in-2025-has-been-approved/> [in English].
8. World Bank. (2025). *Procurement Plan for Ukraine Road Sector Development Project (Textual Part)* (Project ID: P504999). URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099052025063535922/pdf/P504999-a8531ce3-576f-428f-a06c-1f039c677a33.pdf> [in English].
9. European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). (2024). *Ukraine Road Corridors Project: Board Report*. URL: https://www.ebrd.com/content/dam/ebd_dxp/documents/project/50831/ukraine-road-corridors-board-report.pdf [in English].
10. VoxUkraine. (2024). *Analysis and Evaluation of Government Forecasts for 2025–2027*. URL: <https://voxukraine.org/en/budget-declaration-analysis-and-evaluation-of-government-forecasts-for-2025-2027> [in English].

Volodymyr Zelenovsky, <https://orcid.org/0000-0001-5834-5456>

Oleg Zaviysky, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-3883-0259>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

IMPLEMENTATION OF OUTCOME-BASED ROAD MAINTENANCE CONTRACTS (OPRC) TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF THE ROAD SECTOR IN UKRAINE

Abstracts

Introduction. Current trends in the development of transport infrastructure show the growing role of effective road management mechanisms that ensure high quality of service while optimising the use of financial resources. The article examines the essence, principles and features of Output and Performance-Based Road Contracts (OPRC), which are an effective alternative to traditional forms of contracting based on payment for the volume of work performed. The author emphasises the key problems of the classical approach to road network maintenance, in particular, the lack of incentives for long-term maintenance of the technical condition of assets, insufficient level of innovation and budget overruns.

Problem. The traditional system of road maintenance in Ukraine is based on payment for the volume of work performed, which often leads to inefficient use of budget funds, insufficient incentives for contractors to maintain the long-term quality of road assets, and complicates control over the results. Combined with the deterioration of the network and limited funding, these factors create a need for new approaches to road management.

Objective. To investigate the essence, principles and effectiveness of OPRC implementation compared to traditional forms of road maintenance, as well as to summarise the results of the first pilot project of this type in Ukraine, taking into account international experience.

Materials and methods. The study uses analytical, comparative and systemic approaches, as well as elements of economic analysis. An overview of international practices of OPRC implementation (Canada, Brazil, Australia, and EU countries) was conducted, as well as an analysis of the national pilot project on the M-06 Kyiv-Chop highway (km 434–621) implemented in 2014–2021.

Results. It has been established that the implementation of OPRC provides budgetary savings in the range of (10–40) % compared to traditional approaches, contributes to improving the technical condition of road assets and the level of traffic safety. The results-based management model creates clear incentives for contractors to introduce innovative technologies and effective planning, increases transparency of interaction between the customer and the contractor, and improves the quality of road services for users.

Conclusions. Performance-based contracts are an effective tool for modernising Ukraine's road maintenance system. Their widespread use will contribute to the rational use of funds, increase the durability of road surfaces, enhance private sector participation, and improve road safety. The experience of the pilot project on the M-06 confirms the feasibility of scaling up this practice at the national level.

Keywords: road, performance-based contracts, road maintenance, OPRC, traditional contracts, management efficiency, road infrastructure.

УДК 658.7:338.47:502.131.1

Гець І. М., <https://orcid.org/0009-0002-0863-0157>Галак І. І., <https://orcid.org/0000-0002-5038-7771>*Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна.*

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАТЕРІАЛЬНОГО ПОТОКУ ЯК ОСНОВА ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО РИНКОВОГО СЕРЕДОВИЩА

Анотація

Вступ. Стрімкий розвиток логістики як науки призводить до того що вона дедалі більше виходить за межі класичного розуміння руху матеріальних ресурсів від постачальника до споживача. Вона охоплює широкий спектр процесів, пов'язаних із управлінням потоками у глобальному та локальному масштабах. Матеріальний потік у цьому контексті виступає центральним об'єктом дослідження, адже саме він відображає реальний рух ресурсів у просторі й часі, під дією логістичних операцій та зовнішніх факторів. Однак стрімкі зміни економічного середовища, поява нових технологій і потреба інтеграції принципів сталого розвитку зумовлюють необхідність перегляду класичних підходів та побудови нових моделей матеріального потоку, які б відповідали сучасним викликам економічного середовища.

Проблематика. Класичні моделі матеріального потоку, які зосереджені на лінійному русі ресурсів від постачальника до споживача, не повною мірою відображають сучасні економічні реалії. Вони не враховують вплив реверсивних процесів, багаторазовий життєвий цикл продукції, змінність логістичних систем у часі та постійну взаємодію між конкурентними системами.

Мета. Метою дослідження є перегляд концепції матеріального потоку та побудова моделі, що поєднує класичні підходи з актуальними економічними тенденціями та враховує вплив сталого розвитку, технологічного прогресу і конкурентного середовища на функціонування логістичних систем.

Матеріали та методи. У ході дослідження використано порівняльний аналіз наукових підходів різних авторів до визначення поняття «матеріальний потік» та «логістична система». Методологія дослідження включає критичний аналіз літератури, систематизацію наукових поглядів, а також побудову схем і моделей, які відображають еволюцію поняття матеріального потоку та його трансформацію під впливом сучасних умов.

Результати. Проведене дослідження показало, що матеріальний потік варто розглядати як динамічний, багатовекторний і теоретично нескінченний процес. Запропонована модель враховує реверсивну логістику, що забезпечує повернення та утилізацію ресурсів, а також демонструє, що матеріальний потік здатний функціонувати одночасно у кількох логістичних системах, розгалужуючись і об'єднуючись залежно від умов ринку.

Висновок. У рамках дослідження наголошено, що матеріальний потік не обмежується рамками однієї логістичної системи, а постійно змінюється та відтворюється під впливом учасників ланцюга постачань, технологічного розвитку й високої конкуренції на ринку. Побудована модель матеріального потоку розкриває складність і багатовимірність цього явища, а також дозволяє по новому осмислити логістику як науку в умовах сучасного економічного середовища.

Ключові слова: економіка замкненого циклу, конкурентне середовище, логістична система, логістичний ланцюг, матеріальний потік, нескінченний потік, реверсивна логістика, сталий розвиток, технологічний прогрес, утилізація.

Вступ

У контексті розгляду логістики як науки, що вивчає рух матеріальних та супутніх ним потоків в рамках ланцюга постачань матеріальних ресурсів, продукції та товарів постає питання: яким чином варто розглядати матеріальний потік задля формування комплексного уявлення про логістику на сучасному динамічному ринку економіки замкненого циклу з високим рівнем конкуренції? Щоб дати відповідь на це питання варто спочатку розглянути класичні підходи до визначення поняття «матеріальний потік», що наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Класичні підходи до визначення поняття «матеріальний потік»

Автор	Визначення поняття «матеріальний потік»
Кальченко А. Г. [1]	Матеріальний потік — взаємозв'язки усіх процесів й операцій, пов'язаних з добуванням, обробкою, переробкою, складуванням, транспортуванням і розподілом вантажів у сфері матеріального виробництва, на промислових підприємствах, в цехах, на виробничих дільницях. Матеріальний потік — потік матеріальних ресурсів, призначених для виробничого чи кінцевого споживання, оскільки матеріальні ресурси відіграють велику роль у суспільному виробництві.
Дудар Т. Г., Волошин Р. В. [2]	Матеріальний потік — це продукція (у формі вантажів, деталей, товарно-матеріальних цінностей), яка розглядається в процесі виконання над нею різних логістичних (транспортування, складування, зберігання тощо) і (або) технологічних (механічна обробка, збирання тощо) операцій і віднесена до певного часового інтервалу.
Окландер М. А. [3]	Матеріальний потік — сукупність сировини, матеріалів, напівфабрикатів, комплектуючих виробів, які рухаються від постачальників, у вигляді предметів праці надходять у виробничі підрозділи підприємства і, перетворюючись там на готові продукти праці, через канали фізичного розподілу доводяться до споживачів.
Заборська Н. К., Жуковська Л. Е. [4]	Матеріальний потік — це сукупність товарно-матеріальних цінностей, які розглядаються на часовому інтервалі у процесі застосування.
Михаліцька Н. Я., Верескля М. Р. [5]	Матеріальний потік — це сукупність матеріальних ресурсів (ВЗ, НВ, ГП, ТЗ), які сприймаються з позиції менеджменту як єдиний об'єкт, що існує у певному часовому інтервалі (проміжку часу) із застосуванням до нього управлінських операцій (упакування, перевезення, навантаження, розвантаження, сортування, консолідація, маркування тощо).

На основі цих визначень можна дійти до твердження яке відображає класичне трактування поняття матеріального потоку, а саме: матеріальний потік — це цілісна сукупність матеріальних ресурсів (сировини, напівфабрикатів, деталей, готової продукції, товарно-матеріальних цінностей), що рухаються у просторі та часі від постачальника до кінцевого споживача, розглядаються у певному часовому інтервалі й зазнають логістичних та технологічних операцій (транспортування, складування, зберігання, переробки, навантаження, розвантаження, пакування, сортування, консолідації, маркування, тощо), він є об'єктом управління в логістичній системі та виступає основною складовою ланцюга постачань.

Для побудови цілісної картини варто зазначити поняття логістичного ланцюга, Заборська Н. К. наводить, що логістичний ланцюг — це лінійно впорядкована множина учасників логістичного процесу, які здійснюють логістичні операції із доведення зовнішнього матеріального потоку від однієї логістичної системи до іншої за умови виробничого споживання або до кінцевого споживача за умови особистого невиробничого споживання [4]. Також варто зазначити що розуміється під логістичною системою, Дудар Т. Г. зазначає, що логістична система — це складна організаційно структурована економічна система, яка складається із взаємопов'язаних елементів-ланок, що об'єднані внутрішніми цілями організації бізнесу а також визначеними зовнішніми цілями. Логістичні системи, як правило, складаються з декількох підсистем і активно взаємодіють із зовнішнім середовищем [2].

Окландер М. А. також зазначав, що логістична система — це єдино можлива форма існування логістики як інтегрованої функції управління матеріальним потоком [3]. Васильєв О. Л. виділяє наступні основні підсистеми логістичної системи: транспортна, складська, управління запасами, інформаційна, логістичного обслуговування, логістичного менеджменту [6]. У той же час Кальченко А. Г. поділяє підсистеми на функціональні (закупівельна, виробнича, розподільча, логістична (складська)), а інші відносить до допоміжних, також їх можна назвати обслуговуючими.

З урахуванням зазначеної інформації можна побудувати схему матеріального потоку в рамках логістичного ланцюга логістичної системи за класичним підходом (рис. 1).

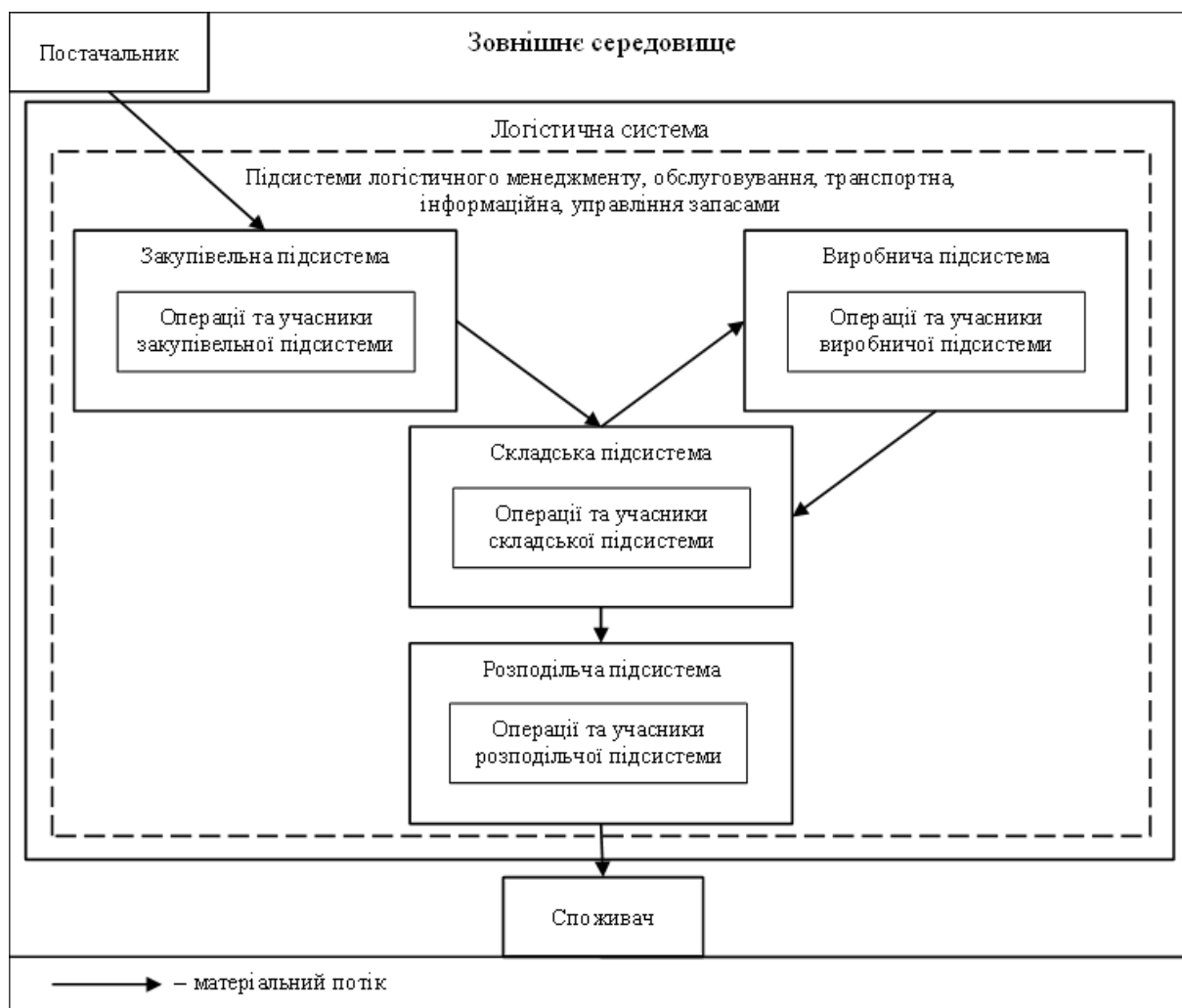


Рисунок 1 — Схематичне зображення матеріального потоку за класичним підходом в рамках логістичної системи

Варто зазначити, що логістичні операції в рамках кожної з підсистем можуть виконуватися одним або кількома учасниками логістичного ланцюга або ж логістичними провайдерами, в той же час операції з кількох підсистем можуть виконуватися одним учасником/провайдером, також різні структурні підрозділи одного учасника можуть відноситися до різних підсистем. Внаслідок цього схематичне зображення конкретного логістичного ланцюга може видозмінюватись, однак принцип руху матеріальних ресурсів за даною моделлю буде зберігатися.

Дана модель відображає всі раніше перераховані критерії, однак не є достатньо актуальною й має ряд недоліків в контексті сучасного економічного середовища пов'язаного з впровадженням принципів сталого розвитку, стрімким розвитком технологій, в тому числі й в галузі логістики,

принципами ринкової економіки заснованої на конкуренції й відповідній наявності аналогів для будь-якого виду товарів або послуг.

Мета й завдання роботи полягають в побудові моделі матеріального потоку для сучасної макрологістичної системи, що б враховувала інтеграцію принципів сталого розвитку в логістичну діяльність, технологічний прогрес, умови економіки з високим рівнем конкуренції.

Основна частина

Враховуючи розглянуті недоліки пропонується поступово розглянути кожен з них та вдосконалити модель матеріального потоку задля їх усунення. Розпочати варто з інтеграції принципів сталого розвитку в модель логістичного потоку.

Визначення поняття «сталий розвиток» наведено в доповіді Міжнародної комісії з питань екології та розвитку ООН під назвою «Наше спільне майбутнє» [7]. Воно виглядає наступним чином: «Сталый розвиток — це розвиток, який задовольняє потреби сьогодення, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби». Концепції логістики й сталого розвитку є дуже тісно пов'язаними й взаємодоповнюючими. Внаслідок такого тісного взаємозв'язку утворилася спільна/об'єднана концепція — концепція сталої логістики. Вона полягає в реалізації логістичних функцій і завдань в відповідності до вимог стратегії сталого розвитку.

Саєнсус М. А. вважає, що реалізація концепції сталої логістики пов'язана з ростом витрат, які зумовлені: по-перше, необхідністю формування інфраструктури, що займається поверненням відходів; по-друге, транспортними витратами на переміщення зворотних відходів із ринку збуту на ринок закупівель; по-третє, зростанням витрат на тару і упаковку продукції [8]. У ході формування концепції сталої логістики можна виділити 3 основні напрямки: реверсивна логістика, зелена логістика і сітілогістика. Їх суть полягає в реалізації концепції сталого розвитку в логістичній діяльності з точки зору різних сфер людської діяльності.

Якщо зелена логістика й сітілогістика не видозмінюють модель матеріального потоку [9, 10], то реверсивна логістика напряду впливає на рух матеріальних ресурсів, що є основою матеріального потоку. Дейл Роджерс визначає цю функціональну область як процес планування, реалізації та контролю раціональних, економічно ефективних потоків матеріалів, незавершеного виробництва, готової продукції і відповідної інформації від точки споживання до точки їх походження з метою повернення вартості продукту або належної утилізації [11]. Також важливим є те що Асоціація Реверсивної Логістики (США) у 2015 році уточнила визначення реверсивної логістики як діяльності з управління цінностями (як корисними в подальшому, так і марними), які утворюються в процесі придбання або споживання товару або послуги, незалежно від сфери і галузі використання» [12]. Виходячи з цих тверджень повернення може відбуватися на будь-якому етапі логістичного ланцюга, тобто з будь-якої функціональної підсистеми, а також від споживача.

У рамках моделювання матеріального потоку з огляду на вищезазначену інформацію варто додати «Реверсивну підсистему» в рамках логістичної системи, а також «Утилізацію» в рамках зовнішнього середовища для матеріальних ресурсів з різних ланок які не підлягають повторному введенні їх в «класичний матеріальний потік». Варто також зазначити що формуватися «Реверсивна підсистема» може як із окремих учасників логістичного ланцюга, так і з певних функціональних підрозділів що відповідають за повернення, переробку, підготовку до утилізації та інші операції реверсивної логістики на підприємствах, що вже залучені до «класичного ланцюга постачань» Видозмінений матеріальний потік зображено на **рис. 2**.

З огляду на дану модель реверсивна підсистема видозмінює матеріальний потік і робить його не направленим в єдиному напрямку а одночасно направленим в безлічі напрямків, допоки матеріальні ресурси не будуть спожиті у вигляді товару що неможливо повернути назад в логістичну систему, тобто до його утилізації. Також можна зазначити, що матеріальні ресурси в даній моделі проходять повний «життєвий цикл» товару, як і в попередній моделі, однак в даній він не завершується споживанням, а повторюється з певної відправної точки допоки не перейде в утилізацію.

Розширюючи дану думку варто також врахувати те що матеріальні ресурси певної логістичної системи можуть не мати можливості використовуватись повторно в межах цієї системи, однак в той же час вони можуть бути базою для початку нової логістичної системи, тобто в макросередовищі розглянута логістична система на будь якому етапі логістичного ланцюга може виконувати роль постачальника для наступної логістичної системи, а наступна логістична система виконувати роль споживача. Якщо підійти до цього твердження більш глобально, то можна прийти до висновку, що матеріальний не є образною прямою лінією, та навіть не є замкненим, адже здебільшого використані товари не повертаються у вигляді сировини до початкових виробників, а перетворюються у інші товари, тобто матеріальний потік по своїй суті є теоретично нескінченним, і тому його варто розглядати у вигляді спіралі, адже етапи життєвого циклу продукції повторюються, проте не є ідентичними, а сировина будь якого продукту в переважній більшості використовується в різних галузях, тобто як початкова точка наступних логістичних системах.

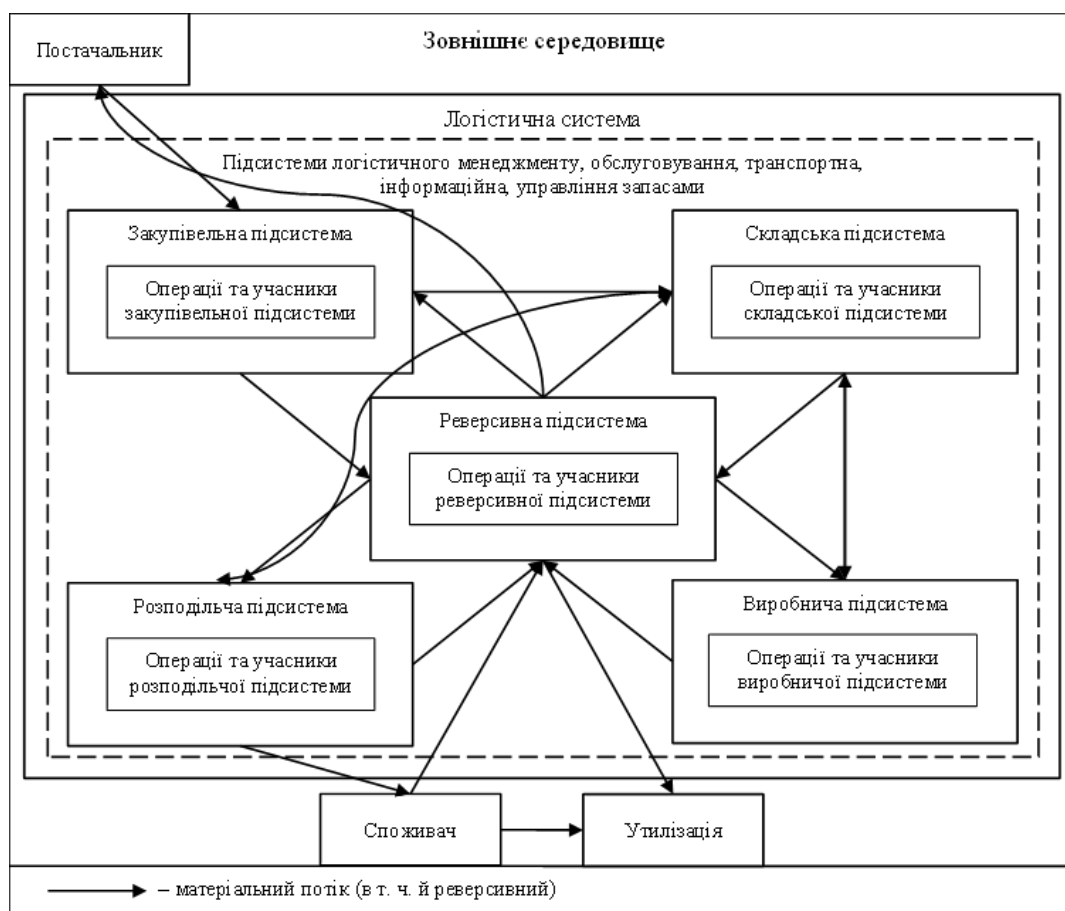


Рисунок 2 — Схематичне зображення матеріального потоку з урахуванням реверсивної підсистеми в рамках логістичної системи

Беручи до уваги також технологічний прогрес варто доповнити, що в часі відбуваються постійні зміни в операціях кожної логістичної системи, тому навіть під час повторного проходження матеріального потоку через дану систему етапи його життєвого циклу будуть подібними до попереднього, однак не будуть ідентичними.

Таким чином в моделі варто зобразити логістичні системи які видозмінюються в часі внаслідок постійного технологічного прогресу, а також логістичні системи що використовують попередні як свою відправну точку. З практичної точки зору такий матеріальний потік має мати якогось початкового постачальника, або ж «вхідну точку», а також, незважаючи на теоретичну нескінченність, кінцеву

точку споживання/утилізації з якої матеріальні ресурси не можуть повернутися в логістичну систему, а також не можуть стати вихідною точкою нової логістичної системи, таку точку можна також назвати «точкою неповернення». Модель такого матеріального потоку зображено на **рис. 3**.

Розглядаючи дану модель можна дійти до твердження, що матеріальний потік, незважаючи на те що є основною складовою логістичного ланцюга і відповідної системи, не обмежується нею та може проходити як одночасно так і послідовно через декілька паралельних логістичних систем, що видозмінюються в часі під дією технологічного прогресу.

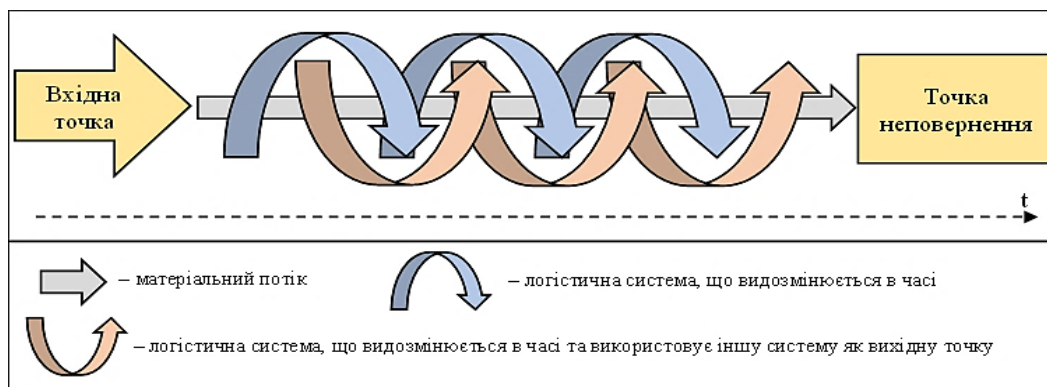


Рисунок 3 — Схематичне зображення матеріального потоку, що проходить через логістичні системи, що видозмінюються в часі

Незважаючи на перераховані вище переваги, дана модель все ще не враховує постійну конкуренцію на ринках де існують описані логістичні системи. Основою конкуренції на будь-якому ринку є наявність певної кількості аналогів певної продукції або послуг, відповідно матеріальний потік може циркулювати між цими аналогами, в залежності від того де його існування є більш раціональним, одночасно перебуваючи в декількох логістичних системах. Схематично це зображено на **рис. 4**.

Це підводить до твердження, що в конкурентному середовищі матеріальний потік розгалужується й в той же час об'єднується, може перебувати одночасно в різних логістичних системах та в той же час циркулювати між ними.

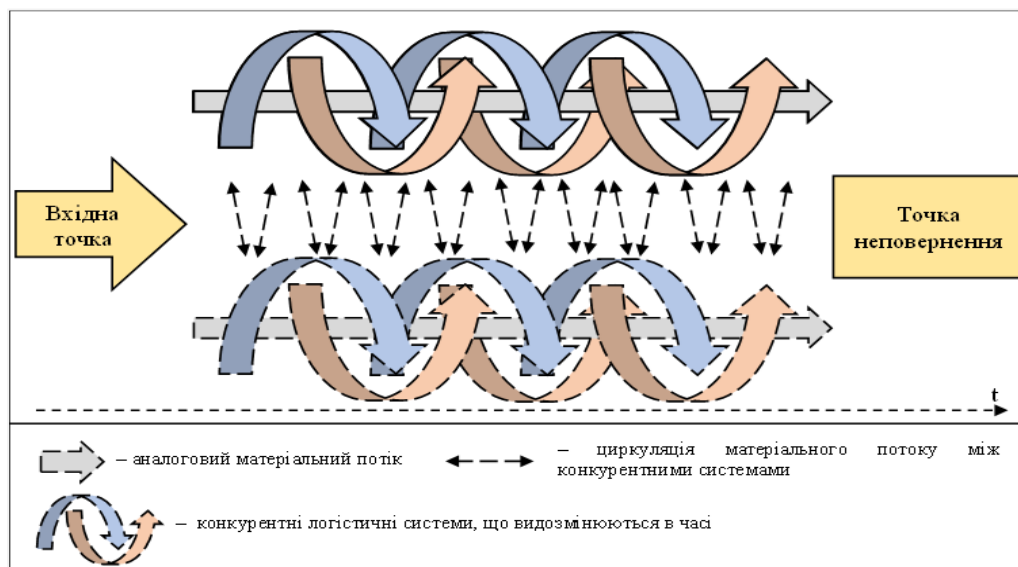


Рисунок 4 — Схематичне зображення матеріального потоку, що проходить через конкурентні логістичні системи, що видозмінюються в часі

Розглядаючи всі вищеописані фактори можна ствердити що побудована модель багатогранно відображає властивості матеріального потоку, які можна описати наступним твердженням: «Матеріальний потік є теоретично нескінченним та динамічним потоком матеріальних ресурсів в часі та просторі під діями учасників логістичної системи в межах функціональних та допоміжних підсистем шляхом виконання логістичних операцій, матеріальний потік може одночасно рухатися в безлічі напрямків в просторі та видозмінюється в часі, також він є основою логістичної системи, однак не обмежується нею і постійно розгалужується й об'єднується в рамках та між конкурентними логістичними системами, він завжди має певну вихідну точку та на практиці, не зважаючи на теоретичну нескінченність, приходять до точки неповернення в якій матеріальні ресурси більше не можуть використовуватися в межах жодної логістичної системи внаслідок відсутності необхідних технологій або нераціональності цих дій».

Висновки

У роботі проведено дослідження еволюції поняття «матеріальний потік» та його ролі в логістиці в сучасних умовах економічного середовища. Спершу було розглянуто класичні підходи до визначення матеріального потоку різними науковцями, що дозволило сформулювати його узагальнене трактування як цілісного потоку матеріальних ресурсів, який рухається від постачальника до кінцевого споживача в межах певного часового інтервалу під дією логістичних операцій. Окрему увагу зосереджено на аналізі логістичного ланцюга й логістичної системи, їх структурних підсистем та взаємодії із зовнішнім середовищем. Була проведена побудова й модернізація моделей матеріального потоку, які враховують сучасні економічні умови. Зокрема, було проаналізовано вплив принципів сталого розвитку та визначено місце сталої логістики, в якій ключову роль відіграє реверсивна логістика, в матеріальному потоці. На основі цього в модель введено «реверсивну підсистему» та елемент утилізації, що відображає повторне використання ресурсів і завершення їхнього життєвого циклу відповідно. Подальший розвиток моделі дозволив розглядати матеріальний потік не як лінійну чи замкнуту структуру, а як нескінченний процес, що нагадує спіраль і постійно відтворюється в нових логістичних системах. У подальшому розвитку моделі враховано вплив технологічного прогресу та конкурентного середовища. У результаті матеріальний потік був представлений як динамічне й багатовекторне явище, яке може одночасно функціонувати в різних логістичних системах, розгалужуватися, об'єднуватися та видозмінюватися в часі.

Зроблено висновок, що матеріальний потік є теоретично нескінченним та динамічним процесом, який не обмежується лише однією логістичною системою, а постійно трансформується під впливом учасників логістичних систем і відповідних ним підсистем, технологій і конкуренції, водночас маючи вихідну точку та практичну «точку неповернення».

Таким чином, у статті сформовано сучасну концептуальну модель матеріального потоку, яка відображає його складність, багатовимірність і взаємозв'язок з актуальними тенденціями економічного середовища, що дозволяє розглядати логістику як науку в більш широкому та динамічному контексті.

Список літератури

1. Кальченко А. Г. Логістика: Підручник. К.: КНЕУ, 2003. 284 с.
2. Дудар, Т. Г. Волошин Р. В. Основи логістики : навч. посіб. : ЦУЛ, 2012. 202 с.
3. Окландер М. А. Логістика: Підручник. К.: Центр учбової літератури, 2008. 346 с.
4. Заборська Н. К., Жуковська Л. Е. Основи логістики: навчальний посібник. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011.
5. Михаліцька Н. Я., Верескля М. Р. Логістичний менеджмент: навчальний посібник. Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ, 2020. 440 с.
6. Васильєв О. Л. Проектування логістичних систем: Конспект лекцій. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 34 с.
7. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>.
8. Саєнсус М. А. Логістика як складник стратегії сталого розвитку. Економіка і суспільство. Випуск № 17. 2018. С. 46–52.

9. Білоног О. Є., Галак І. І., Добровольська А. М., Янішевський С. В. Системні аспекти забезпечення ефективності ситілогістики. *Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку*. Запоріжжя, 2025. Випуск 2 (32), С. 221–235. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2025-2/32-18>.
10. Галак І. І., Крюковська Л. І. Особливості управління реверсивними потоками у замкненому ланцюзі постачань. *Вісник Національного транспортного університету. Серія Технічні науки*. 2021. Вип. 48. С. 73–82.
11. Rogers Dr.DaleS, Tibben-Lembke Dr. Ronald S. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reno: University of Nevada, Centre for Logistics Management, 1998. 17 p.
12. Reverse Logistics Digital Magazine. Edition 58. 47 p. URL: <https://www.reverse-logisticstrends.com> (дата звернення: 07.09.2025).

References

1. Kalchenko A. G. Lohistyka (Logistics): Textbook. Kyiv: KNEU, 2003. 284 p. [in Ukrainian].
2. Dudar T. H., Voloshyn R. V. Osnovy lohistyky (Basics of logistics): Tutorial. Kyiv: TsUL, 2012. 202 p. [in Ukrainian].
3. Oklander M. A. Lohistyka (Logistics): Textbook. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury, 2008. 346 p. [in Ukrainian].
4. Zaborska N. K., Zhukovska L.E. Osnovy lohistyky (Basics of logistics): Tutorial. Odesa: ONAZ im. O.S. Popova, 2011. [in Ukrainian].
5. Mykhalitska N. Ya., Veresklyia M. R. Lohistychnyi menedzhment (Logistics management): Tutorial. Lviv: Lviv State University of Internal Affairs, 2020. 440 p. [in Ukrainian].
6. Vasyliiev O. L. Proektuvannia lohistychnykh system (Design of logistics systems): Lecture notes. Kharkiv: UkrDUZT, 2019. 34 p. [in Ukrainian].
7. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> (Last accessed: 07.09.2025) [in English].
8. Saiensus M. A. Lohistyka yak skladnyk stratehii staloho rozvytku (Logistics as a component of sustainable development strategy). *Ekonomika i suspilstvo*. 2018. Vol. 17. P. 46–52 [in Ukrainian].
9. Bilonoh, O. Ye., Halak, I. I., Dobrovolska, A. M., & Yanishevskiy, S. V., 2025. Systemni aspekty zabezpechennia efektyvnosti sitylohistyky (System aspects of ensuring the efficiency of city logistics). *Menedzhment ta pidpriemnytstvo: trendy rozvytku – Management and Entrepreneurship: Development Trends*, (2(32)). P. 221–235. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2025-2/32-18> [in Ukrainian].
10. Halak, I. I., & Kriukovska, L. I., 2021. Osoblyvosti upravlinnia reversyvnymy potokamy u zamknenomu lantsiuhu postachan (Features of reverse flow management in a closed supply chain). *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Bulletin of the National Transport University. Series: Technical Sciences*, (48), 73–82 [in Ukrainian].
11. Rogers D. S., Tibben-Lembke R. S. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices. Reno: University of Nevada, Centre for Logistics Management, 1998. 17 p. [in English].
12. Reverse Logistics Digital Magazine. Edition 58. 47 p. URL: <https://www.reverse-logisticstrends.com> (Last accessed: 07.09.2025) [in English].

Ivan Hets, <https://orcid.org/0009-0002-0863-0157>

Iryna Halak, <https://orcid.org/0000-0002-5038-7771>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

IMPROVEMENT OF MATERIAL FLOW MODELS AS THE BASIS OF CIRCULAR ECONOMY SUPPLY CHAINS IN A DYNAMIC MARKET ENVIRONMENT

Abstract

Introduction. The rapid development of logistics as a science leads to its expansion beyond the classical understanding of the movement of material resources from supplier to consumer. It encompasses a wide range of processes related to the management of flows on both global and local scales. In this context, the material

flow serves as the central object of study, as it reflects the actual movement of resources in space and time under the influence of logistics operations and external factors. However, rapid changes in the economic environment, the emergence of new technologies, and the need to integrate the principles of sustainable development necessitate a revision of classical approaches and the construction of new models of material flow that meet the contemporary challenges of the economic environment.

Problem Statement. Classical models of material flow, which focus on the linear movement of resources from supplier to consumer, do not fully reflect modern economic realities. They fail to take into account the impact of reverse processes, the multiple life cycle of products, the variability of logistics systems over time, and the constant interaction between competing systems.

Purpose. The purpose of this study is to revise the concept of material flow and to construct a model that combines classical approaches with current economic trends, while considering the influence of sustainable development, technological progress, and competitive environments on the functioning of logistics systems.

Materials and Methods. The study employs a comparative analysis of different authors' scientific approaches to defining the concepts of «material flow» and «logistics system.» The research methodology includes critical literature analysis, systematization of scientific viewpoints, as well as the development of schemes and models that reflect the evolution of the concept of material flow and its transformation under modern conditions.

Results. The study has shown that material flow should be considered as a dynamic, multidirectional, and theoretically infinite process. The proposed model incorporates reverse logistics, which ensures the return and disposal of resources, and also demonstrates that material flow can simultaneously operate within several logistics systems, branching out and merging depending on market conditions.

Conclusions. The study emphasizes that material flow is not confined to a single logistics system but constantly changes and reproduces under the influence of supply chain participants, technological development, and high market competition. The constructed model of material flow reveals the complexity and multidimensionality of this phenomenon and provides a new perspective on logistics as a science in the context of the modern economic environment.

Keywords: material flow, logistics system, supply chain, reverse logistics, disposal, sustainable development, technological progress, competitive environment, infinite flow.

УДК 658.8:004.8

Галюк І. Б., канд. екон. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-0726-1954>Єжак Ф. Ф., <https://orcid.org/0009-0008-2000-1517>Тараєвська Л. С., канд. екон. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-7301-0881>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

ВИКОРИСТАННЯ ШІ У МАРКЕТИНГУ ТА ЛОГІСТИЦІ ЗАДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ ПІДПРИЄМСТВА

Анотація

Вступ. ШІ активно впроваджується у різні сфери господарської діяльності, автоматизуючи рутинні процеси, зменшуючи обсяг ручної праці та підвищуючи продуктивність. Сучасні ринкові тенденції свідчать про те, що зростання частки працівників покоління Z та Alpha сприятиме ще більшій автоматизації, оскільки саме молоде покоління позитивно сприймає заміну людини технологією на етапах виконання повторюваних завдань.

Проблематика. Незважаючи на активну зацікавленість бізнесу можливостями використання штучного інтелекту у діяльності підприємств, компанії ще не мають достатньо знань і розуміння як саме ШІ може бути використаний — комплексно чи фрагментарно, покращуючи роботу окремих підрозділів чи підприємства в цілому, які ресурси для цього потрібні і що в результаті буде отримано, які дані потрібно для роботи ШІ у конкретній компанії і наскільки точними є результати роботи штучного інтелекту тощо. Ці питання мають бути опрацьовані задля формування розуміння системного підходу до застосування штучного інтелекту в діяльності підприємства, починаючи з процесів маркетингового прогнозування, завершуючи результуючою оптимізацією використання ресурсів і підвищення конкурентоспроможності компанії.

Мета. Метою статті є представлення комплексного підходу до застосування штучного інтелекту в роботі підприємства, із особливим акцентом на маркетинговій та логістичній складових, які визначають стратегію розвитку компанії, формування конкурентних переваг та оптимізацію ланцюгів постачання. У дослідженні окреслено проблемні моменти застосування ШІ та переваги його використання у маркетингових комунікаціях, прогнозуванні попиту, управлінні запасами, оптимізації транспортування та забезпеченні стабільності постачань. Це дає можливість компанії максимально ефективно використовувати ресурси і, як наслідок, утримувати стійкі конкурентні позиції на ринку.

Матеріали і методи. Для досягнення мети дослідження використано такі методи: метод аналізу і синтезу для вивчення літературних джерел та публікацій, порівняльний метод для зіставлення традиційних методів прогнозування з підходами, заснованими на штучному інтелекті, системний підхід для розгляду штучного інтелекту як інструменту, що комплексно впливає на всі сфери діяльності підприємства.

Результати. Особливу увагу приділено використанню ШІ в маркетинговому прогнозуванні як ключовому елементу планування діяльності підприємства. Описано переваги використання сучасних методів прогнозування, зокрема на основі Big Data та машинного навчання, порівняно з традиційними статистичними підходами. Висвітлено практичні аспекти застосування S&OP для покращення управління виробничими ресурсами, постачанням і персоналом. У роботі висвітлюється значення якісних прогнозів для формування оперативних планів, ресурсного забезпечення, логістичних рішень та управління попитом. Порівнюються традиційні статистичні методи прогнозування з підходами, що ґрунтуються на Big Data та машинному навчанні. Останні дають змогу досягти вищої точності, виявляти складні взаємозв'язки та швидко реагувати на зміни в ринковому середовищі. Також акцентується увага на необхідності якісного інформаційного забезпечення та кваліфікованого персоналу для ефективного використання цих технологій.

Обґрунтовано, що використання ШІ забезпечує гнучкість, точність, оперативність у прийнятті рішень і сприяє підвищенню ефективності діяльності підприємств у таких сферах як управління

запасами, обслуговування клієнтів, оптимізація ресурсів, ціноутворення та прибутковість. Окреслено комплексний підхід до впровадження ІІІ для досягнення стратегічних цілей підприємства.

Висновки. Доведено, що комплексне впровадження ІІІ є дієвим інструментом для забезпечення гнучкого управління, зростання ефективності та досягнення стратегічних цілей підприємств у сучасному динамічному ринковому середовищі.

Ключові слова: штучний інтелект, логістика, ресурсне забезпечення, маркетинг, оптимізація, конкурентоспроможність, ефективність.

Вступ

Штучний інтелект (ІІІ) впевнено увійшов у наше повсякденне життя і розширює свій вплив на усі сфери діяльності. Сфера обслуговування, освітня та медична галузі, виробничі підприємства — всі більшою чи меншою мірою залучають штучний інтелект у свої процеси роботи. За даними дослідження, проведеного Boston Consulting Group (BCG), із близько 1 800 керівників компаній у різних країнах 89 % визнали необхідність використання ІІІ у роботі своїх підприємств і мають чіткі наміри застосування ІІІ у виробництві [1].

Водночас, високий рівень конкуренції на ринку вимагає застосування все нових і нових підходів до роботи, більшої точності прогнозів, максимально ефективного використання ресурсів підприємства, забезпечення економічної сталості. Ускладнення завдань вимагає складніших підходів до їх вирішення. Штучний інтелект стає тим інструментом, який може допомогти вирішити складні питання і, як результат, забезпечити конкурентну перевагу шляхом оптимізації бізнес-процесів та використання ресурсів підприємства.

Застосування штучного інтелекту з метою спрощення рутинних процесів на підприємствах набирає все більшої популярності. Відповідно, з'являються нові наукові напрацювання даної тематики. Зарубіжні і вітчизняні вчені досліджують можливості застосування штучного інтелекту у виробничій, збутовій, постачальницькій, сервісній, логістичній діяльності підприємств, управлінні персоналом, маркетинговому прогнозуванні тощо.

Застосування ІІІ для потреб бізнесу вивчали у своїх працях Цао Лі і П. Палоу [2], Т. Девенпорт і О. Ю. Могилевська, Р. Ронанкі [3], І. В. Сідак, А. М. Слободяник, [4]. Кожен із авторів вивчав можливості спрощення бізнес-процесів шляхом застосування цифрової трансформації. Як використовувати штучний інтелект в менеджменті проаналізовано у наукових напрацюваннях Р. Аміко, В. Колбйорсруда, Н. В. Погореленко [6] і Р. Томаса [5]. Автори розглянули перспективи зміни управлінських процесів внаслідок застосування ІІІ. Специфіку використання штучного інтелекту в маркетингу подано у статтях П. Кіцмана, Дж. Мані та Б. Делаерта [7], А. Фігун, Я. Петрівський, Т. Коханевич [8], група авторів [9]. Науковці дослідили можливості використання ІІІ у прогнозуванні, наукометричному аналізі. Варіанти застосування ІІІ у логістиці представлено у напрацюваннях таких науковців як М. Плєсїсса, Р. Гербера, Дж. Єдена [10], Н. Ю. Кирлик [11]. Автори дослідили можливості підвищення стійкості ланцюгів постачання шляхом цифровізації.

Незважаючи на активну зацікавленість бізнесу можливостями використання штучного інтелекту у діяльності підприємств, компанії ще не мають достатньо знань і розуміння як саме ІІІ може бути використаний — комплексно чи фрагментарно, покращуючи роботу окремих підрозділів чи підприємства в цілому, які ресурси для цього потрібні і що в результаті буде отримано, які дані потрібно для роботи ІІІ у конкретній компанії і наскільки точними є результати роботи штучного інтелекту тощо. Така ситуація є зрозумілою. Штучний інтелект рвучко увійшов у наше життя. Ми, як користувачі і набувачі вигод, не встигаємо зрозуміти як діяти, як використати ІІІ на користь, а не на шкоду, як штучний інтелект може комплексно вирішувати задачі підприємства. Ці питання мають бути опрацьовані задля формування розуміння системного підходу до застосування штучного інтелекту в діяльності підприємства, починаючи з процесів маркетингового прогнозування, завершуючи результуючою оптимізацією використання ресурсів і підвищення конкурентоспроможності компанії.

Метою статті є представлення комплексного підходу до застосування штучного інтелекту в роботі підприємства, із особливим акцентом на маркетинговій та логістичній складових, які визначають стратегію розвитку компанії, формування конкурентних переваг та оптимізацію ланцюгів

постачання. У дослідженні окреслено проблемні моменти застосування ШІ та переваги його використання у маркетингових комунікаціях, прогнозуванні попиту, управлінні запасами, оптимізації транспортування та забезпеченні стабільності постачань. Це дає можливість компанії максимально ефективно використовувати ресурси і, як наслідок, утримувати стійкі конкурентні позиції на ринку.

Для досягнення мети дослідження використано такі методи: метод аналізу і синтезу для вивчення літературних джерел та публікацій, порівняльний метод для зіставлення традиційних методів прогнозування з підходами, заснованими на штучному інтелекті, системний підхід для розгляду штучного інтелекту як інструменту, що комплексно впливає на всі сфери діяльності підприємства.

Виклад основного матеріалу дослідження

Цифрова трансформація активно впроваджується у всіх сферах економічного господарювання. Штучний інтелект допомагає вирішувати багато рутинних, складних завдань. Компанії і окремі групи працівників відмічають вагомий вплив ШІ на їхню роботу і продуктивність — вони покращуються. 2024 рік демонструє впровадження ШІ у 72 % компаній у світі [12]. Використання чату GPT для вирішення рутинних питань бізнесу зросло з 55 % у 2023 році до 75 % у 2024 році [13]. Основними сферами застосування ШІ стали: автоматизація обслуговування клієнтів — 56 %, підвищення рівня кібербезпеки — 51 %, робота з персоналом — 47 % [14].

Україна демонструє активність у сфері впровадження ШІ у бізнес-процеси, займаючи другу позицію в рейтингу у серед країн Центральної та Східної Європи [15].

Тенденції ринку показують, що надалі, із збільшенням кількості працівників покоління Z та Alpha, штучний інтелект дозволить автоматизувати більшу частину роботи. Вже на сьогодні молоде покоління (у віці від 18 до 29 років) позитивно сприймає використання ШІ для автоматизації рутинної роботи і заміщення самих працівників для її виконання [16]. Водночас, виникають побоювання, що широке використання ШІ і підвищення рівня автоматизації призведуть до зменшення потреби у працівниках. Так за прогнозами Всесвітнього банку, подібне скорочення може сягнути 83 млн робочих місць. [17]. Однак, від переваг використання ШІ не готова відмовитись жодна компанія.

Переваги застосування штучного інтелекту є очевидними — саме він дозволяє забезпечити цифрову трансформацію на високому рівні якості з максимальними вигодами для компанії. Він слугує помічником у сферах фінансового менеджменту, логістики, роботи з клієнтами, управлінні персоналом, маркетингу і продажах, кібербезпеці, управлінні ризиками.

Вивчення можливостей використання ШІ в роботі підприємства має базуватись на комплексному підході до цього питання.

Планування роботи кожної організації розпочинається із визначення прогнозів майбутнього стану підприємства. Маркетингове прогнозування займає чільне місце у процесі планування діяльності, оскільки залежно від результатів цих прогнозів складають оперативні плани роботи, визначають необхідне ресурсне забезпечення, організовують логістичні процеси тощо.

Прогнози лягають в основу планування продажів і операцій, що збільшує ймовірність успіху бізнес-процесів та досягнення стратегічних цілей. Використання S&OP (Sales and Operations Planning) у діяльності підприємства дозволяє ефективно контролювати виробничі ресурси, приймати зважені кадрові рішення, раціонально керувати ланцюгом постачань і оптимізувати потребу в матеріалах [18].

Традиційні статистичні методи прогнозування мають широке застосування внаслідок своєї простоти. Однак, вони базуються на даних попередніх періодів, через що не враховують можливість змін на ринку.

Методи прогнозування Big data не містять недоліків статистичних методів, вони спроможні виявляти складні залежності і реагувати на зміни зовнішніх умов. Однак, їх використання потребує вартісних обчислювальних ресурсів та достатньої кваліфікації персоналу для інтерпретації результатів прогнозу.

Методи прогнозування, що базуються на машинному навчанні, із використанням ШІ, дозволяють працювати із великими обсягами даних і враховувати складні взаємозв'язки. Це великий

плюс, оскільки точність прогнозу буде високою. Однак, для точності цих прогнозів необхідно використовувати якісні дані і це часто стає проблемою. Окрім цього, обчислювальні вимоги теж є високі.

Звичайно, в роботі підприємства виникають різні потреби у маркетинговому прогнозуванні, тому застосування різних методів має місце в залежності від наявних ресурсів і конкретної потреби. Комбінування методів прогнозування є вдалим підходом задля покриття прогнозних потреб.

Щодо переваг застосування ІІІ у маркетинговому прогнозуванні, насамперед, слід відмітити можливість виявлення складних зв'язків і залежностей патернів продаж. Системна візуалізація таких зв'язків є складним завданням силами аналітиків компанії навіть із великим досвідом. ІІІ спрощує цю роботу і, за умови якісних вхідних даних, дає вищу точність результатів та враховує більшу кількість факторів впливу. Важливим аспектом є відсутність суб'єктивізації результатів — людський та емоційний фактори на мають впливу на результат, через що знижується ймовірність маніпулювання результатами [19].

Основним завданням на етапі маркетингового прогнозування є забезпечення якісними даними у достатньому обсязі. Практика показує, що помилки у результатах прогнозу виникають саме через низьку якість вхідних даних. А це призводить до збільшення операційних витрат та зростання собівартості товарообігу на 2 – 5 %. Ріст витрат виникає внаслідок збільшення (дефіциту) запасів на складах, необхідності більшої залученості персоналу, вибору неефективних каналів доставки тощо.

Натомість зростання точності прогнозу до 20 % дозволяє зменшити запаси на підприємстві на 25 %. А це скорочення складських площ, зменшення залученості персоналу, вища якість маршрутизації, ефективне використання транспорту та каналів доставки тощо. Таким чином, ресурси підприємства використовуються більш оптимально [20].

Використання ІІІ дозволяє оптимізувати роботу в різних напрямках роботи підприємства, забезпечуючи підвищення рівня гнучкості операцій та роботи в цілому, що веде до росту ефективності діяльності:

- застосування ІІІ у прогнозуванні попиту дозволяє скоротити запаси, внаслідок чого мінімізується «заморожування» обігових коштів, витрати на утримання запасів і складів зменшуються;
- використання автоматичних систем моніторингу веде до збільшення швидкості реагування на ризики, скорочення дефіциту запасів, зменшення простоїв та росту рівня сервісу для клієнтів;
- у сфері запасів забезпечується їх скорочення, зменшується обсяг списань продукції. Водночас скорочуються витрати на утримання запасів і списання;
- оптимізація ресурсного забезпечення забезпечує свободу у плані ціноутворення. Обіговість запасів зростає, маржинальність підвищується. Це веде до зростання прибутків та конкурентоспроможності;
- автоматизація процесів дозволяє скоротити витрати на оплату праці, забезпечити оптимальну чисельність персоналу. Водночас, автоматизація роботи підвищує продуктивність праці;
- у сфері обслуговування клієнтів використання ІІІ дозволяє підвищувати рівень сервісу внаслідок більшої контактності, скорочення часу оброблення і виконання замовлень. Спостерігається зростання конверсії. Покращення сервісу веде до збільшення середнього чеку і не потребує в той самий час додаткових витрат на утримання клієнтів.

Можливості використання ІІІ в межах підприємства представлено у **табл. 1**.

Таблиця 1

Можливості та переваги використання ІІІ в межах підприємства

Напрямок використання	Можливості використання	Переваги використання
Маркетинг	Прогнозування попиту, аналітика даних	- зростання точності прогнозів; - прогнозування змін у попиті; - гнучкість у ціноутворенні; - зростання клієнтського сервісу.

Напрямок використання	Можливості використання	Переваги використання
Логістика	Автоматизоване управління закупівлями і ланцюгами постачання. Автоматизація маршрутів доставки.	- скорочення запасів; - скорочення заморожених коштів; - зниження витрат на утримання запасів і склади; - зменшення транспортних витрат; - автоматичний перерахунок потреби у ресурсах; - адаптація ланцюга постачання до змін; - передбачення потреб у поповненні запасів; - оптимізація маршрутів доставки; - баланс ресурсів у ланцюгу «склад-виробництво».
Фінанси	Автоматизовані системи ведення фінансів	- скорочення обсягів заморожених у запасах коштів; - підвищення маржинальності; - зростання обігу; - зростання прибутку; - вивільнення коштів для розширення діяльності, розроблення нових напрямків роботи.
Персонал	Автоматизовані системи кадрового обліку, нарахування заробітної плати, навчання та адаптації	- скорочення «людських» помилок; - спрощення роботи HR і процесах підбору персоналу; - швидкість оброблення резюме; - автоматизація рутинної роботи; - скорочення витрат на оплату праці; - баланс кількості персоналу; - автоматичний аналіз KPI.
Виробництво	Автоматизований вияв «вузьких» місць та операційних затримок	- підвищення продуктивності; - зниження витрат; - скорочення простоїв; - гнучкість реагування на проблемні моменти; - оновлення виробничих графіків у динаміці.
Управління ризиками	Робота з даними	- прогнозування ризиків; - скорочення часу на реагування на ризикову ситуацію; - напрацювання дій щодо подолання ризиків; - автоматичне попередження про можливі ризики.
Клієнтський сервіс	Комунікації, допомога Обслуговування різних груп клієнтів	- підвищення рівня обслуговування клієнтів; - комунікація з клієнтами 24/7; - зростання лояльності клієнтів.
Безпека (кібербезпека)	Комплексний захист IT-безпеки	- захист від зовнішніх впливів і кібератак; - формування IT-екосистеми
Внутрішні комунікації	Формування внутрішніх корпоративних порталів	- швидка і ефективна взаємодія персоналу; - швидкість прийняття рішень.
Бізнес-процеси	Використання систем для автоматизації бізнес-процесів (ERP-, CRM-, HRM- системи)	- адаптація управлінських рішень до зміни умов; - оперативність прийняття рішень; - виявлення відхилень від плану у реальному режимі часу; - баланс ресурсного забезпечення бізнес-процесів.

Складено на основі [19; 20;21]

Переваги застосуванні ІІІ у бізнесі є однозначними. Однак при цьому слід виділити основні завдання для ефективного його використання. Насамперед, необхідно забезпечити належну якість та обсяги вхідної інформації. Важливим є комплексний підхід до впровадження ІІІ — його слід інтегрувати у систему підприємства на всіх рівнях, а не фрагментарно в окремих підрозділах. Для роботи з інструментами ІІІ працівники мають пройти необхідну підготовку з аспектів технічної та етичної грамотності їх застосування.

Висновки

Використання ІІІ допомагає у вирішенні цілого ряду завдань, забезпечуючи економію часу, оптимальне використання ресурсів, консенсус щодо напрямку дій тощо. Звичайно, для більшості підприємств необхідним є навчитися правильно користуватися можливостями ІІІ. А ці можливості розкривають нові горизонти для удосконалення та росту конкурентоспроможності.

Основними результатами застосування ІІІ у процесах планування та реалізації діяльності, зокрема у маркетингових та логістичних процесах, можна вважати:

1. Використання S&OP дозволяє узгодити стратегію та план її реалізації шляхом злагодження дій, об'єднання зусиль у чотирьох ключових напрямках (попит, пропозиція, фінанси, управління), оптимізації операційної діяльності, раціоналізації використання ресурсів.

2. У маркетингових процесах алгоритми ІІІ дозволяють краще прогнозувати попит, аналізувати клієнтські уподобання, створювати персоналізовані пропозиції, оптимізувати рекламні кампанії та підвищувати рівень задоволення споживачів.

3. У логістичних процесах використання методів роботи із залученням ІІІ сприяє удосконаленню управління запасами, рівнем сервісу, грошовими потоками і прибутковістю в межах логістичних ланцюгів постачання. Водночас має місце оптимізація транспортних маршрутів, скорочення витрат на доставку. Точність прогнозів передбачення попиту дозволяє підтримувати оптимальні запаси, знизити ризики дефіциту чи надлишку товару. Це веде до підвищення рівня обслуговування клієнтів та підвищення стійкості логістичних ланцюгів.

4. ІІІ слугує потужним аналітичним інструментом, який підсилює здатність підприємств приймати обґрунтовані рішення і оперативно діяти та реагувати на зміни. Робота з даними у реальному режимі часу дозволяє виявити ризики, визначити нові можливості та формувати ефективні стратегії, що забезпечує гнучкість бізнесу та швидку адаптацію до змін ринкового середовища. Поєднання маркетингової та логістичної складових із аналітичними можливостями ІІІ забезпечує гнучкість бізнесу, швидку адаптацію до змін ринку та зростання конкурентоспроможності підприємства.

Звичайно, напрям роботи з ІІІ у діяльності компаній потребує подальшого вивчення і удосконалення. Рекомендація у сьогоднішньому моменті часу стосується активізації використання даного інструменту не лише для оптимізації внутрішніх процесів, а й для побудови інтегрованих маркетингово-логістичних стратегій, які дозволять підприємствам посилити позиції на ринку та зміцнити відносини з клієнтами.

Список літератури

1. Beyond the status quo: How generative AI will transform industrial operations (2025), available at: URL: <https://www.weforum.org/stories/2023/06/how-generative-ai-will-transform-industrial-operations/> (дата звернення 16.09.2025).
2. Cao, Zhi and Li, Meng and Pavlou, Paul A., AI in Business Research. *Decision Sciences Journal, Forthcoming*. 2024. Available at: SSRN: URL: <https://ssrn.com/abstract=4897619> or DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4897619> (дата звернення 16.09.2025).
3. Davenport, T. H., & Ronanki, R. Artificial Intelligence for the Real World. *Harvard Business Review (HBR)*. 2018. Available at: URL: <https://www.bizjournals.com/boston/news/2018/01/09/hbr-artificial-intelligence-for-the-real-world.html> (дата звернення 16.09.2025).
4. Могилевська О. Ю., Слободяник А. М., Сідак І. В. Вплив штучного інтелекту на українську і міжнародну економіку. *Київський економічний науковий журнал*, 2023. № 1. С. 121–125. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2023-1-6>.
5. Kolbjornsrud, V., Amico, R., Thomas, R. J. How artificial intelligence will redefine management. *Harvard Business Review Digital Articles*. 2016. Available at: URL: <https://hbr.org/2016/11/how-artificial-intelligence-will-redefine-management>.
6. Погореленко Н. В. Штучний інтелект: сутність, аналіз застосування, перспективи розвитку. *Науковий вісник Херсонського державного університету університету*. 2018. № 32. С. 22–27. URL: <https://ejournal.kspu.edu/index.php/ej/article/view/405/401>.
7. Kietzmann, P., Money, J., Dellaert, B. G. C. Artificial intelligence in marketing: Topic modeling, scientometric analysis, and research agenda. *Journal of Business Research*, 2020. № 120. P. 328–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.03.032>.

8. Фігун А., Петрівський Я., Коханевич Т. Штучний інтелект у маркетингу: можливості впливу та перспективи впровадження. *Вісник Рівненського державного гуманітарного університету*. Серія: Економіка. 2024. № 16. С. 193–199. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8559/2024-4-27>.
9. Іванова І. В., Боровик Т. М., Залозна Т. Г., Руденко А. Ю. Використання штучного інтелекту в маркетингу. *Маркетинг і цифрові технології*, 2023. № 2. С. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-62-160>.
10. du Plessis, M. J., Gerber, R., Goedhals-Gerber, L., van Eeden, J. Revolutionising the Future of Logistics: The Value of Artificial Intelligence, 2024. Available at: SSRN. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4924294>.
11. Кирлик Н. Ю. «Штучний інтелект» та його використання в логістичних процесах. *Актуальні проблеми економік*, 2021. № 243-244. С. 59–66.
12. The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value. Available at: URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-2024?utm_source=chatgpt.com.
13. GenAI Adoption Soars in 2024, Driving ROI Across Industries, IDC Report Finds. Available at: URL: https://pureai.com/articles/2024/11/19/genai-adoption-soars-in-2024.aspx?utm_source=chatgpt.com.
14. Роль штучного інтелекту в бізнесі у 2025 році. URL: https://blog.depositphotos.com/ua/shi-v-biznesi.html?utm_source=chatgpt.com.
15. Україна посідає друге місце за кількістю ІІ-компаній у Центральній та Східній Європі: результати дослідження про штучний інтелект. URL: https://thedigital.gov.ua/news/ukraina-posidae-druge-mistse-za-kilkistyu-shi-kompaniy-u-tsentralniy-ta-skhidniy-evropi-rezultati-doslidzhennya-pro-shtuchniy-intelekt?utm_source=chatgpt.com.
16. Despite AI enthusiasm, Workforce Index reveals workers aren't yet unlocking its benefits. Retrieved from URL: https://slack.com/blog/news/the-workforce-index-june-2024?utm_medium=promo.
17. Europe's jobs at risk: Which sectors are the most threatened by automation? Retrieved from [https://uk.news.yahoo.com/europes-jobs-risk-sectors-most-115330200.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9pc25hc3Uub3JnLnVhLW&guce_referrer_sig=AQAAAGsYaiT85iH9BqprY8NKL625sL15rF6CicyoDoaOeNfiD7sYjEQEhOyKj2uWLUqmzdceBb8yCS4vyFHD9jfwTuRf1AG5vgbe1vPMVhMuXjO83HTILC9NBZuLKNpqUAYlcNrgvAgdGxtdPAmL6Js9YtM3Wkg2AJHBi-kcklqe191 \[in English\]](https://uk.news.yahoo.com/europes-jobs-risk-sectors-most-115330200.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9pc25hc3Uub3JnLnVhLW&guce_referrer_sig=AQAAAGsYaiT85iH9BqprY8NKL625sL15rF6CicyoDoaOeNfiD7sYjEQEhOyKj2uWLUqmzdceBb8yCS4vyFHD9jfwTuRf1AG5vgbe1vPMVhMuXjO83HTILC9NBZuLKNpqUAYlcNrgvAgdGxtdPAmL6Js9YtM3Wkg2AJHBi-kcklqe191 [in English]).
18. Як змусити S&OP працювати з прогнозуванням AI. URL: <https://gmdhsoftware.com/ua/how-to-make-sop-work-with-ai-forecasting/>.
19. Роль AI у Supply Chain: огляд ключових методологій S&OP, S&OE, IBP, DDMRP у поєднанні з AI для оптимізації ланцюга постачання. URL: <https://sdh.smart-it.com/news-post/ai-in-supply-chain/>.
20. Система прогнозування попиту на основі алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. URL: <https://sdh.smart-it.com/df/>.
21. Якимішина Л. Я. Інновації у логістиці: вплив технологій на ефективність та конкурентоспроможність. *Маркетингові та логістичні технології: інновації для забезпечення ефективності бізнес-процесів: колективна монографія* / за ред. к.е.н, доц. Б.А. Оксентюк. Тернопіль: «Бескиди», 2024. С. 88–98. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/46773>.

References

1. Beyond the status quo: How generative AI will transform industrial operations. 2025. Available at: URL: <https://www.weforum.org/stories/2023/06/how-generative-ai-will-transform-industrial-operations/> [in English].
2. Cao, Zhi and Li, Meng and Pavlou, Paul A., AI in Business Research. *Decision Sciences Journal, Forthcoming*. 2024. Available at: SSRN: URL: <https://ssrn.com/abstract=4897619> or DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4897619> [in English].
3. Davenport, T. H., & Ronanki, R. Artificial Intelligence for the Real World. *Harvard Business Review (HBR)*. 2018. Available at: URL: <https://www.bizjournals.com/boston/news/2018/01/09/hbr-artificial-intelligence-for-the-real-world.html> [in English].
4. Mogylevska O. Yu., Slobodyanyk A. M., Sidak I. V. Vplyv shtuchnogo intelektu na ukrayinsku i mizhnarodnu ekonomiku. *Kyivskyj ekonomichnyj naukovyj zhurnal*, 2023. No. 1. P. 121–125. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2023-1-6> [in Ukrainian].

5. Kolbjornsrud, V., Amico, R., Thomas, R. J. How artificial intelligence will redefine management. *Harvard Business Review Digital Articles*. 2016. Available at: URL: <https://hbr.org/2016/11/how-artificial-intelligence-will-redefine-management> [in English].
6. Pogorelenko N. V. Shtuchnyj intelekt: sutnist, analiz zastosuvannya, perspektyvy rozvytku. *Naukovyy visnyk Xersonskogo derzhavnogo universytetu*, 2018. No. 32. P. 22–27. URL: <https://ej.journal.kspu.edu/index.php/ej/article/view/405/401> [in Ukrainian].
7. Kietzmann, P., Money, J., Dellaert, B. G. C. Artificial intelligence in marketing: Topic modeling, scientometric analysis, and research agenda. *Journal of Business Research*. 2020 No. 120. P. 328–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.03.032> [in English].
8. Figun A., Petrivskiy Ya., Koxanovy`ch T. (Shtuchnyj intelekt u marketyngu: mozhlyvosti vplyvu ta perspektyvy vprovadzhennya. Visnyk Rivnenskogo derzhavnogo humanitarnogo universytetu. Seriya: Ekonomika, 2024. No. 16. P. 193–199. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8559/2024-4-27> [in Ukrainian].
9. Ivanova I. V., Borovyk T. M., Zalozna T. G., Rudenko A. Yu. Vykorystannya shtuchnogo intelektu v marketyngu. *Marketyng i cyfrovi texnologiyi*, 2023. No. 2. P. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-62-160> [in Ukrainian].
10. du Plessis, M. J., Gerber, R., Goedhals-Gerber, L., van Eeden, J. Revolutionising the Future of Logistics: The Value of Artificial Intelligence, 2024. Available at: SSRN. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4924294> [in English].
11. Kyrlyk N. Yu. «Shtuchnyj intelekt» ta jogo vykorystannya v logistychnykh procesax. *Aktualni problemy ekonomiky*, 2021. No. 9-10. P. 59–66 [in Ukrainian].
12. The state of AI in early 2024: Gen AI adoption spikes and starts to generate value. Available at: URL: https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-2024?utm_source=chatgpt.com [in English].
13. GenAI Adoption Soars in 2024, Driving ROI Across Industries, IDC Report Finds. Available at: URL: https://pureai.com/articles/2024/11/19/genai-adoption-soars-in-2024.aspx?utm_source=chatgpt.com [in English].
14. Rol shtuchnoho intelektu v biznesi u 2025 rotsi. URL: https://blog.depositphotos.com/ua/shi-v-biznesi.html?utm_source=chatgpt.com [in Ukrainian].
15. Ukraina posidae druhe mistse za kilkistiu ShI-kompanii u Tsentralnii ta Skhidnii Evropi: rezultaty doslidzhennia pro shtuchnyi intelekt. URL: https://thedigital.gov.ua/news/ukraina-posidae-drughe-mistse-za-kilkistyu-shi-kompaniy-u-tsentralniy-ta-skhidniy-evropi-rezultati-doslidzhennya-pro-shtuchnyi-intelekt?utm_source=chatgpt.com [in Ukrainian].
16. Despite AI enthusiasm, Workforce Index reveals workers aren't yet unlocking its benefits. Retrieved from URL: https://slack.com/blog/news/the-workforce-index-june-2024?utm_medium=promo [in English].
17. Europe's jobs at risk: Which sectors are the most threatened by automation? Retrieved from URL: https://uk.news.yahoo.com/europes-jobs-risk-sectors-most-115330200.html?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9pc25hc3Uub3JnLnVhLW&guce_referrer_sig=AQAAAGsYaiT85iH9BqprY8NKL625sL15rF6CicyoDoaOeNfID7sYjEQEhOyKj2uWLUqmzdceBb8yCS4vyFHD9jfwTuRfLAG5vgbe1vPMVhMuXjO83HTILC9NBZuLKNpqUAYlcNrgvAgdGxtsDPAmL6Js9YtM3Wkg2AJHBi-kckIqe19l [in English].
18. Yak zmusyty S&OP pracuvaty z prognozuvanniam AI, available at URL: <https://gmdhsoftware.com/ua/how-to-make-sop-work-with-ai-forecasting/> [in Ukrainian].
19. The Role of AI in Supply Chain: an overview of key S&OP, S&OE, IBP, DDMRP methodologies combined with AI to optimise the supply chain (2025), available at: URL: <https://sdh.smart-it.com/news-post/ai-in-supply-chain/> [in Ukrainian].
20. Demand forecasting system based on machine learning and artificial intelligence algorithms, available at: Retrieved from URL: <https://sdh.smart-it.com/df/> [in Ukrainian].
21. Yakymyshyna L. Ya. Innovaciyi u logistyci: vplyv texnologij na efektyvnist ta konkurentospromozhnist. *Marketyngovi ta logistychni texnologiyi: innovaciyi dlya zabezpechennya efektyvnosti biznes-procesiv: kolektyvna monografiya / za red. k.e.n, docz. B.A. Oksentyuk. Ternopil: «Beskydy», 2024. P. 88–98. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/46773> [in Ukrainian].*

Iryna Haliuk, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0726-1954>

Franko Yezhak, <https://orcid.org/0009-0008-2000-1517>

Lesia Tarayevska, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7301-0881>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

APPLICATION OF AI IN MARKETING FORECASTING AND LOGISTICS ACTIVITIES IN ORDER TO OPTIMISE THE USE OF ENTERPRISE RESOURCES

Abstract

Introduction. AI is actively being implemented in various areas of economic activity, automating routine processes, reducing manual labour and increasing productivity. Current market trends indicate that the growing share of Generation Z and Alpha employees will contribute to even greater automation, as it is the younger generation that positively perceives the replacement of humans with technology in the performance of repetitive tasks.

Problem statement. Despite the active interest of businesses in the possibilities of using artificial intelligence in their activities, companies still lack sufficient knowledge and understanding of how AI can be used — comprehensively or fragmentarily, improving the work of individual departments or the enterprise as a whole, what resources are needed for this and what the results will be, what data is needed for AI to work in a particular company, and how accurate the results of artificial intelligence are, etc. These issues need to be addressed in order to develop an understanding of a systematic approach to the application of artificial intelligence in the activities of an enterprise, starting with marketing forecasting processes and ending with the resulting optimisation of resource use and increased competitiveness of the company.

Purpose. The purpose of the article is to present a comprehensive approach to the application of artificial intelligence in the work of an enterprise, to identify problematic issues in the application of AI and the advantages of its use in all areas of the company's activities in order to optimise the use of its resources and, as a result, gain competitive advantages in the market.

Materials and methods. To achieve the objective of the study, the following methods were used: the method of analysis and synthesis to study literary sources and publications, the comparative method to compare traditional forecasting methods with approaches based on artificial intelligence, and a systematic approach to consider artificial intelligence as a tool that comprehensively affects all areas of the enterprise's activities.

Results. Particular attention is paid to the use of AI in marketing forecasting as a key element of enterprise planning. The advantages of using modern forecasting methods, in particular based on Big Data and machine learning, compared to traditional statistical approaches are described. The practical aspects of applying S&OP to improve the management of production resources, supply and personnel are highlighted. The paper highlights the importance of quality forecasts for operational planning, resource provision, logistics decisions and demand management. Traditional statistical forecasting methods are compared with approaches based on Big Data and machine learning. The latter enable higher accuracy, reveal complex interrelationships and respond quickly to changes in the market environment. Attention is also focused on the need for high-quality information support and qualified personnel for the effective use of these technologies.

It is argued that the use of AI provides flexibility, accuracy, and speed in decision-making and contributes to improving the efficiency of enterprises in areas such as inventory management, customer service, resource optimisation, pricing, and profitability. A comprehensive approach to the implementation of AI to achieve the strategic goals of the enterprise is outlined.

Conclusions. It has been proven that the comprehensive implementation of AI is an effective tool for ensuring flexible management, increasing efficiency, and achieving strategic goals of enterprises in today's dynamic market environment.

Keywords: artificial intelligence, logistics, resource provision, marketing, optimisation, competitiveness, efficiency.

УДК 005.94

Берлоус М. В., <https://orcid.org/0000-0003-2856-9832>Кінаш І. П., д-р екон. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-5391-6560>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД ПІДГОТОВКИ ПРОФЕСІЙНИХ МЕНЕДЖЕРІВ

Анотація

Вступ. Управлінська освіта відіграє важливу роль у сучасному динамічному світі. На управлінську освіту впливає розвиток четвертої промислової революції, економічна інтеграція, демографія, інформаційно-комунікаційні технології, глобальний пошук товарів та послуг, соціальна відповідальність, управління та сталість.

Проблематика. Культура, традиції, особливості освітніх систем є надбанням кожної країни в світі. Першочерговим завданням є їх збереження, а також стимулювання розвитку. Водночас відкриті ринки праці, право громадян на вільне пересування в межах території (зокрема країнами Європейського Союзу) створюють підґрунтя для визначення і формування знань, умінь, навичок управлінців, які б були універсальними для всіх країн. Саме тому, дослідження зарубіжного досвіду підготовки професійних менеджерів в різних країнах обумовило актуальність дослідження

Мета. Метою статті є дослідження особливостей підготовки професійних менеджерів в провідних країнах світу.

Матеріали і методи. Для досягнення поставленої мети були використані різноманітні методи дослідження, включаючи історичний, синтезу, порівняння та узагальнення. Додатково застосовано статистичний метод для аналізу тенденцій підготовки професійних менеджерів; табличний метод для наглядності представлених результатів.

Результати. Встановлено, що структура світової вищої освіти підготовки професійних менеджерів є різноманітною, однак домінують дві тенденції: єдина, коли підготовку професійних менеджерів здійснюють університети чи прирівняні до них заклади (Італія, Іспанія, Австрія, Фінляндія, Швеція); подвійна система з традиційним університетським та не університетським сектором (США, Бельгія, Великобританії, Данії, Ірландії, Нідерландах, Норвегії, Німеччині, Франції, Швейцарії. Престижними вважаються програми підготовки менеджерів МВА. Здійснено аналіз тенденцій підготовки професійних менеджерів за рівнем бакалавр, магістр, доктор філософії.

Висновки. Розглянутий зарубіжний досвід підготовки професійних менеджерів в провідних країнах світу, що враховує історичну хронологію, формалізує етапи розвитку даного процесу, узагальнює та порівнює освітні системи підготовки фахівців вказує на процес трансформації.

Аналіз тенденцій підготовки професійних менеджерів вказує на те, що частка випускників бакалаврського рівня коливалася в діапазоні від 12,5 % до 29 %; випускників магістерського рівня від 10,1 % до 31,9 %; доктора філософії від 2,9 % до 12,8 %. Вивчення досвіду професійної підготовки фахівців менеджерів у розвинених зарубіжних країнах відкриває нові можливості для удосконалення системи підготовки таких фахівців в Україні в умовах її адаптації до умов глобалізації та євроінтеграції.

Ключові слова: бізнес освіта, вища освіта, компетентність, менеджер, навчання, рівні освіти, університет, фахівець.

Вступ

Підготувати професійного менеджера нині є складним завданням вищої освіти. Вища освіта - це та галузь, яка повинна дуже швидко реагувати на зміни. Адже вона завжди прагне визначити чи переосмислити ідеал. Проте освітня галузь складно піддається змінам у часі. Це властиве для освітніх систем різних країн світу [1]. Протягом останніх десятиліть вищі навчальні заклади зазнають тиску, який змушує їх змінюватися та адаптуватися до зовнішніх вимог. Як наслідок, навчання менеджменту та лідерству в університетах зіткнулися зі зростаючою невизначеністю [2].

Управлінська освіта відіграє важливу роль у сучасному динамічному бізнес-середовищі. Сьогоднішній бізнес розвивається в таких п'яти напрямках: економічна інтеграція; демографія; інформаційно-комунікаційні технології; глобальний пошук товарів та послуг; соціальна відповідальність, управління та сталість. Саме ці напрями потенційно впливають на професійну підготовку менеджерів. Тут важливим є врахування стратегії, змісту навчальних програм і перспектив їх впровадження; попиту на ці освітні програми, доступність освітніх послуг; політика країни, регулювання та акредитація [3]. На управлінську освіту впливає і розвиток четвертої промислової революції, яка є великим досягненням для світу. Цифрова трансформація ставить нові виклики перед освітою та ринком праці. вимагає опанування нових навичок та посилення здатності людей адаптуватися до викликів у професійній діяльності [4].

Культура, традиції, особливості освітніх систем є надбанням кожної країни в світі. Першочерговим завданням є їх збереження, а також стимулювання розвитку. Водночас відкриті ринки праці, право громадян на вільне пересування в межах території (зокрема країнами Європейського Союзу) з метою поселення, навчання чи працевлаштування створюють підґрунтя для визначення і формування знань, умінь, навичок управлінців, які б були універсальними для всіх країн. Саме тому, дослідження зарубіжного досвіду підготовки професійних менеджерів в різних країнах обумовило актуальність дослідження.

Аспектам підготовки фахівців присвячено наукові доробки багатьох зарубіжних та вітчизняних учених, зокрема: Невмержицька С., Цалко Т. [5] порівнюють європейські системи вищої освіти; Арсенович Л. [6] пропонує удосконалений механізм формування системи підготовки кадрів; Гарага А., Щербак Л. [7] вивчають міжнародний досвід підготовки фахівців сфери обслуговування; Глушенко К. [8] — досвід підготовки фахівців у сфері державного управління; Шевчук С. [9] у своєму дослідженні робить акцент на доцільності підвищення якості професійної підготовки фахівців у сучасних умовах; на важливості забезпечення якості освіти зроблено акцент у дослідженні Seyfried M., & Pohlenz P. [10]. Дослідження компетенцій необхідних менеджерам, а також підходів до навчання, які можуть успішно розвинути ці компетенції йдеться у публікації Scalberg E. [15], Plantin Ewe, L., Fjelkner Pihl A [11]; Кісь С. у праці [12] доводить пряму взаємозалежність між компетентністю персоналу та ефективністю функціонування підприємства.

Аналіз сучасного наукового дискурсу свідчить про щораз більшу увагу до проблем підготовки фахівців та вивчення зарубіжного досвіду. Науковці розкривають низку важливих аспектів цієї проблематики, серед яких — теоретичні аспекти підготовки фахівців, проблеми професійної підготовки за окремими спеціальностями, піднімають питання якості освіти, векторів розвитку тощо. Однак, незважаючи на наявність значної кількості праць присвячену таким аспектам, залишається ще недостатньо вивченим досвід підготовки професійних менеджерів у зарубіжних країнах.

Метою статті є дослідження особливостей підготовки професійних менеджерів в провідних країнах світу.

Виклад основного матеріалу та отриманих наукових результатів

Найпоширенішими системами освіти професійних менеджерів є американська та європейська система. Розглянемо американську систему підготовки менеджерів. Зазначимо, що США стала першою країною у світі, де започатковано професійну підготовку менеджерів. Основні етапи формування підходів до професійної підготовки менеджерів у США демонструє **рис. 1**.

Підготовка менеджерів в США здійснюється переважно акредитованими школами бізнесу. Бізнес-школи відрізняються між собою добором дисциплін спеціалізації, частковим або вільним вибором додаткових курсів, обсягом навчального навантаження. Отримати ступінь бакалавра (термін навчання 3-4 роки) чи магістра (2 роки, за наявності ступеня бакалавра) можна в коледжі або університеті. Такі заклади США можуть бути як державними, так і приватними. Навчальні програми підготовки бакалаврів менеджменту складаються з програм загальноосвітньої підготовки та бізнес-підготовки. Найбільш престижною програмою професійної підготовки менеджерів у світі є американська програма MBA (Master of Business Administration). Вони є універсальними. Суть програми MBA полягає в тому, щоб забезпечити прикладну бізнес-освіту в мультикультурному навчальному середовищі. Програми MBA спрямовані на покращення здатності студентів приймати рішення, забезпечуючи функціональну основу для бізнесу, одночасно покращуючи їхні аналітичні, комунікаційні та технологічні навички [15].

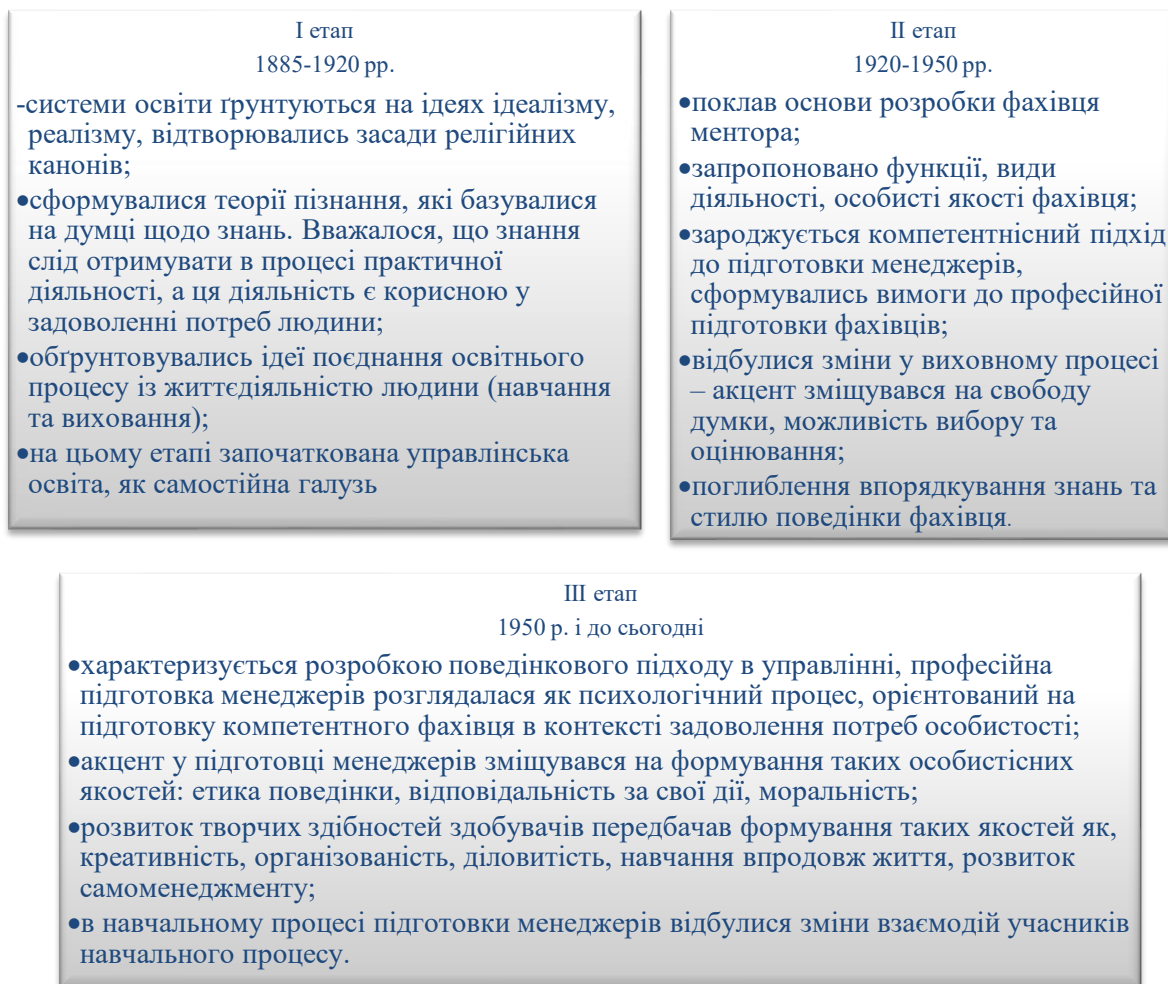


Рисунок 1 — Основні етапи розвитку професійної підготовки менеджерів у США Джерело: складено на основі [13, 14]

Під час підготовки менеджерів акцентують увагу на ретельному доборі змісту навчання, враховують перспективи змін на ринку праці. Навчальні плани і програми формують таким чином, щоб вони складалися із: базових курсів, вибіркових курсів, поглиблених курсів, а також тих, які спрямовані на набуття професійного досвіду (творчі науково-дослідницькі письмові роботи). Проте останніми роками бізнес-школи США з найвищим рейтингом повідомляли про значне зниження кількості заявок на MBA [16]. У своєму останньому опитуванні Асоціація розвитку університетських шкіл бізнесу показала, що кількість акредитованих денних програм MBA в Сполучених Штатах скоротилася на 9 %. У той час, найбільше зростання було зафіксовано в Китаї, де заявки на бізнес-школи зросли в середньому на 29 % [17].

Перейдемо до аспектів розвитку управлінської освіти у країнах Європейського Союзу.

Великобританія. Порівняно зі США професійна підготовка менеджерів в університетах Великобританії розпочалася значно пізніше, ніж у США [18]. Вища освіта Великобританії відповідає унітарній дворівневій системі. Для університетів відсутні офіційні вказівки щодо конкретних назв освітніх програм, тривалості навчання, методів навчання та структури ступенів (залежить від конкретного університету). Так, після завершення навчання в університеті можна одержати: вищий національний диплом (2 роки навчання) або вищий національний сертифікат (1 рік). Більшість освітніх курсів з менеджменту будуються на модульній основі з використанням накопичених балів (кредитів). Звання бакалавра потребує завершення 3-річної або 4-річної програми. Після бакалаврату можна

навчатися на магістерських програмах (тривалістю від 1 до 2 років). Для цього необхідно виконати досить високі академічні вимоги (мати диплом бакалавра з відзнакою) і заявити про добрі знання з предмета спеціалізації. Однак є й винятки. На магістерський рівень можуть прийняти осіб без диплома за перший (бакалаврський) рівень, проте за наявності чималого досвіду роботи з обраного фаху. Здобуття магістерського рівня дає змогу продовжувати навчання в аспірантурі, яка веде до присвоєння кваліфікації доктора філософії (Ph.D.).

Слід зазначити, що британські кваліфікації визнаються як найкращі в світі. Визначальну роль у підготовці фахівців менеджерів у Великобританії відіграє Відкритий університет (створено у 1969 р.). Сучасні системи освіти Англії, Уельсу, Шотландії та Північної Ірландії за структурою подібні, проте відрізняються окремими деталями. До прикладу, щоб одержати ступінь бакалавра, необхідно провчитися 3 (Англія й Уельс) або 4 (Шотландія, Північна Ірландія) роки. Функціонують три ради університетських фондів (Англії, Шотландії та Уельсу), які виконують посередницькі функції між урядом та університетами.

Бельгія Бельгійська системи вищої освіти є «бінарною» [19]. Підготовка професійних менеджерів у закладах вищої освіти Бельгії здійснюється за програмами тривалістю від 2 до 7 років. Вища освіта поділяється на три види: університетська, тривала не університетська, «коротка» неуніверситетська освіта. «Повний» бельгійський університет у своєму складі своїх повинен мати такі п'ять факультетів: медичний, прикладних наук, природничих наук, юридичний, філософії і гуманітарних наук. Всі наявні університети мають значно більше факультетів і надають вищу освіту високої якості з усіма циклами, включаючи докторантуру. Заклади з довгими неуніверситетськими програмами вчать 4 чи (рідко) 5 років і надають ті ж дипломи, що й університети, переважно в інженерних і технологічних фахах. Вони не мають докторантури і не ведуть наукові дослідження так активно, як університети. Здебільшого заклади з коротким терміном навчанням пропонують програми тривалістю 2-4 роки. Це дає право одержати диплом, який не дає права на вступ до докторантури.

Ірландія [20] має давні та славні традиції в галузі освіти, що походять від Середньовіччя, коли ще ченці були в числі головних просвітителів усього західного світу. Ці традиції збереглися дотепер, що дозволяє підтримувати високий рівень освіти відповідно до міжнародних вимог. Специфіка освітньої системи Ірландії полягає в тому, що коледжі та університети в ній утворюють загальний, так званий «третій рівень». Він охоплює університетський сектор, технологічні інститути, педагогічні та приватні коледжі. В цій країні відсутній розподіл на навчальні заклади, що дають вищу освіту або професійну підготовку. Більша частина навчальних закладів «третього рівня» пропонує багатоступеневу систему одержання освіти.

Ірландія посідає перше місце у світі за кількістю навчальних закладів на душу населення. У країні з населенням майже вдвічі меншим, ніж число жителів Лондона, діє сім університетів, 14 технологічних інститутів, десятки приватних коледжів. Система вищої освіти в Ірландії заснована на жорсткій бінарній моделі з чітким розмежуванням між університетським сектором і не університетським. Приватні незалежні коледжі пропонують широкий вибір освітніх програм у сфері бізнесу, менеджменту. Більшість програм ратифікована HETAC, 25 приватних коледжів одержали акредитацію NQA, багато хто з них співпрацюють із університетами та професійними асоціаціями в Ірландії та за кордоном. Наприклад, Дублінська бізнес-школа з кінця 80-х років має тісні зв'язки з Liverpool Business School та Liverpool John Moores University. З 1995 року студенти школи можуть одержати ступінь MBA, що видає Henley Management College [21].

Іспанія — європейська країна з багатовіковою культурою й багатими традиціями, однією з яких є повага до освіти. Система вищої освіти Іспанії [22] відзначається виключною однорідністю, адже аж 98% студентів навчаються в університетах (Centro), поза якими готують лише фахівців з туризму, ремесел та деяких інших видів занять. Більшість із них державні.

Австрія. Підготовка професійних менеджерів у закладах вищої освіти Австрії [23] відбувається в університетах (є державні і приватні), університетських центрах безперервної освіти — Університет Кремс Дунай, педагогічних і професійних академіях та інших закладах університетського типу.

Система вищої освіти *Нідерландів* має особливості в порівнянні з іншими країнами. У країні відсутнє поняття престижних вищих навчальних закладів як, наприклад, в США або Великобританії.

Дипломи всіх нідерландських університетів мають однакову цінність і визнаються іншими країнами. Тому вищі навчальні заклади добирають не за його популярністю, а за тією спеціальністю, яку студент бажає одержати. Навчальний процес в університетах вирізняється гнучкістю та максимальною адаптованістю до вимог ринку праці, що дає змогу швидко пристосовувати програми до потреб підприємств.

Вища освіта *Німеччини* має чітку бінарну структуру, складаючись з університетів та політехнічних інститутів («вищих фахових шкіл»). Основу системи складають університети і прирівняні до них вищі навчальні заклади.

Різноманітні навчальні заклади *Румунії, Словаччини і Словенії* в основному надають три рівні освіти: бакалавр, магістр, доктор філософії. В *Угорщині* така ж система освіти, проте більше розвинена співпраця з університетами інших країн Європи.

Представимо аналітичне дослідження підготовки професійних менеджерів у різних країнах світу (табл. 1).

Бакалавр. Найбільшу частку випускників бакалаврського рівня за напрямом «Бізнес, адміністрування та право» (включає «Бізнес та адміністрування», «Облік і оподаткування», «Фінанси, банківська справа та страхування», «Менеджмент та адміністрування», «Маркетинг і реклама», «Секретарська та офісна робота», «Оптовий та роздрібний продаж») спостерігаємо у таких країнах як: Польща, Німеччина, Японія, Франція, Нідерланди [24, 25, 26]. Частка випускників менеджерів бакалаврського рівня у 2022 р. коливалася в діапазоні від 12,5 % до 29 %. У таких країнах як Австрія та Польща збільшується випуск таких фахівців. Так, якщо у 2017 р. в Австрії частка таких випускників складала 16,3 %, то вже у 2022 р. – 20 %, що на 3,7 % більше. У той же час, у таких країнах як Франція та Латвія спостерігаємо скорочення випуску таких фахівців. Так, у Франції у 2017 р. їх частка складала 30 %, а у 2022 р. – 26,7 %. У Латвії скорочення випускників відбулось, відповідно, з 31,4 % до 24,9 %.

Магістр. Найбільшу частку випускників магістерського рівня за напрямом «Бізнес, адміністрування та право» спостерігаємо в Австрії, Нідерландах, Латвії, Великобританії, Ірландії, Угорщині, Франції (табл. 1). Найменше в Японії (10,1 %), Швеції (14,9 %). Матеріали досліджень свідчать про те, що частка таких випускників у 2022 р. коливалася в діапазоні від 10,1 % до 31,9 %. У таких країнах як Канада, Франція, Італія, Норвегія, Швеція у період з 2017-2022 р.р. спостерігаємо скорочення випуску таких фахівців. У той же ж час у Фінляндії та Угорщині їх частка зростає. Японія єдина країна, де частка випускників менеджерів магістерського рівня практично є незмінною і складає 10 % випускників.

Таблиця 1

Частка випускників менеджерів за освітніми рівнями

Країна	Бакалавр		Магістр		PhD	
	2017	2022	2017	2022	2017	2022
Австрія	16,29	20,03	31,77	32,16	13,55	12,75
Бельгія	21,73	22,79	25,39	24,72	ДВ	5,14
Канада	23,72	22,04	31,28	27,81	4,39	4,72
Чехія	21,57	20,25	ДВ	18,89	9,03	7,67
Данія	20,34	21,97	26,62	26,07	0,00	0,00
Естонія	23,55	22,75	23,99	23,21	5,14	5,20
Фінляндія	19,81	20,33	18,21	20,22	7,39	7,34
Франція	30,05	26,71	32,68	28,82	9,10	4,23
Німеччина	25,31	28,38	20,37	22,23	8,61	8,63
Греція	18,73	19,75	26,45	25,83	4,42	6,09
Угорщина	22,98	21,08	25,40	29,93	ДВ	4,62
Ірландія	22,31	23,96	31,17	29,20	6,57	6,14

Країна	Бакалавр		Магістр		PhD	
	2017	2022	2017	2022	2017	2022
Італія	ДВ	17,94	26,64	20,33	10,83	9,03
Латвія	31,38	24,90	31,54	28,10	21,85	17,49
Нідерланди	26,62	26,13	30,48	30,66	7,90	7,31
Норвегія	18,94	19,37	22,46	18,28	4,03	4,31
Польща	22,85	29,01	27,28	26,19	8,85	9,01
Португалія	21,16	21,89	16,75	21,21	5,34	10,27
Словенія	19,14	17,34	23,21	21,57	9,53	10,18
Іспанія	20,65	20,76	18,20	18,62	7,02	6,43
Швеція	13,53	12,47	16,90	14,92	3,07	2,94
Велика Британія	19,27	21,03	29,00	31,89	6,39	6,49
США	19,76	18,85	27,01	26,83	5,57	6,13

Джерело: складено за даними сайту OECD [27].

Доктор філософії (PhD). Найбільшу частку випусників ступеня доктора філософії за напрямом «Бізнес, адміністрування та право» спостерігаємо в Латвії (17,5), Австрії (12,8), Португалії (10,3) та Словенії (10,2). Найменшу — у Швеції (2,9), Японії (3,7), Франції (4,2). А така країна як Данія не здійснює підготовку таких фахівців.

Висновки

Досліджено зарубіжний досвід підготовки професійних менеджерів. Розкрито американську та європейську системи підготовки фахівців. Визначено, США була першою країною, яка розпочала підготовку таких фахівців. Дослідження дало змогу встановити, що структура світової вищої освіти підготовки професійних менеджерів є надзвичайно різноманітною. Однак домінують дві тенденції:

— унітарна або єдина система, коли підготовка таких фахівців забезпечується університетами чи прирівненими до них закладами. Такі заклади пропонують професійно орієнтовані програми різної тривалості і рівнів. Такою є підготовка професійних менеджерів в Італії, Іспанії, Австрії, Фінляндії, Швеції;

— бінарна або подвійна система з традиційним університетським сектором, що так чи інакше опирається на концепцію університету та на окремий неуніверситетський сектор вищої освіти і має чітко окреслену структуру. Така система освіти притаманна більшості розвинених країн світу, де поряд з університетським сектором існують численні спеціалізовані заклади. Такою є підготовка професійних менеджерів в США, Бельгії, Великобританії, Данії, Ірландії, Нідерландах, Норвегії, Німеччині, Франції, Швейцарії та ін.

Здійснено аналіз тенденцій підготовки професійних менеджерів за рівнем бакалавр, магістр, доктор філософії у розвинених країнах світу. Встановлено, що напрям «Бізнес, адміністрування та право» є дуже поширеним. Частка випусників менеджерів бакалаврського рівня за досліджуваний період коливалася в діапазоні від 12,5 % до 29 %; випусників магістерського рівня від 10,1 % до 31,9 %; доктора філософії від 2,9 % до 12,8 %.

Список літератури

- Colombo, L. A. Civilize the business school: For a civic management education. *Academy of Management Learning & Education*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 132–149.
- Cutter, C. Elite M. B. A. Programs Report Steep Drop in Applications. *The Wall Street Journal*. URL: <https://www.wsj.com/articles/elite-m-b-a-programs-report-steep-drop-in-applications-11571130001> (дата звернення: 17.09.2025).

3. Eustachio, J. H. P. P., Caldana, A. C. F., Leal Filho, W. Sustainability leadership: Conceptual foundations and research landscape. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 415. Art. 137761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137761>.
4. Honcharov, Y. V. Forecasting the innovation of Ukraine's economic development in a global dimension / Y. V. Honcharov, M. V. Dykha, V. Voronina, A. Milka, N. Klymenchukova. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No. 1. P. 174–181. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/174>.
5. Невмержицька С. М., Цалко Т. Р. Сучасні національні європейські системи вищої освіти: загальний огляд та порівняльна характеристика. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Київ: КНУТД, 2018. С. 363–371. URL: https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/10309/1/EOEMIR2018_P363-371.pdf.
6. Арсенович Л. Удосконалення механізмів формування системи підготовки кадрів у сфері кібербезпеки в умовах державно-приватної взаємодії Науковий вісник: *Державне управління*. 2022. № 1(11). С. 6–27.
7. Щербак Л. В. Гарага А. В. Міжнародний досвід підготовки фахівців сфери обслуговування URL: <https://enpuirb.udu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4bc38f4f-f913-464f-af38-c32a24ca8bc5/content>.
8. Глущенко К. С. Зарубіжний досвід підготовки фахівців у сфері державного пр. Інвестиції: практика та досвід. 2016. № 16. С. 85–88. URL: <http://www.investplan.com.ua/pdf/162016/20.pdf>.
9. Шевчук С. С. Вектори підвищення якості професійної підготовки фахівців у сучасних умовах. *Імідж сучасного педагога: електрон. наук. фах. журнал*. № 3 (192). 2020. С. 5–9 URL: <https://surl.lu/oagflv>.
10. Leal Filho, W., Salvia, A. L., Eustachio, J. H. P. P. An overview of the engagement of higher education institutions in the implementation of the UN Sustainable Development Goals. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135694>.
11. Kis, S., Mosora, L., Mosora, Y., Yatsiuk, O., Malynovska, G., Pobihun, S. Personnel certification as a necessary condition for enterprise' staff development. *Management Systems in Production Engineering*. 2020. Vol. 28, No. 22. P. 121–126. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0018>.
12. Parinasan, M. A., Rosal, M. M., Kilag, O. K., Groenewald, C. A., Groenewald, E., Gepitulan, P. M. Public Sector management education in the philippines for 21st century governance: challenges, strategies, and innovation. *International Multidisciplinary Journal of Research for Innovation, Sustainability, and Excellence (IMJRIS)*. 2024. Vol. 1, No. 3. P. 67–72.
13. Commencement 2020 Highlights. URL: <https://www.hbs.edu/news/articles/Pages/commencement-highlights-2020.aspx> (дата звернення: 17.09.2025).
14. 2024 MBA Employment Data Highlights Determination, Talent of Tuck Graduates. URL: <https://tuck.dartmouth.edu/news/articles/2024-mba-employment-data-highlights-determination-talent-of-tuck-graduates> (дата звернення: 17.09.2025).
15. Ramteke, I., Meghe, B. Opportunities and challenges in management education. *International Research Journal of Management Science and Technology*. 2019. Vol. 7, No. 9.
16. Schlegelmilch, B. B. Why Business Schools Need Radical Innovations: Drivers and Development Trajectories. *Journal of Marketing Education*. 2020. Vol. 42, No. 2. P. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.1177/0273475320922285>.
17. Senivongse, C., Bennet, A. University-as-a-service: Designing thinking approach for Bangkok University business innovation curriculum and service development. *Innovations in Education and Teaching International*. 2023. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2253251>.
18. Ramteke, I., Meghe, B. Opportunities and challenges in management education. *International Research Journal of Management Science and Technology*. 2019. Vol. 7, No 9.
19. Shaturaev, J. Economies and management as a result of the fourth industrial revolution: An education perspective. *Indonesian Journal of Educational Research and Technology*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 51–58.

20. Steils, N., Hanine, S. The use of crowdsourcing mechanisms in management learning. *Innovations in Education and Teaching International*. 2023. Vol. 61, No. 5. P. 912–929. DOI: <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2231902>.
21. Stoten, D. W. Reforming the MBA: A survey of elite British Universities. *The Journal of Management Development*. 2018. Vol. 37, No. 5. P. 397–408.
22. Yaqub, Y., Singh, A. K., Dutta, T. An empirical study of factors influencing training transfer in the management training intervention. *Journal of Workplace Learning*. 2021. Vol. 33, No. 5. P. 361–374. DOI: <https://doi.org/10.1108/JWL-02-2020-0034>.
23. Сисоєва С., Кристопчук Т. Освітні системи країн Європейського Союзу: загальна характеристика. Рівне : Овід, 2012. 640 с.
24. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. URL: <https://www.bmbwf.gv.at/Themen/HS-Uni.html> (дата звернення: 17.09.2025).
25. Business Education. Connected. Association to Advance Collegiate Schools of Business. URL: <https://www.aacsb.edu/> (дата звернення: 17.09.2025).
26. Education in Ireland. URL: <https://www.educationinireland.com/en/What-can-I-study-/> (дата звернення: 17.09.2025).
27. OECD. The OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). URL: <https://www.oecd.org/> (дата звернення: 17.09.2025).

References

1. Colombo, L. A. Civilize the business school: For a civic management education. *Academy of Management Learning & Education*. 2023. Vol. 22, No. 1. P. 132–149 [in English].
2. Cutter, C. Elite M. B. A. Programs Report Steep Drop in Applications. *The Wall Street Journal*. URL: <https://www.wsj.com/articles/elite-m-b-a-programs-report-steep-drop-in-applications-11571130001> (date of application: 17.09.2025) [in English].
3. Eustachio, J. H. P. P., Caldana, A. C. F., Leal Filho, W. Sustainability leadership: Conceptual foundations and research landscape. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 415. Art. 137761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137761> [in English].
4. Honcharov, Y. V. Forecasting the innovation of Ukraine's economic development in a global dimension / Y. V. Honcharov, M. V. Dykha, V. Voronina, A. Milka, N. Klymenchukova. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No. 1. P. 174–181. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/174> [in English].
5. Nevmerzhytska S.M., Tsalko T.R. Suchasni natsionalni yevropeiski systemy vyshchoi osvity: zahalnyi ohliad ta porivnialna kharakterystyka. (Modern national European higher education systems: general overview and comparative characteristics.) *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*. Kyiv: KNUITD, 2018. P. 363–371. URL: https://er.knuitd.edu.ua/bitstream/123456789/10309/1/EOEMIR2018_P363-371.pdf [in Ukrainian].
6. Arsenovych L. Udoskonalennia mekhanizmiv formuvannia systemy pidhotovky kadriv u sferi kiberbezpeky v umovakh derzhavno-pryvatnoi vzaiemodii (Improving the mechanisms for forming a cybersecurity training system in the context of public-private interaction). *Naukovyi visnyk: Derzhavne upravlinnia*. 2022. No. 1(11). P. 6–27 [in Ukrainian].
7. Shcherbak L. V. Haraha A. V. Mizhnarodnyi dosvid pidhotovky fakhivtsiv sfery obsluhovuvannia. (International experience in training service professionals). URL: <https://enpuirb.udu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/4bc38f4f-f913-464f-af38-c32a24ca8bc5/content> [in Ukrainian].
8. Hlushchenko K. S. Zarubizhnyi dosvid pidhotovky fakhivtsiv u sferi derzhavnoho pr. (Foreign experience in training specialists in the field of public pr.) *Investytzii: praktyka ta dosvid*. 2016. No. 16. P. 85–88. URL: http://www.investplan.com.ua/pdf/16_2016/20.pdf [in Ukrainian].
9. Shevchuk S. S. Vektory pidvyshchennia yakosti profesiinoi pidhotovky fakhivtsiv u suchasnykh umovakh. (Vectors of improving the quality of professional training of specialists in modern conditions).

Imidzh suchasnoho pedahoha: elektron. nauk. fakh. zhurnal. No. 3 (192). 2020. P. 5–9
URL: <https://surl.luh.ua/oagflv> [in Ukrainian].

10. Leal Filho, W., Salvia, A. L., Eustachio, J. H. P. P. An overview of the engagement of higher education institutions in the implementation of the UN Sustainable Development Goals. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135694> [in English].

11. Kis, S., Mosora, L., Mosora, Y., Yatsiuk, O., Malynovska, G., Pobihun, S. Personnel certification as a necessary condition for enterprise' staff development. *Management Systems in Production Engineering*. 2020. Vol. 28, No 22. P. 121–126. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0018> [in English].

12. Parinasan, M. A., Rosal, M. M., Kilag, O. K., Groenewald, C. A., Groenewald, E., Gepitulan, P. M. Public Sector management education in the philippines for 21st century governance: challenges, strategies, and innovation. *International Multidisciplinary Journal of Research for Innovation, Sustainability, and Excellence (IMJRIS)*. 2024. Vol. 1, No 3. P. 67–72 [in English].

13. Commencement 2020 Highlights. URL: <https://www.hbs.edu/news/articles/Pages/commencement-highlights-2020.aspx> (date of application: 17.09.2025) [in English].

14. 2024 MBA Employment Data Highlights Determination, Talent of Tuck Graduates. URL: <https://tuck.dartmouth.edu/news/articles/2024-mba-employment-data-highlights-determination-talent-of-tuck-graduates> (date of application: 17.09.2025) [in English].

15. Ramteke, I., Meghe, B. Opportunities and challenges in management education. *International Research Journal of Management Science and Technology*. 2019. Vol. 7, No 9 [in English].

16. Schlegelmilch, B. B. Why Business Schools Need Radical Innovations: Drivers and Development Trajectories. *Journal of Marketing Education*. 2020. Vol. 42, No. 2. P. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.1177/0273475320922285> [in English].

17. Senivongse, C., Bennet, A. University-as-a-service: Designing thinking approach for Bangkok University business innovation curriculum and service development. *Innovations in Education and Teaching International*. 2023. P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2253251> [in English].

18. Ramteke, I., Meghe, B. Opportunities and challenges in management education. *International Research Journal of Management Science and Technology*. 2019. Vol. 7, No. 9 [in English].

19. Shaturaev, J. Economics and management as a result of the fourth industrial revolution: An education perspective. *Indonesian Journal of Educational Research and Technology*. 2022. Vol. 3, No. 1. P. 51–58 [in English].

20. Steils, N., Hanine, S. The use of crowdsourcing mechanisms in management learning. *Innovations in Education and Teaching International*. 2023. Vol. 61, No. 5. P. 912–929. DOI: <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2231902> [in English].

21. Stoten, D. W. Reforming the MBA: A survey of elite British Universities. *The Journal of Management Development*. 2018. Vol. 37, No. 5. P. 397–408 [in English].

22. Yaqub, Y., Singh, A. K., Dutta, T. An empirical study of factors influencing training transfer in the management training intervention. *Journal of Workplace Learning*. 2021. Vol. 33, No. 5. P. 361–374. DOI: <https://doi.org/10.1108/JWL-02-2020-0034> [in English].

23. Sysoieva S., Krystopchuk T. Osvitni systemy krain Yevropeiskoho Soiuzu: zahalna kharakterystyka. (Educational systems of the European Union countries: general characteristics.) Rivne : Ovid, 2012. 640 p. [in Ukrainian].

24. Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. URL: <https://www.bmbwf.gv.at/Themen/HS-Uni.html> (дата звернення: 17.09.2025) [in English].

25. Business Education. Connected. Association to Advance Collegiate Schools of Business. URL: <https://www.aacsb.edu/> (дата звернення: 17.09.2025) [in English].

26. Education in Ireland. URL: <https://www.educationinireland.com/en/What-can-I-study-/> (date of application: 17.09.2025) [in English].

27. OECD. The OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). URL: <https://www.oecd.org/> (date of application: 17.09.2025) [in English].

Maria Berlous, <https://orcid.org/0000-0003-2856-9832>

Iryna Kinash, Dr. Sci., Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5391-6560>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

FOREIGN EXPERIENCE IN TRAINING PROFESSIONAL MANAGERS

Abstract

Introduction. Managerial education plays a crucial role in today's dynamic world. It is influenced by the Fourth Industrial Revolution, economic integration, demographics, information and communication technologies, the global search for goods and services, social responsibility, governance, and sustainability.

Problem Statement. The culture, traditions, and unique features of educational systems are the heritage of every country. The primary task is to preserve them while also stimulating their development. At the same time, open labor markets and the right of citizens to free movement (particularly within the European Union) create the basis for defining and forming the knowledge, skills, and abilities of managers that would be universal for all countries. Therefore, studying the foreign experience of professional manager training in various countries determined the relevance of this research.

Purpose. The purpose of the article is to study the features of professional manager training in leading countries of the world.

Materials and Methods. Various research methods were used to achieve this goal, including historical, synthesis, comparison, and generalization. Additionally, statistical methods were applied to analyze trends in professional manager training, and a tabular method was used for the visual representation of the results.

Results. It was found that the structure of global higher education for professional manager training is diverse, but two trends dominate: a single system where professional managers are trained by universities or equivalent institutions (Italy, Spain, Austria, Finland, Sweden); and a dual system with both a traditional university and a non-university sector (USA, Belgium, Great Britain, Denmark, Ireland, Netherlands, Norway, Germany, France, Switzerland). MBA programs are considered prestigious for manager training. An analysis of the trends in professional manager training at the bachelor's, master's, and PhD levels was conducted.

Conclusions. The reviewed foreign experience of professional manager training in leading countries, which considers historical chronology, formalizes the stages of this process's development, and generalizes and compares educational systems, indicates a process of transformation.

The analysis of trends in professional manager training shows that the share of graduates at the bachelor's level ranged from 12.5 % to 29 %; at the master's level from 10.1 % to 31.9 %; and at the PhD level from 2.9 % to 12.8 %. Studying the experience of professional manager training in developed foreign countries opens up new opportunities for improving the system of training such specialists in Ukraine as it adapts to globalization and European integration.

Keywords: manager, specialist, competence, higher education, business education, university, education levels, training.

UDK 624.21

Janusz Sobolewski, Dr. Sci., <https://orcid.org/0009-0000-1383-7449>*Westhem Group, Kyiv, Ukraine; Inora, Gliwice, Poland*

**GERMAN, BRITISH AND POLISH REGULATIONS
FOR THE USE OF GEOSYNTHETICS IN ROAD AND RAILWAYS STRUCTURES
AS SEPARATION & FILTRATION AND AS REINFORCEMENT LAYERS**

Abstract

Introduction. The use of geosynthetic materials in road and railway construction has become widespread in Europe due to their ability to perform separation, filtration, and reinforcement functions in soil and structural systems. A crucial task is the comparison and systematization of regulatory frameworks from different countries to ensure the reliability and durability of transport structures.

Problem Statement. Despite extensive practical experience, challenges remain in unifying requirements for geosynthetic properties, selection criteria depending on soil type, load and installation conditions, as well as in evaluating long-term durability under various environmental influences.

Purpose. The main objective of this study is to analyze and summarize German, British, and Polish regulations on the application of geosynthetics in road and railway construction, and to demonstrate approaches to the selection and calculation of their characteristics.

Materials and Methods. The research is based on a review and comparison of key regulatory documents (EBGEO:2010, BS 8006:2010, ITB 429/2007, RStO 12, RIL 836:2022), analysis of the Geotextile Robustness Classification (GRC) system, and examples of methods for determining foundation bearing capacity, considering creep, durability, and resistance of geosynthetics to mechanical and chemical impacts.

Results. It is shown that the German GRC system effectively combines soil properties and installation conditions for the correct choice of geotextile. The paper characterizes design rules for reinforced embankments, retaining walls, and working platforms according to current standards. The application of geosynthetics ensures compliance with deformation modulus requirements ($E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$) for road and railway structures, reduces the thickness of load-bearing layers, and increases structural reliability.

Conclusions. Geosynthetic systems have proven their effectiveness in transport construction and have become an integral part of modern engineering solutions. Their use enhances the durability and safety of structures, while the analysis of regulations confirms the need for harmonization of requirements across European practice to support further technological development.

Keywords: geosynthetic materials, geotextile, geogrid, road and railway structures, soil separation, filtration, reinforcement, durability, EBGEO, BS 8006, RIL 836, Geotextile Robustness Classification (GRC).

**Legislative basis of the German Regulation System used in the design of geotextile
improved / modified soils or structures**

The legislative basis for contracts in road constructions is the “Verdingungsordnung für Bauleistungen, VOB/A, :2019 VOB/B, :2016 VOB/C:2016”, a framework of German Standards (DIN) for contract provisions for all kind of building and construction. There are 3 documents for earth works in the road construction including the use of geosynthetics, which are supplementing each other:

- ZTVE StB 2017, Additional provisions for technical contracts and guidelines for earthwork in road construction;
 - TL Geok E-StB 2019, Technical terms of delivery of geotextiles and geogrids in earthwork in road construction;
 - M Geok E 2016, Leaflet on the use of geotextiles and geogrids in earthwork in road construction.
- For the use of geosynthetic in railways structures RIL 836 [8] was revised and published in 2022.

The elaboration of regulations for road construction was the task of special working groups of the “Research Association for Roads and Transports (Forschungsgesellschaft für das Straßen-und-Verkehrswesen FGSV)” with members from administrations, contractors, consultants, producers and universities. The

regulations are recognised by the Minister of Transport of Germany and of the German Federal States (Bundesländer) as obligatory for all relevant parties.

Geosynthetics in earth works, Merkblatt M Geok E 2016

The “Leaflet on the use of geosynthetics in earthwork in road construction 2016”, Merkblatt für die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus 2016) have following parts:

- (1) general remarks;
- (2) terms and their definitions;
- (3) technical properties of products (geotextiles, geogrids, geocomposites and geosynthetic barriers);
- (4) fields of applications:
 - separation of different kind of soils, to prevent the penetration of fine particles into coarse grained soils under load but to allow the move of pore water;
 - filter to allow the passage of water and protect the soil structure subjected to hydrodynamic forces;
 - drainage by collecting and transporting of water in the plain of the drainage layer;
 - reinforcement of embankments, slopes and retaining structures against failures;
 - protection of surfaces against erosion;
 - protection of geosynthetic and natural barriers against damage;
 - barrier function: the control of migration of liquid or gas;
- (5) basic conditions for dimensioning of filters and reinforcements;
- (6) test procedures;
- (7) proposals for the selection of products for a given use;
- (8) recommendations for contract design.

Geosynthetics in pavements

In addition, two groups of the FGSV are engaged to work out «Notes on the use of geotextiles under concrete pavements» and «Notes of the use of geosynthetics in asphalt — interlayers».

The use of nonwovens between a cement — or an asphalt bounded base and a concrete pavement plate is now a regular construction principle, after more than 20 years practice experience with test sites on heavy trafficked German Highways. The nonwoven has the function of separator between pavement concrete plate and base, a drainage function to discharge water which seeped through joints to the sides and a bedding function to cushion and absorb dynamic traffic load.

Product specification- selection of geotextiles

Functions and related properties of geosynthetics

To find the product, which fits best in a special application, the designer must define the properties, which the product must have and the technical requirements, which it must be fulfilled. Calculations will be performed where calculations are possible and will be omitted, if there is no calculate basis or where calculations does not fit **Table 1**.

Table 1

Functions and related properties of geosynthetics, [2]

Properties	Separation	Filtration	Drainage	Reinforcement	Protection of soil	Protection of barriers	Barrier function
Mass per unit area	GRC	GRC	-	-	*	class	class
Thickness	-	*	calc	-	*	class	class
Resisting tensile force	GRC	GRC	-	calc	*	calc	class
Elongation	GRC	GRC	*	calc	*	class	class
Creep, creep rupture	*	*	-	calc	-	-	class
Robustness to installation damage	GRC	GRC	GRC	rf/st	***	class	prot
Friction	-	-	-	calc	*	calc	calc ***
Characteristic opening size	class	calc	calc **	-	-	-	-
Water permeability	class	calc	calc	-	-	-	-

End of the table 1

Properties	Separation	Filtration	Drainage	Reinforcement	Protection of soil	Protection of barriers	Barrier function
Resistance to weathering	class	class	class	class	class	class	class
Resistance to chemical ageing	class	class	class	class/rf	class	class	Class
Calc: calculation; class: classification; GRC: Geotextile-Robustness-Classes; rf: reduction factor; st: site test; prot: to be protected; * influence not to quantify; ** filter only; *** installation procedure according to product properties; **** on inclined plains only; not needed.							

Mass per unit area and thickness

Mass per unit area is used for product identification and for definition of minimum values for protection layers. Mass per unit area can be used as index value for a comparison with other products or for the estimation of material efficiency of used polymers.

Thickness under load including compressive creep is important for drains, for protection layers and for barriers. Thickness should be tested at load: 2, 20, 200 kN/m² or project specified.

Geotextile-Robustness-Classification

The German Dr. Eng. W. Wilmers [2] changed the Nordic Classification in 1994 into 5 classes. It was based on push-through-force for nonwovens (EN ISO 12236) and on the tensile strength and elongation of wovens tested, (EN ISO 10319). It was decided In Germany to continue with the Geotextile — Robustness — Classification.

Classification of fill material

To find out the necessary GRC for a given site, the fill material should be assigned in one of the 5 levels, on the base of the diameter and the coarseness/sharpness of aggregates, s. **Table 2**.

Table 2

Classification of cover – material: classes AS1 to AS5, [2]

Classes	Type of cover material
AS 1	without influence of selection
AS 2	round shaped coarse grained or mixed material without stones
AS 3	AS 2 with 5 % ≤ 40 % stones
AS 4	AS 2 with ≥ 40 % stones
AS 5	AS 4 with sharp edged aggregates

Stones— have a diameter $d \leq 63$ mm

When using a fill of sharp edged, crushed aggregates, take the next higher class of cover: AS 3 of rounded aggregates becomes AS 4 with sharp edged aggregates.

When the subsoil is a compacted coarse-grained soil, the class has to be elevated 1 step: than a fill with coarse-grained sharp-edged aggregates on a subbase of a very stiff clay becomes AS 5.

A fill of stones on coarse grained subbase does not need a separation layer. If ever a fill with more than 40 % sharp edged stones as to be placed on a very stiff clay, site tests are proposed.

Classification of impact load during installation, GRK

The load or impact resulting from installation and the art of construction works is divided in 4 impact levels. AB, s. **Table 3**.

Table 3

Classification of impact load during installation, [2]

Classes	Type of impact load on geosynthetic
AB 1	Manual installation and covering no significant stresses resulting from compaction
AB 2	Mechanical installation and compaction without significant stresses resulting from construction vehicles

End of the table 3

Classes	Type of impact load on geosynthetic
AB 3	Mechanical installation and compaction and increasing stress resulting from permitted rutting with depths from 5 to 15 cm
AB 4	Mechanical installation and extreme stresses resulting from permitted rutting with depths of more than 15 cm

Combination of fill and impact load to GRK

The necessary Geotextile-Robustness-Class (GRK) for a given site is the result of a combination of the class of fill material (AS) and of load impact (AB), see Table 4.

Table 4

Determination of the Geotextile-Robustness-Class, [2]

Fill Classes AS	Loading Classes AB				
	AB1	AB2	AB3	AB4	AB 5
AS 1	GRK 3				
AS 2	GRK 3	GRK 3	GRK 3	GRK 4	GRK 5
AS 3	GRK 3	GRK 3	GRK4	GRK 5	(1)
AS 4	GRK 4	GRK 4	GRK 5	(1)	(1)
AS 5	GRK 5	GRK 5	(1)	(1)	(1)

(1) field tests necessary or increasing thickness of the cover layer required

Table 5

Geotextile Robustness Classes for non-woven, [2]

Geotextile Robustness classes GRK (-)	CBR - test puncture resistance req. $FP_{5\%}$	Mass pro unit area Req. $m_{A,5\%}$
3	$\geq 1,5$ kN	≥ 150 g/m ²
4	$\geq 2,5$ kN	≥ 250 g/m ²
5	$\geq 3,5$ kN	≥ 300 g/m ²

Table 6

**Geotextile Robustness Classes for Products: woven and knitted
(foil strips and splice yarns, mostly PP or PEHD), [2]**

Geotextile Robustness classes GRK (-)	Maximal tensile force req. $T_{max, 5\%}$	Mass pro unit area Req. $m_{A,5\%}$
3	≥ 35 kN	≥ 180 g/m ²
4	≥ 45 kN	≥ 220 g/m ²
5	≥ 50 kN	≥ 250 g/m ²

Table 7

Geotextile Robustness Classes for Products from multifilament yarns, [2]

Geotextile Robustness Classes GRK (-)	Maximal tensile force req. $T_{max, 5\%}$	Mass pro unit area Req. $m_{A,5\%}$
3	≥ 150 kN/m	≥ 320 g/m ²
4	≥ 180 kN/m	≥ 400 g/m ²
5	≥ 250 kN/m	≥ 550 g/m ²

This table is valid for products with tensile strength tested longitudinal (MD) and tensile strength 50 kN/m crosswise machine direction (CMD). For the use of products with another tensile strengths field tests will be recommended.

With this classification can be covered by the design the load impact on products by installation procedure and type of fill soils. It means, that the most possible site condition can be reflected. On sites, where the stresses are higher, a field test will be proposed. The simplest way to reduce rutting is to enlarge the thickness of the fill cover layer. In other cases, it can be interesting to combine a geosynthetic reinforcement with the separation layer.

Reinforcement combined with separation fill layer

Sometimes a combination: non-woven & geogrids or simply a high tensile strength woven will be combined with cover soil on the very soft base. In such case the thickness of bearing layer and the required tensile strength of reinforcement should be estimated by the use of static calculations. The soft soil could be tested on 3 ways:

- static loaded plate test in situ with the results: E_{v2} and E_{v1} , E_{v2}/E_{v1} ;
- vane test in situ, with c_u undrained shear strength;
- CBR field or laboratory tests with % of basic value.

These parameters can be correlated, in many publications some of this correlation are presented in the Fig. 1.

sehr schlecht		schlecht		ausreichend		mittelmäßig			gut	Boden
1	2	3	4	5	6	7	8	9		CBR (%)
10	15	20	25	30	35					E_{V2} (MN/m ²)
30	60	90	120	150	180	210	240	270		C_U (kN/m ²)

Figure 1 — Correlation of CBR, E_{v2} , c_u , [HUESKER Collected data]

In Germany all classes paved roads [RStO 12] and all railways classes [RIL 836] should be constructed only, if on the top of the base, foundation level (Planum) $E_{v2} \geq 45$ MN/m². This requirement could be solved by soil exchange & geosynthetic reinforcement. In the first step designer can try to achieve the $E_{v2} \geq 45$ MN/m² only by soil exchange using the nomogram, s. Fig. 2 without reinforcement.

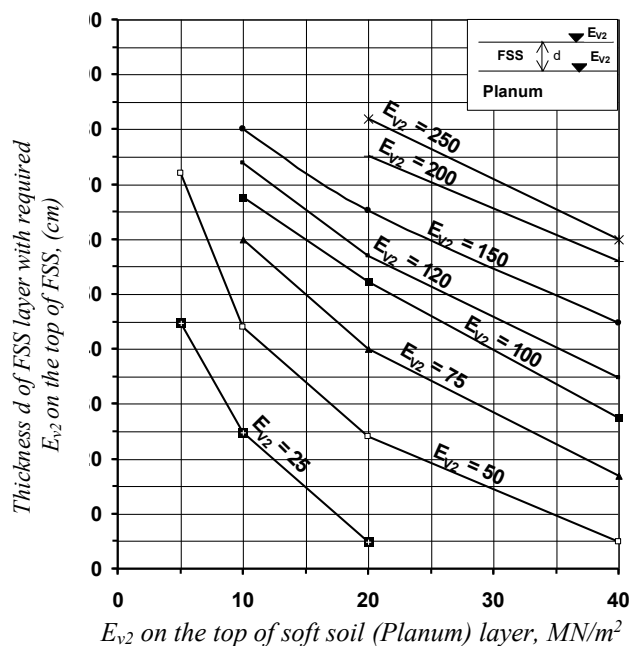


Figure 2 — Thickness of frost and bearing layer (FSS) depend on E_{v2} on the top of soft soil layer (Planum) and the required value E_{v2} on the top of FSS layer (FSS-Frostschuttschicht), Technical University of Munich

The thickness of required cover soil layer could be reduced by the use of reinforcement. For such solution there are many nomograms or software programs published by geosynthetic producers and academic institutes, for example Huesker Synthetic, **Fig. 3**.

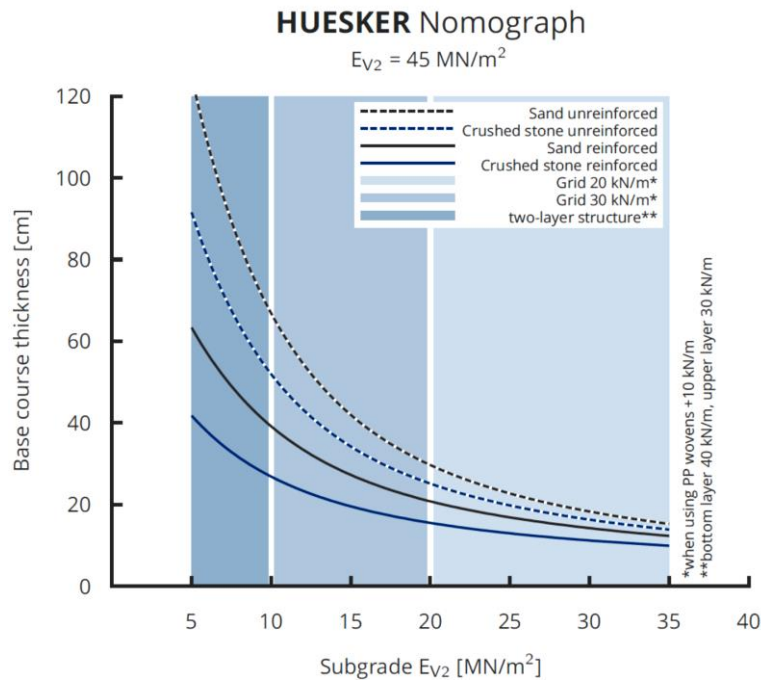
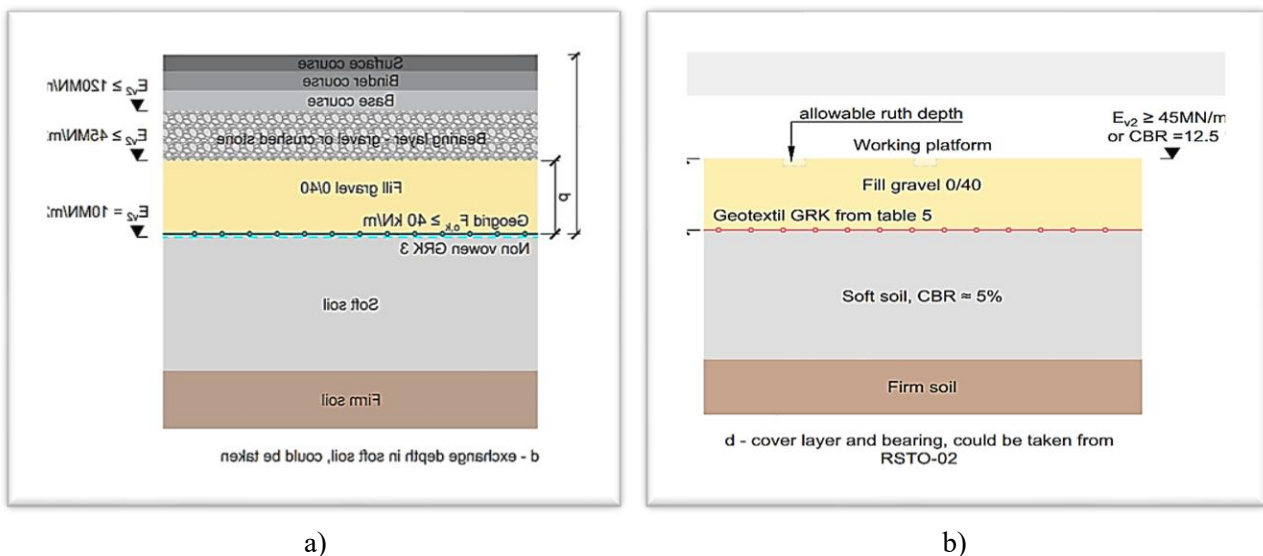


Figure 3 — Huesker design nomogram for estimation of thickness of base course layer d and the ultimate tensile strength of geosynthetic reinforcement for the required $E_{v2} \geq \text{MN/m}^2$ on the top of the bearing layer



- a) paved road structure according to RStO 12, [7];
b) working platform with geotextile GRK.

Figure 4 — Example of application a. paved and b. unpaved road or working platform 3. Strength, elongation and creep: ULS ultimate limit state, determination of the design value of the long-term ultimate tensile strength, F_d

Strength and elongation for the most functions is covered by geotextile-robustness-classes GRC, only for reinforcement there is a calculation, based on data from tensile and creep tests.

In the limit state method, the design value of the long-term tensile strength of geosynthetics for ULS (refers to the point of rupture of the geosynthetic after a given service life t_E) is determined as follows, EBGE0:2010, [6] with designations from ITB /2007 [4]:

$$F_d = \frac{F_{0,k}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma_F}, \quad (1)$$

where $F_{0,k}$ — characteristic value of short-term tensile strength, (UTS – Ultimate Tensile Strength), estimated according to DIN EN ISO 10 319 on 5 min. samples with the width 20 cm tensioned with the standard velocity of 20 % min. It presents the declared value for the confidence level of 95 %;

A_i — material reduction factors:

A_1 — creep;

A_2 — mechanical damage, installation damage for separation, filtration and drainage is covered by GRC. But in case of reinforcements we demand reduction factors based on performance-tests and on-site tests, where the product is tested under the real condition of the given site, concerning fill material and method of installation and compaction;

A_3 — connection or attachment;

A_4 — influence of chemical or biological aggression;

A_5 — influence of cyclic or dynamic loads (ITB 429/2007 [4] omitted this aspect);

γ_F — partial safety factor for material safety depend on load case.

In the form (1) the polish notation of all forces and coefficients was used, s. ITB:2007, [4].

Attention: the above presented reduction factor are not safety factors, they present a reduction of tensile strength depend on the given influent.

Tensile creep and creep rupture of reinforcements is investigated by long-term tests. A short-term index creep test (EN ISO13 431) gives the chance to find out the basic creep properties of a product and to compare the creep-properties with those of a long-term tested products. Compressive creep and creep collapse of drain elements is tested by a short-term index test (EN ISO 13432).

Strength, elongation and creep: SLS Serviceability limit state, determination of the characteristic values of the long-term tensile strength of the reinforcement

In SLS in addition to the conventional requirements such as permissible settlements, permissible deformations in reinforced structures a condition for permissible elongation of the reinforcement is imposed. The values for the permissible elongation of the reinforcement, established through experience, are intended to protect the structure in question from excessive deformation. Depending on tradition and the degree of experience, the permissible elongation values are defined somewhat differently in different countries. In Instruction 429/2007 [4], the ITB relied mainly on the British recommendations of that time, as most of the values postulated there are in line with the withdrawn BS 8006:1995. **Table 8** gives the permissible elongation values for geosynthetic reinforcement as contained in the ITB Instruction 429/2007 [4].

Table 8
Permissible elongations of geosynthetic reinforcement for SLS due to Instruction ITB 429/2007 [4]

Type of structure	Allowable elongation of reinforcement ϵ_{gr} (%)
Retaining walls with a rigid facing without load from another structures	6,0
Embankments and reinforced walls on public roads	5,0
Embankments and reinforced walls on railways	2,0
Bridge abutments t_0 - t_E	2,0
Allowable $\Delta\epsilon$ during exploitation rom t_B to t_E	0,5

From the summary in **Table 8**, it is apparent that according to the ITB Instruction [4] the polish designer generally has one condition to check for elongation and that is the total elongation of the geosynthetic, ε_{gr} . Only in the case of bridge abutments or supports additionally should be taken into account $\Delta\varepsilon$ elongation from the completion of construction t_B to the end of the service life t_E , it does not exceed the value of 0.5 %. However, BS 8006:2010, [5], changes the requirements for SLS postulating only $\Delta\varepsilon$ as follow:

- retaining walls with no permanent loads on the ground: $\Delta\varepsilon \leq 1,0 \%$;
- retaining walls with permanent heavy loads and abutments: $\Delta\varepsilon \leq 0,5 \%$.

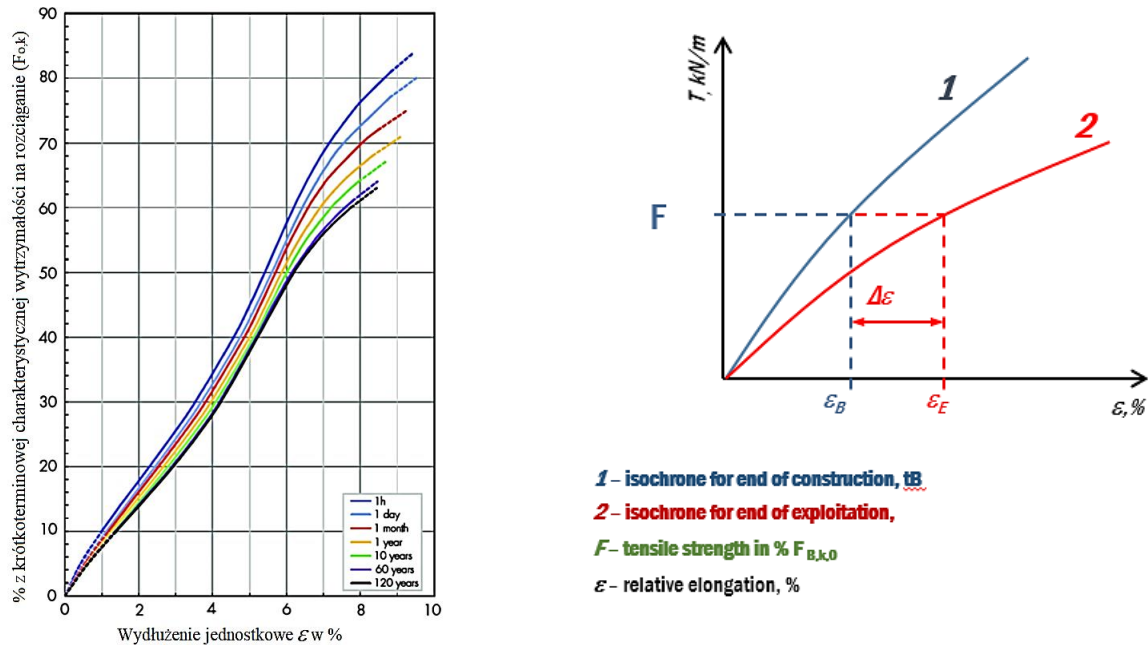


Figure 5 — Isochrones of polyester (PET) geotextiles, Huesker collected data

In order to check this SLS condition, it is necessary to use isochrones for the estimation of the elongation at the time t_B and elongation at the end of service time t_E . For example, **Fig. 5** gives isochrones for polyester (PET) geotextiles. Without isochrones, it is not possible to determine correctly the characteristic long-term strength values for SLS or to prove the suitability of the given product for the requirements specified in the design. Unfortunately, it is very rare that elongation conditions appear in the technical specifications, which means that the given design was reduced only to ULS.

According to ITB Instruction 429/2007 [4] for SLS the characteristic value of the tensile strength is to be determined from the condition of permissible total elongation ε_{gr} :

$$F_k(\varepsilon) = \frac{F_{0,k} \cdot \beta_\varepsilon}{A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5}, \quad (2)$$

where β_ε — permissible load ratio for a given permissible reinforcement elongation ε_{gr} and a given structure lifetime (t_E). Here the author has extended formula (2) to include the influences from A_2 , A_3 , A_4 and A_5 , which are not included in ITB Instruction 429/2007 [20]. The point is that the actual strength in the ground, i.e. after the possible action of all influences, must be taken into account. The value β_ε is determined based on the isochrones for the given product. In the case of abutments or bridge supports according to the ITB Instruction, the characteristic value of the strength of the reinforcement for the condition of not exceeding $\Delta\varepsilon$ is additionally determined:

$$F_k(\Delta\varepsilon) = \frac{F_{0,k} \cdot \beta_{\Delta\varepsilon}}{A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5}, \quad (3)$$

where $\beta_{\Delta\varepsilon}$ — the permissible load ratio of reinforcement loading for a given permissible increment of reinforcement elongation $\Delta\varepsilon$ from the time of construction completion t_B to the end of the service life of the structure t_E , for abutments and walls with significant permanent loading on the crown $\Delta\varepsilon \leq 0.5\%$, otherwise e.g. according to BS 8006:2010 $\Delta\varepsilon \leq 1.0\%$.

Anchorage and bond coefficient of the reinforcement in soil

Friction is necessary for slope protection and for reinforcements. Slopes are simulated by an inclined plane test (EN ISO 12957-2); for reinforcements the results of direct shear tests or pull-out tests are used (EN ISO 12957-1). A reinforcement should be able to overtake the anticipated tensile force, it must be sufficiently anchored in the soil, this is basically analogous to reinforced concrete, so that a lack of anchorage excludes the respective insert from tensile work. As part of the static calculations of a reinforced soil structure, the condition of its anchorage must be checked as the anchorage strength is not always greater than the tensile strength of the reinforcement itself. When carrying out stability calculations, the various possible failure patterns of the structure are checked, which are defined by slip lines or curves. As soon as the slip line or curve crosses the reinforcement, it is assumed that a tensile force can be mobilized in the reinforcement. The maximum value of the force that can be carried by a given insert at a given point of intersection of the slip line with the reinforcement is determined by taking into account:

- tensile strength: F_d in ULS the minimum value from $[F_{\varepsilon,k} \text{ or } F_{\Delta\varepsilon,k}]$ in SLS;
- the anchorage capacity of the reinforcement remaining to the left and right the sliding curve, the design value T_d for ULS and the characteristic value T_k for SLS.

In each case, the minimum value of the above three values is authoritative and entered into the balance of forces or moments in equilibrium for ULS and SLS respectively. Thus, without determining the anchorage capacity of the individual inserts, stability calculations cannot be carried out. It is therefore apparent how important it is to specify the reinforcement-to-ground interlocking ratio assumed in the stability analyses and the specification. In practice, the values of the reinforcement-to-soil ratio are determined based on tests in box apparatus with dimensions of at least 30 x 30 cm, **Fig. 6**. It can be seen, that two cases should be tested:

- sliding of the soil over the product, shear test with one slip surface;
- pull-out modulus with 2 slip planes, because friction exists on both sides of reinforcements.

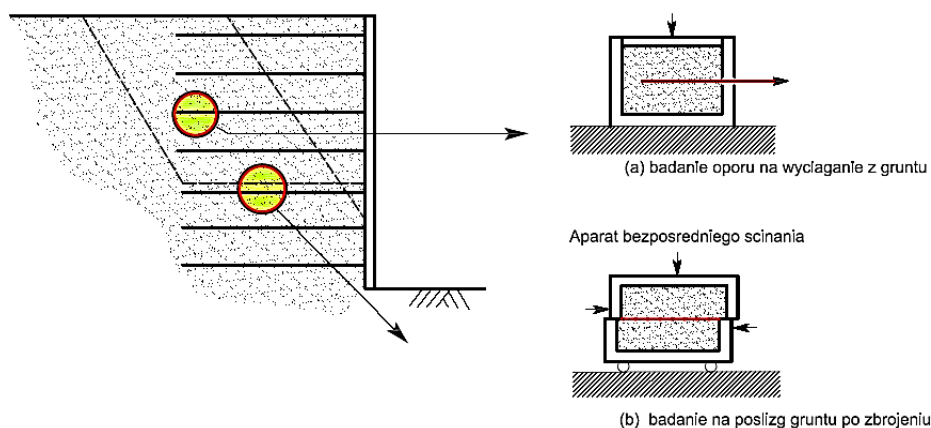


Figure 6 — Testing of interlocking of reinforcement in soil, Huesker collected data

As a result of these tests, the respective values of bond coefficients $\mu_{\varphi,k}$ and $\mu_{c,k}$ for sliding and pull-out could be determined for cohesive «c» and not cohesive soils (φ). This test could be performed in undrained conditions, too. In such case the value of $\mu_{cu,k}$ will be estimated.

Certainly, better interlocking is influenced by the selection of an appropriate geogrid mesh size due to the grain size of the soil. As mentioned above, opinions are divided here, as it is in difficult to determine

diameter of the grain that determines the best interlocking. Regarding the optimum mesh size of a geogrid, two recommendations are known:

— Koerner (USA) [1]:

$$a \geq 3.5 \cdot d_{50}, \quad (4)$$

— EBGE0:1997:

$$0.6 \cdot a \geq d_{80}, \quad (5)$$

where d_{50} and d_{80} — the equivalent diameter of the grains in mm which, together with the smaller fractions, account for 50 % and 80 % of the dry mass of the soil, respectively. In this case, it is the grain size of the soil in contact with the geosynthetic. By using both criteria at the same time, it can be expected that a correct interlocking of the soil with the reinforcement will be achieved. However, for larger structures, the authors recommend determining the interlocking indices by performing tests in large-scale box apparatus or in the field conditions.

According to Instruction 429/2007 [4], the anchorage capacity for pull-out is determined as follows:

$$\text{for ULS:} \quad T_d = 2 \cdot \sigma_k \cdot L_B \cdot \mu_k \cdot \frac{\tan(\varphi_k)}{\gamma_{\varphi}}, \quad (6)$$

$$\text{for SLS} \quad T_k = 2 \cdot \sigma_k \cdot L_B \cdot \mu_k \cdot \tan(\varphi_k), \quad (7)$$

where σ_k — characteristic value of the stress normal to the reinforcement;

L_B — anchor length of the insert;

μ_k — characteristic value of bond coefficient in friction soil;

γ_{φ} — partial safety factor for internal soil friction in ULS.

The above formulae are valid for non-cohesive soils (because there is no component for adhesion) and for pull-out of the reinforcement from the non-cohesive soil, because the number 2 indicates the number of slip surfaces that resist the pull-out of the insert.

Filter design

Mechanic filter criteria to prevent blocking and clogging: the hydraulic conditions and the soils are investigated and 3 cases are distinguished (Characteristic opening size measured by EN ISO 12956):

Case 1: water quantity low, hydraulic gradient low, water flow only from one side:

$0,06 \text{ mm} \leq O_{90} \leq 0,16 \text{ mm}$.

Case 2: high water flow from one side, or changing direction of water flow:

Cohesive soils: $0,06 \text{ mm} \leq O_{90} \leq 0,16 \text{ mm}$;

Non cohesive silt: $0,06 \text{ mm} \leq O_{90} \leq 0,08 \text{ mm}$;

Running sand: $0,06 \text{ mm} \leq O_{90} \leq 0,10 \text{ mm}$;

Sand coarse grained: $0,10 \text{ mm} \leq O_{90} \leq 0,60 \text{ mm}$.

The water permeability of the filter is assumed to be sufficient, when O_{90} is chosen in the upper field of the possible range and when $v_{50} \geq 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ (EN ISO 11058).

Case 3: high hydraulic impact or/and soils unstable against inner erosion or suffusion: the situation must be investigated by a specialist. The dimensioning of the filter can be made by a calculations or by performance tests.

Durability of geosynthetics

Durability is necessary for design life:

- separator for a support during construction works 1/2 to 1 year;
- separator with a permanent importance 80 – 120 years;
- filter in a drainage easy reparable: 10 to 25 years;
- filter in a drainage under a structure: 80 – 120 years;

- reinforcement under an embankment against failure: time for consolidation, typically 1 to 5 years but in special cases for example foundation on piles 80 – 120 years;
- reinforcement of steep slopes or retaining structures for long-term: 80 – 120 years.

Resistance to weathering of geosynthetics

Resistance to weathering is classified by the results of weathering tests in the Global-UV-tester (UV-rays and eventually washing out of protective inhibitors) (ENV 12224). Annex B of EN 13249 gives limits for the maximum exposure time from placing the product to covering. There is a difference made between application where a long-term strength is a significant parameter. German regulation requires higher level for all cases.

Table 9

Classification of weather resistance (ENV 12224) and maximum exposure time (EN 13249)

Remaining tensile strength	For all applications max. exposure time during installation
< 60 %	1 day
60 – 80 %	2 weeks
> 80 %	1 – 4 months

Resistance to chemical ageing of geosynthetics

Resistance to chemical ageing: follow EN 13249 Annex B (normative) durability aspects:

- for PA, PE and PP the oxidative,
- for PA and PET the hydrolytic resistance has to be observed and in case of permanent applications to be improved, when the product is decisive for the life of the structure.

In long-term constructions PET must not be used in contact with soils with $\text{pH} \geq 9,5$. In all cases PET is not to be used in direct contact to cement or concrete and to soils, mixed with cement or lime. The investigation of existing long-time installations is a very good way to characterize the long-term stability of a product. For constructions, where the fabric is crucial for safety, it is recommended to install test specimen under realistic conditions and test them periodically after several years, to see if there is a change with time and to have the opportunity to act early, if ever a lack of safety will be developed.

Geosynthetics in road and railway structures

For unpaved road the Method of Jaecklin&Floss [1], will be often used, this method is an empirical approach based on 88 French roads and has a solid experimental basis. The main parameters used in input are as follows:

- R, allowable rut depth (assumed by designer: 3 cm, 5 cm, 10 cm or 15 cm);
- CBR of subgrade;
- V, traffic coefficient for number of lorries passages with the mass up to 40 t (4 axles) during use time of the unpaved road, up to 100.000 t during use time;
- K, quality of bearing layer covering reinforcement layer (trafficked layer);
- D, thickness of bearing layer;
- G, coefficient connected to the tensile strength and elongation of geosynthetics.

As results of the analysed case: r — tensile strength at break and ε_f elongation at break point of geosynthetic. Based on calculated data the type of reinforcement can be finally assumed.

Working platforms trafficked on soft subgrade with undrained strength, $c_u \geq 20 \text{ kN/m}^2$ can be designed by the use of guide Working platform published by BRE in 2004, [3]. The input parameter are:

- undrained shear strength of subgrade, $c_{u,k}$;
- angel of internal friction of platform, ϕ'_k ;
- unit weight of subgrade and platform, γ'_k, γ'_p ;
- dimensions of tracks, W-width, L-length;
- tensile strength of reinforcement, $T_d = F_{o,k} / 2$ or tensile force at 5 % elongation;
- load on the track, q_{1d}, q_{2d} depend of load case 1 or 2, in kNm_2 .

The resisting force R_d (reaction from soft soil and reinforced platform) will be calculated taking into account: the puncture resistance of platform material, the bearing force of soft soil and the tensile strength $2 \cdot T_d$. It should be proven, than both $(q_{1d}$ or/and $q_{2d}) \leq R_d$. Additionally, some check should be made concerning the thickness of working platform and the bearing capacity only of working platform material.

In RIL 836, 2022 [8] similar applications of geotextiles in the bearing structure of railway tracks could be found. Especially the improvement of foundation layer up to $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ is one of the most practical cases.

Summary

A world without geosynthetics is no longer conceivable today. In the last 50 years the industry has successfully developed many products, many regulations and design method were invented for practically each main application. Geosynthetic systems have proven themselves and today they are not to replace from daily earth works. Reinforced retaining walls, reinforced foundation system in railway and road structures, reinforced embankments on piles and columns, erosion protection systems and much more applications implemented in practice confirm the effectivity of geosynthetics in earth structures.

References

1. Jaecklin, F., P., (1986), Bemessung von Geotextilien im Strassenbau, Regressionberechnung von Erfahrungswerten, Schweizer Ingenieur, 40/86, P. 990–994 [in English].
2. Wilmers, W., (2002) The revised german regulations for the use of geosynthetics in road construction, Geosynthetics-7th ICG, P. 1401–1404 [in English].
3. BRE (2004), Working platforms for traced plant: good practice guide to the design, installation, maintance and repair of ground supported working platform [in English].
4. ITB (2007), Instrukcje, Wytyczne, Poradniki, 429/2007, Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami [in English].
5. BS 8006:2010, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills, BSI 2010 [in English].
6. EBGeo:2010, Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnungen von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. Verlag Ernst & Sohn, Berlin [in English].
7. RStO 12 (2012), Guidelines for standardisation of pavement structures of traffic areas, FGSV, Translation, 2015 [in English].
8. RIL 836:2022, Erdbauwerke planen, bauen und instand halten, Deutsche Bahn AG [in English].
9. Sobolewski, J., (2024), Some recommendations for the design and construction of geosynthetic reinforced embankments, bridge abutments and retaining walls based on EC7, IV Міжнародна науково-практична конференція імені П.М. Коваля «Відновлення та розвиток мостів: виклики, тренди, новації», 4 – 6 грудня, Львів [in English].

Соболевський Януш, д-р техн. наук, <https://orcid.org/0009-0000-1383-7449>

ТОВ «Вестхем Груп», Київ, Україна; ТОВ Inora, Глівіце, Польща

НІМЕЦЬКІ, БРИТАНСЬКІ ТА ПОЛЬСЬКІ НОРМИ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОСИНТЕТИКІВ У ДОРОЖНІХ ТА ЗАЛІЗНИЧНИХ СПОРУДАХ ЯК РОЗДІЛЮВАЛЬНИХ І ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ ШАРІВ, А ТАКОЖ ШАРІВ АРМУВАННЯ

Анотація

Вступ. Використання геосинтетичних матеріалів у дорожньому та залізничному будівництві набуло широкого поширення в країнах Європи завдяки їх здатності виконувати функції розділення, фільтрації та армування основ і конструкцій. Важливим є порівняння та систематизація нормативної бази різних держав для забезпечення надійності та довговічності транспортних споруд.

Проблематика. Попри значний практичний досвід, залишаються актуальними питання уніфікації вимог до властивостей геосинтетиків, критеріїв їх добору залежно від типу ґрунтів, навантаження та умов монтажу, а також оцінки довговічності матеріалів у різних середовищах.

Мета. Основною метою роботи є аналіз та узагальнення німецьких, британських і польських нормативів щодо застосування геосинтетичних матеріалів у дорожньому та залізничному будівництві, а також демонстрація підходів до вибору та розрахунку їхніх характеристик.

Матеріали й методи. У дослідженні використано огляд та порівняння ключових нормативних документів (EBGEO:2010, BS 8006:2010, ITB 429/2007, RStO 12, RIL 836:2022), аналіз системи Geotextile Robustness Classification (GRC), а також приклади методик визначення несучої здатності основи з урахуванням повзучості, довговічності та стійкості геосинтетиків до механічних і хімічних впливів.

Результати. Показано, що німецька система GRC дозволяє поєднати властивості ґрунтів та умови монтажу для коректного вибору геотекстилю. Охарактеризовано правила розрахунку армування насипів, підпірних стін і робочих платформ відповідно до сучасних норм. Зазначено, що застосування геосинтетиків забезпечує досягнення вимог щодо модулів деформації ($E_{v2} \geq 45 \text{ МН/м}^2$) для дорожніх та залізничних конструкцій, скорочує товщину несучих шарів та підвищує надійність споруд.

Висновки. Геосинтетичні системи довели свою ефективність у транспортному будівництві й стали невід'ємним елементом сучасних інженерних рішень. Їх застосування дозволяє підвищити довговічність і безпеку споруд, а аналіз нормативної бази підтверджує необхідність гармонізації вимог у європейській практиці для подальшого розвитку технологій.

Ключові слова: геосинтетичні матеріали; геотекстиль; георешітка; дорожні та залізничні конструкції; розділення ґрунтів; фільтрація; армування; довговічність; EBGEO; BS 8006; RIL 836; класифікація міцності GRC.

УДК 691.16

Цинка А. О., канд. техн. наук, <http://orcid.org/0000-0002-0357-2325>Копинець І. В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-0908-4795>Желтобрюх А. Д., д-р філос. з будівництва та цивільної інженерії, <https://orcid.org/0000-0003-0764-8793>Соколов О. В., д-р філос. з будівництва та цивільної інженерії, <https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>Соколова О. Б., <https://orcid.org/0000-0003-4202-8661>Юнак А. Л., <https://orcid.org/0000-0002-5294-5554>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»),
м. Київ, Україна

ПОРІВНЯННЯ ВІТЧИЗНЯНИХ І ЄВРОПЕЙСЬКИХ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАННЯ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНІВ

Анотація

Вступ. Гармонізація національної нормативної бази з європейською є ключовим завданням для дорожньої галузі України. Якість та довговічність асфальтобетонних шарів безпосередньо залежать від адекватності методів випробування, застосованих для проектування складів асфальтобетонних сумішей та контролю якості. В Україні ці методи встановлено ДСТУ Б В.2.7-319:2016, тоді як в Європейському Союзі діє комплексна система стандартів серії EN 12697.

Проблематика. Аналіз показує, що методи, встановлені в ДСТУ Б В.2.7-319:2016, містять низку концептуальних та процедурних відмінностей від європейських підходів. Це стосується як методів лабораторного ущільнення, що не відтворюють реальних умов роботи котків, так і методів визначення складу та об'ємних характеристик, які містять внутрішні методологічні суперечності та не враховують особливості сучасних матеріалів. Такі розбіжності ставлять під сумнів порівнюваність результатів та ефективність системи контролю якості.

Мета. Провести детальний порівняльний аналіз ключових методів випробування згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 та відповідними стандартами серії EN 12697, щоб науково обґрунтувати доцільність та напрямки модернізації вітчизняної нормативної бази.

Методи. Проведено порівняльний аналіз нормативних документів, що включає порівняння принципів, процедур, обладнання та критеріїв оцінки для методів лабораторного ущільнення, визначення складу, об'ємних характеристик та водостійкості асфальтобетону.

Результати. Встановлено, що вітчизняний метод ущільнення пресуванням є деструктивним для мінерального каркасу, на відміну від європейських методів (гіраторного, вальцевого), що краще імітують реальні умови. Виявлено критичну методологічну помилку в національному методі визначення вмісту в'язучого випалюванням — відсутність процедури калібрування на втрату маси заповнювача. Показано внутрішню суперечність у ДСТУ Б В.2.7-319:2016 під час визначення найбільшої густини (використання понять «дійсної» та «очевидної» густини для розрахункового та експериментального методів відповідно). Продемонстровано, що процедура визначення водостійкості згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 є менш жорсткою та репрезентативною порівняно з методом прискореного кондиціонування згідно з ДСТУ EN 12697-12:2018.

Висновки. Аналіз доводить, що подальше використання низки методів згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 є недоцільним через їхні методологічні недоліки, які можуть призводити до отримання некоректних даних та помилкових рішень. Для забезпечення об'єктивного контролю якості, підвищення довговічності асфальтобетонних шарів та повної інтеграції в європейський технічний простір обґрунтовано необхідність системного та повноцінного переходу на комплекс стандартів серії EN 12697.

Ключові слова: асфальтобетон, асфальтобетонна суміш, методи випробування, гармонізація стандартів, ДСТУ Б В.2.7-319:2016, EN 12697, лабораторне ущільнення, гіраторний ущільнювач, об'ємні властивості, водостійкість.

Вступ

Інтеграція України в європейський технічний простір висуває першочергові завдання щодо гармонізації національної нормативної бази, особливо в такій стратегічно важливій галузі, як дорожнє будівництво. Якість та довговічність нежорстких дорожніх одягів, що є основою транспортної інфраструктури, безпосередньо залежать від адекватності та актуальності методів випробування, які застосовують на етапах проектування складу асфальтобетонної суміші, її вироблення та контролю якості виконаних дорожніх робіт.

В Україні основним документом, у якому унормовано відповідні методи випробування, є ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1]. Водночас у країнах Європейського Союзу діє комплексна система стандартів серії EN 12697 та EN 13108, у якій відображено сучасні підходи до оцінювання властивостей бітумомінеральних сумішей в цілому.

Метою цієї статті є проведення детального порівняльного аналізу ключових методів випробування, унормованих у ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], з відповідними методами випробування згідно з європейськими стандартами. На основі цього аналізу сформульовано рекомендації щодо повноцінного переходу на європейські стандарти для підвищення об'єктивності контролювання та забезпечення належної довговічності нежорстких дорожніх одягів в Україні.

У роботі послідовно розглянуто та порівняно підходи до визначення об'ємних характеристик (об'ємної (середньої) та найбільшої (дійсної) густини, вмісту повітряних пор (залишкової пористості) та вмісту пор у мінеральному заповнювачі (пористості мінеральної частини) та атмосферостійкості асфальтобетону, а також проаналізовано фундаментальні відмінності в методах лабораторного ущільнення зразків (пресування, ударне, вібраційне, гіраторне та укочування), які є основою для визначення показників властивостей асфальтобетону.

Основна частина

Аналіз та порівняння методів лабораторного ущільнення асфальтобетонних сумішей

Якість та довговічність шарів асфальтобетону напряду залежать від того, наскільки точно лабораторні випробування здатні спрогнозувати його експлуатаційні характеристики. Ключовим етапом у цьому процесі є підготування зразків асфальтобетону, тобто ущільнення асфальтобетонної суміші в лабораторних умовах. Ця процедура має якомога точніше відтворювати процес ущільнення асфальтобетонної суміші дорожніми котками, оскільки саме від неї залежить формування структури та, як наслідок, усіх показників властивостей асфальтобетону.

В українській практиці донедавна основним методом було статичне пресування, унормоване ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1]. Водночас європейська система, представлена серією стандартів EN 12697, пропонує низку методів, заснованих на різних фізичних принципах.

Метод статичного пресування згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1]

Цим методом передбачено ущільнення зразка у формі докладанням значного статичного тиску — 30 МПа або 40 МПа, що залежить від вмісту щебеню в асфальтобетонній суміші, — впродовж трьох хвилин. Основний недолік цього підходу полягає в тому, що він імітує лише вертикальне стиснення, повністю ігноруючи динамічні та зсувні зусилля, які є визначальними під час роботи котків. Екстремально високий застосовуваний тиск, часто призводить до дроблення зерен щебеню, спотворюючи таким чином зерновий склад та структуру матеріалу. Це створює зразок асфальтобетону, властивості якого можуть не відповідати властивостям асфальтобетону в реальному конструктивному шарі. Додатково потрібно звернути увагу на швидкість навантажування, яка становить 5 мм/хв, адже асфальтобетонна суміш є матеріалом, поведінка якого критично залежить від швидкості прикладання навантаги. За відносно повільного стиснення бітумне в'язке має достатньо часу для в'язкого плину, зерна мінерального матеріалу встигають змінювати положення та поступово займати щільніше положення. Структура ніби «пливе» і поступово ущільнюється, доки зерна не впираються одне в одне, створюючи заклинений каркас. Після формування каркасу навантажування продовжують, доводячи напругу до екстремальних (30 – 40) МПа. Цей тиск прикладають вже до заклиненої структури, яка не має подальшої можливості для ущільнення, що може призводити до дроблення найслабших зерен та руйнування контактів між ними.

Європейські методи ущільнення

Європейська практика пропонує диференційований підхід, використовуючи декілька стандартизованих методів ущільнення, кожен з яких має свою сферу застосування.

Ударне ущільнення згідно з ДСТУ EN 12697-30:2018 [2] або ущільнення за Маршалом полягає у застосуванні визначеної кількості ударів падаючого вантажу до зразка. Він моделює динамічний аспект навантажування, проте, як і пресування, не відтворює зсувних зусиль та несе в собі ризик дроблення кам'яного матеріалу. Однак, цей метод ущільнення досі можна вважати найбільш використовуваним в країнах Європейського Союзу.

Гіраторне ущільнення згідно з ДСТУ EN 12697-31:2019 [3] на сьогодні можна вважати найбільш прогресивним та визнаним у світі методом лабораторного ущільнення асфальтобетонних сумішей. Гіраторний ущільнювач поєднує помірний вертикальний тиск із одночасним обертальним рухом форми під заданим кутом. Такий підхід найкраще імітує спільну дію ваги та зсувних зусиль котка, що дозволяє зернам мінерального матеріалу оптимально переорієнтуватися та сформувати щільний, стійкий каркас. Важливою перевагою є можливість отримання кривої ущільнення в реальному часі, що є потужним інструментом для аналізу ущільнюваності асфальтобетонної суміші.

Вальцеве ущільнення згідно з ДСТУ EN 12697-33:2022 [4] полягає в укатковуванні великих зразків-плит з використанням лабораторного котка або його сектору, що є прямим імітуванням польового ущільнення. З отриманих плит вирізають зразки для подальшого випробування, зокрема на стійкість до колієутворення. Цікаво, що аналогічний підхід описаний і в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], що свідчить про розуміння його переваг вітчизняними фахівцями. Однак на практиці такий підхід все ж таки не набув поширення.

У європейській системі також є стандарт на статичне ущільнення, який прийнято в Україні як ДСТУ EN 12697-56:2024 [5]. Однак порівняння його параметрів з методом згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] демонструє фундаментальну розбіжність у підходах:

- 1) тиск ущільнення: 5 МПа згідно з ДСТУ EN 12697-56:2024 [5] проти (30 – 40) МПа згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1];
- 2) тривалість: 5 хв згідно з ДСТУ EN 12697-56:2024 [5] проти 3 хв згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1].

Це свідчить, що європейський метод статичного ущільнення спрямований на обережне виготовлення зразка асфальтобетону без руйнування його структури, тоді як вітчизняний метод є доволі агресивним та деструктивним.

Варто зазначити, що ключовим документом для первинного затвердження складу асфальтобетонної суміші ДСТУ EN 13108-20:2018 [6] унормовано використання ударного, гіраторного, вібраційного та вальцевого ущільнювачів. Метод статичного пресування відсутній у цьому переліку, що фактично визначає його як непридатний для сучасного проектування відповідних асфальтобетонних сумішей в європейській практиці.

Аналіз методів лабораторного ущільнення асфальтобетонних сумішей виявляє суттєві концептуальні відмінності між підходами, викладеними в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], та в європейських стандартах серії EN 12697. Метод статичного пресування за надвисокого тиску не відтворює реальних умов роботи матеріалу, може призводити до руйнування його структури та, як наслідок, до отримання спотворених даних.

Для забезпечення об'єктивної оцінки властивостей асфальтобетону та гармонізації з європейською практикою єдиним доцільним шляхом є повний перехід на методи ущільнення, регламентовані європейськими стандартами, які вже впроваджені в Україні як національні стандарти. Пріоритетним під час проектування складів асфальтобетонних сумішей має стати використання гіраторного ущільнювача як методу, що найбільш точно моделює процеси, які відбуваються під час польового ущільнення.

Аналіз методів визначення складу асфальтобетонних сумішей

Точне визначення вмісту бітумного в'язучого та зернового складу мінеральної частини є найважливішою частиною системи контролю якості асфальтобетонних сумішей. Ці параметри безпосередньо впливають на всі експлуатаційні характеристики асфальтобетонних шарів, включаючи міцність, стійкість до деформацій та довговічність.

Основний метод визначення складу, описаний в 31.1 ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] та ДСТУ EN 12697-1:2022 [7], заснований на екстрагуванні (вилученні) бітуму з використанням розчинника з подальшим просіюванням мінерального матеріалу. Однак структура та філософія стандартів кардинально відрізняються.

ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] описує один конкретний метод екстрагування, заснований на використанні апарату Сокслета. Стандарт пропонує лінійну, жорстко регламентовану процедуру без альтернатив.

ДСТУ EN 12697-1:2022 [7] є рамковим стандартом. У ньому встановлено загальні принципи випробування, а в обов'язковому додатку В наведено цілий перелік різноманітного обладнання та деталізованих процедур, які вважають рівноцінними. До них належать:

- 1) гарячі екстрактори;
- 2) апарат Сокслета;
- 3) ротаційна машина з пляшками;
- 4) центрифугові екстрактори;
- 5) сучасні автоматизовані екстрактори.

Ця відмінність є ключовою: європейський стандарт є значно гнучкішим і більш комплексним. Він не обмежує лабораторію одним типом обладнання, а стандартизує цілу низку сучасних, зокрема автоматизованих та більш швидких, методів екстрагування.

За прямого порівняння самої процедури з використанням апарату Сокслета, описаної в обох стандартах, можна зазначити високий ступінь гармонізації. Принцип роботи, послідовність дій та критерій завершення екстрагування є ідентичними. Однак європейський стандарт демонструє більш ретельний та сучасний підхід, оскільки містить окремий довідковий додаток D, присвячений особливостям екстрагування бітуму, модифікованого полімером. У ньому надано рекомендації щодо вибору розчинників та коригування тривалості екстрагування, оскільки полімери можуть розчинятися повільніше за бітум. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] не надає жодних вказівок щодо роботи з модифікованими сумішами.

Окрім процедурних відмінностей, суттєва розбіжність між українським та європейським підходами до визначення складу асфальтобетонної суміші полягає у вимогах до маси проби, яку беруть для випробування. Цей параметр є критично важливим, оскільки напряму впливає на репрезентативність вибірки, а отже, і на достовірність кінцевих результатів.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], для екстрагування в'язучого відбирають дві наважки загальною масою (500 ± 30) г. Ця вимога є жорсткою та не залежить від типу асфальтобетонної суміші чи найбільшого номінального розміру зерен мінерального заповнювача.

На противагу цьому, ДСТУ EN 12697-1:2022 [7] не встановлює єдиного фіксованого значення. Натомість в ньому застосовано функціональний підхід, за яким масу проби визначають типом та місткістю використовуваного обладнання. Наприклад, стандарт описує чаші для центрифужних екстракторів місткістю 1500 г та 3000 г, що дозволяє працювати зі значно більшими пробами.

Така розбіжність у підходах має суттєві практичні наслідки. Використання фіксованої малої маси проби (500 г) для крупнозернистих асфальтобетонних сумішей може призвести до втрати репрезентативності. Випадкове потрапляння або відсутність кількох великих зерен щебеню в такій малій пробі здатне значно спотворити як результат визначення вмісту в'язучого, так і, що більш важливо, результат визначення зернового складу мінеральної частини.

Гнучкий підхід ДСТУ EN 12697-1:2022 [7] дозволяє уникнути цієї проблеми, надаючи лабораторії можливість обрати масу проби, яка є адекватною для певного матеріалу. Для крупнозернистих асфальтобетонних сумішей можна використовувати обладнання більшої місткості та, відповідно, більшу масу проби, що гарантує отримання статистично достовірних даних.

Таким чином, прескриптивна вимога ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] щодо маси проби є його суттєвим недоліком, що може слугувати джерелом похибок. Функціональний підхід ДСТУ EN 12697-1:2022 [7] є більш технічно обґрунтованим, оскільки він ставить у пріоритет забезпечення репрезентативності випробування для всього різноманіття асфальтобетонних сумішей.

Отже, виконаний аналіз показав, що метод екстрагування в'язучого, унормований в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], хоча і є технічно коректним для того обладнання, яке він регламентує (апарат Сокслета), є надто обмеженим та застарілим для потреб сучасної лабораторії. ДСТУ EN 12697-1:2022 [7] пропонує значно більш гнучку, комплексну та досконалу систему. Він стандартизує широкий спектр обладнання, що дозволяє підвищити ефективність роботи, враховує важливі фактори (вміст води, наявність полімерів) та забезпечує вищу точність і відтворюваність результатів. Впровадження ДСТУ EN 12697-1:2022 [7] дасть можливість українським лабораторіям використовувати сучасне автоматизоване обладнання, коректно працювати з модифікованими сумішами та отримувати результати, що є повністю порівнянними з результатами європейських партнерів.

Сучасною, швидкою та екологічно безпечною альтернативою класичному екстрагуванню з використанням розчинників є метод визначення вмісту в'язучого випалюванням, який встановлено в 31.4 ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] та ДСТУ EN 12697-39:2022 [8]. Обидва стандарти містять процедури для цього випробування, однак, за схожості загального принципу, їхні методології містять настільки суттєві відмінності, що ставлять під сумнів порівнюваність та достовірність результатів, отриманих за національним стандартом.

Обидва стандарти засновані на одному принципі: пробу асфальтобетонної суміші зважують, розміщують в муфельній печі, де бітумне в'язуче повністю вигорає, після чого мінеральний залишок зважують. Уміст в'язучого визначають за втратою маси.

Проте, ключова проблема цього методу полягає в тому, що за високих температур (понад 500 °C) масу втрачає не лише бітум. Деякі види мінеральних матеріалів, зокрема з карбонатних порід (вапняки, доломіти), а целюлозні добавки, зазнають термічної дисоціації та також втрачають масу. Ігнорування цього факту призводить до систематичного завищення результату вмісту в'язучого.

Саме в підході до вирішення цієї проблеми полягає головна відмінність між стандартами:

1) у розділі 31.4 ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] описано процедуру випалювання, однак у ньому повністю відсутнє поняття калібрування або введення поправочного коефіцієнта на втрату маси мінеральною частиною. Стандарт неявно припускає, що вся втрата маси — це виключно бітум. Це є фундаментальною методологічною помилкою, яка робить метод непридатним для роботи з широким спектром мінеральних матеріалів, поширених в Україні.

2) ДСТУ EN 12697-39:2022 [8] побудований навколо концепції обов'язкового калібрування. Він вимагає для кожної конкретної асфальтобетонної суміші або набору її складників попередньо визначати «калібрувальне значення». Це значення якраз і є поправкою на втрату маси мінеральною частиною.

У ДСТУ EN 12697-39:2022 [8] запропоновано три нормативні методи визначення цього коефіцієнта (додаток А): з використанням лабораторних проб із точно відомим вмістом в'язучого, паралельним аналізом з методом екстрагування, або випалюванням необробленого мінерального заповнювача. Кінцевий результат вмісту в'язучого обов'язково обчислюють з урахуванням цієї поправки.

Окрім ключової різниці в калібруванні, ДСТУ EN 12697-39:2022 [8] є більш досконалим і в інших аспектах:

1) у ДСТУ EN 12697-39:2022 [8] встановлено деталізовані вимоги до муфельних печей, включаючи наявність системи допалювання викидів, автоматичного блокування дверцят та, для методу А, інтегрованих ваг, що автоматично фіксують завершення випробування. Це підвищує безпеку, точність та ефективність випробування;

2) ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] встановлено фіксовану температуру $(500 \pm 10) ^\circ\text{C}$, а ДСТУ EN 12697-39:2022 [8] оперує поняттям «цільової температури», яку можна знижувати, якщо калібрування показує надмірну втрату маси мінерального матеріалу, що свідчить про його деструкцію. Це дозволяє адаптувати метод під специфічні матеріали.

Реалізація в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] методу випалювання є технічно неповною та методологічно некоректною. Відсутність процедури калібрування для врахування втрати маси

мінеральною частиною може призводити до значних, іноді критичних, похибок у визначенні вмісту в'язучого, особливо за використання карбонатних заповнювачів. Для забезпечення точного та об'єктивного контролю складу асфальтобетонних сумішей потрібно повністю перейти на методологію, викладену в ДСТУ EN 12697-39:2022 [8], з обов'язковим впровадженням процедури калібрування для кожного складу випробовуваної асфальтобетонної суміші.

Аналіз методів визначення об'ємної густини асфальтобетону

Об'ємна (середня) густина асфальтобетону є ключовим показником, що використовують для характеристики ступеню ущільнення асфальтобетонної суміші в шарі дорожнього одягу. Об'ємну густину асфальтобетону також використовують для обчислення вмісту повітряних пор (залишкової пористості), який безпосередньо впливає на довговічність та експлуатаційні характеристики асфальтобетонного шару. Точність визначення об'ємної густини є критично важливою для об'єктивної оцінки якості асфальтобетонної суміші та виконаних дорожніх робіт.

У розділі 8 ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] унормовано один основний метод визначення середньої густини — гідростатичне зважування. Його принцип полягає у визначенні об'єму зразка через різницю його маси в повітрі та у воді. Процедура передбачає зважування сухого зразка, його насичення водою впродовж фіксованого часу (30 ± 1) хв, зважування у воді, витирання поверхні та остаточне зважування насиченого поверхнево-сухого зразка в повітрі. Цей метод за своєю суттю є аналогом процедури SSD (Saturated Surface Dry), поширеної у світовій практиці.

У ДСТУ EN 12697-6:2022 [9] запропоновано значно ширший та більш гнучкий підхід, регламентуючи чотири різні процедури, вибір яких залежить від структури та пористості випробовуваного зразка:

1) процедура А (Сухий метод): для зразків із дуже щільною, практично водонепроникною поверхнею (наприклад, литий асфальтобетон). Зразок зважують у воді без попереднього насичення;

2) процедура В (Насичений поверхнево-сухий, SSD): для щільних зразків із закритою поверхнею. Ця процедура є практично ідентичною до методу, описаного в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1]. Ключова відмінність полягає у вимозі до часу насичення: ДСТУ EN 12697-6:2022 [9] рекомендує витримувати зразок «достатньо довго, щоб його маса перестала змінюватися», що є більш науково обґрунтованим підходом порівняно з фіксованими 30 хв в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1];

3) процедура С (Герметизований зразок): для пористих матеріалів або зразків із грубою текстурою поверхні. Щоб запобігти швидкому витіканню води з великих пор під час зважування, зразок перед зануренням у воду герметизують (наприклад, парафіном або плівкою);

4) процедура D (За геометричними розмірами): для зразків правильної геометричної форми (циліндри, плити). Їхній об'єм визначають прямим вимірювання лінійних розмірів.

У обов'язковому додатку В ДСТУ EN 13108-20:2018 [6] наведено таблиці з переліком випробувань для кожного типу асфальтобетону. У графі «Уміст повітряних пор» надано прямі вказівки щодо визначення об'ємної густини. Для асфальтобетону (Asphalt Concrete, AC) (таблиця В.1):

— якщо очікуваний уміст повітряних пор $\leq 7\%$ за об'ємом, слід використовувати процедуру В (насичений поверхнево-сухий, SSD), що є прямим аналогом методу згідно з розділом 8 ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1];

— якщо очікуваний вміст повітряних пор від 7% за об'ємом до 10% за об'ємом, слід використовувати процедуру С (герметизований зразок);

— якщо очікуваний вміст пор $\geq 10\%$ за об'ємом, слід використовувати процедуру D (за геометричними розмірами).

Відповідним чином встановлено положення щодо визначення об'ємної густини інших типів асфальтобетону.

Порівняльний аналіз показує, що метод визначення середньої густини, унормований у ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], є технічно коректним, але не універсальним. Він повністю відповідає процедурі В ДСТУ EN 12697-6:2022 [9] і є придатним для контролю якості щільних асфальтобетонів.

Однак головним недоліком вітчизняного стандарту є відсутність альтернативних методів, що робить його непридатним для коректного випробування сучасних типів асфальтобетону з високою або відкритою пористістю. Застосування єдиного методу SSD для всіх матеріалів може призводити до систематичних похибок та завищення результатів густини через швидку втрату води зразком. ДСТУ EN 12697-6:2022 [9] завдяки своїй гнучкості та наявності чітких рекомендацій щодо вибору процедури, забезпечує отримання достовірних результатів для всього спектра бітумомінеральних сумішей.

Аналіз методів визначення найбільшої густини

Фундаментальною характеристикою, що використовують для обчислення об'ємних властивостей ущільненого матеріалу є найбільша (дійсна) густина — теоретична густина асфальтобетонної суміші за нульової пористості. Неточність у визначенні цього показника призводить до ланцюгової помилки в оцінці пористості. Порівняння підходів, викладених у ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] та в ДСТУ EN 12697-5:2022 [10], виявляє не просто процедурні, а й глибокі методологічні розбіжності, що ставлять під сумнів порівнюваність результатів.

Обидва стандарти пропонують два основні шляхи визначення найбільшої густини: експериментальний та розрахунковий. У розділі 11 ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] унормовано розрахунковий метод, що заснований на дійсній густині складників, та пікнометричний метод (експериментальний). У ДСТУ EN 12697-5:2022 [10] унормовані три процедури, а саме математичну — розрахунковий метод, що заснований на очевидній густині (apparent density) складників, об'ємну — пікнометричний метод, гідростатичну — альтернативний експериментальний метод.

Ключова проблема полягає у внутрішній неузгодженості ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1]. Розрахунковий метод згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] вимагає використовувати дійсну густину мінеральних матеріалів — показник, що враховує об'єм лише твердої речовини, ігноруючи внутрішні закриті пори в самому матеріалі. Натомість експериментальний (пікнометричний) метод за своєю фізичною суттю вимірює об'єм зерен разом із їхніми закритими порами, оскільки вода не може в них проникнути. Таким чином, пікнометричний метод де-факто базується на очевидній густині мінерального матеріалу.

Це призводить до парадоксальної ситуації: два методи в межах одного й того ж стандарту засновані на різних фізичних припущеннях і, як наслідок, дають непорівнювальні результати. Результат, отриманий розрахунком згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], буде систематично вищим, ніж результат, отриманий експериментально.

ДСТУ EN 12697-5:2022 [10] позбавлений цієї суперечності. Установлений в ньому розрахунковий метод прямо вимагає використовувати очевидну густину (apparent density) мінеральних матеріалів, що повністю відповідає фізиці експериментального пікнометричного методу. Це забезпечує внутрішню узгодженість стандарту та порівнюваність результатів, отриманих різними шляхами.

Навіть за порівняно схожих пікнометричних методів, ДСТУ EN 12697-5:2022 [10] пропонує більш ефективну та метрологічно вивірену процедуру, адже тривалість вакуумування становить лише (15 ± 1) хв з можливістю оптимізування часу, тоді як ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] вимагає вакуумувати пробу впродовж 1 год. Це значно підвищує продуктивність лабораторії без втрати точності. Також варто звернути увагу на те, що згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] потрібно виконувати визначення об'єму колби під час кожного випробування, а згідно з ДСТУ EN 12697-5:2022 [10] потрібно використовувати попередньо відкалібровані пікнометри з відомим об'ємом, що є більш стабільним та метрологічно правильним підходом.

Отже, методи визначення дійсної густини, викладені в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], містять внутрішню методологічну суперечність, яка робить результати розрахункового та експериментального методів непорівнювальними. Ця неузгодженість може призводити до серйозних суперечок між виробниками та споживачами.

В обов'язковому додатку D ДСТУ EN 13108-20:2018 [6] зазначено, що найбільшу густину бітумомінеральної суміші потрібно визначати у воді згідно з процедурою A ДСТУ EN 12697-5:2022 [10]. Це означає, що для офіційного затвердження складу розрахунковий метод або гідростатичний не застосовують. Усі лабораторії в Європейському Союзі під час випробовування типу зобов'язані використовувати один і той же експериментальний метод. Унормовування в ДСТУ EN 13108-20:2018 [6] ще раз підкреслює недосконалість підходу в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1]. В ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] виробник і споживач можуть формально використовувати два різні, непорівнювальні методи (розрахунковий та пікнометричний) для однієї й тієї ж мети. В європейській системі для такої відповідальної процедури, як затвердження складу, вибір чітко обмежений одним конкретним експериментальним методом, що забезпечує єдність, прозорість та порівнюваність результатів на всьому ринку.

Аналіз методів визначення вмісту повітряних пор

Уміст повітряних пор (залишкова пористість) є ключовим параметром, що визначає якість асфальтобетону. Оптимальний вміст пор забезпечує матеріалу потрібну міцність, водо- та морозостійкість, тоді як відхилення від нормативних значень призводять до передчасного руйнування асфальтобетонного шару. Визначення цього показника є розрахунковою процедурою, заснованою на попередньо встановлених значеннях об'ємної та найбільшої густини. Аналіз відповідних розділів ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] та європейського стандарту ДСТУ EN 12697-8:2022 [11] демонструє високий ступінь гармонізації.

У ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] використано термін «Залишкова пористість», тоді як в європейський ДСТУ EN 12697-8:2022 [11] «Уміст повітряних пор». Ці терміни є повними синонімами. Принцип обчислення в обох стандартах ідентичний: він заснований на співвідношенні між об'ємною (середньою) густиною ущільненого зразка та найбільшою (дійсною) густиною асфальтобетонної суміші. Формули для обчислення залишкової пористості та вмісту повітряних пор мають різний запис, але є математично повністю еквівалентними.

Аналіз методів визначення вмісту пор у мінеральному заповнювачі

Уміст пор у мінеральному заповнювачі (пористість мінеральної частини) є ключовим проєктним параметром, що характеризує об'єм порожнин між зернами мінерального заповнювача в ущільненій асфальтобетонній суміші. Цей об'єм має бути достатнім, щоб розмістити в собі як необхідну кількість бітумного в'язучого для забезпечення довговічності, так і проєктний об'єм залишкових повітряних пор для компенсації температурних розширень та запобігання пластичним деформаціям. Порівняльний аналіз ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] (розділ 12) та ДСТУ EN 12697-8:2022 [11] показує, що обидва стандарти розглядають цю властивість як важливу характеристику, проте використовують кардинально різні підходи до її обчислення. Хоча кінцева мета обох стандартів — визначити одну й ту саму фізичну величину, шляхи її обчислення принципово відрізняються. У ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] використано прямий метод через властивості самої мінеральної частини. Процедура вимагає попереднього визначення дійсної густини мінеральної частини (густина матеріалу без урахування будь-яких пор) та середньої густини мінеральної частини (густина ущільненого мінеральної частини з урахуванням пор між зернами). Пористість мінеральної частини обчислюють як різницю між цими двома показниками. Цей метод міг би бути технічно коректним, однак, як вже було зазначено, дійсна густина мінеральної частини ігнорує закриті пори в мінеральному матеріалі. Також такий підхід фактично унеможливує визначення пористості мінеральної частини під час вхідного контролю асфальтобетонних сумішей.

У ДСТУ EN 12697-8:2022 [11] надано більш поширений у світовій практиці «адитивний» (додатковий) метод. Відповідно до нього вміст пор у мінеральному заповнювачі обчислюють як суму об'ємів двох складників, які заповнюють простір між мінеральними зернами, а саме умісту повітряних пор та об'єму пор, заповненого бітумним в'язучим. Цей підхід є більш прагматичним та ефективним, оскільки він використовує для обчислення дані (уміст повітряних пор, уміст в'язучого, об'ємну

густину асфальтобетону), які зазвичай вже визначені на попередніх етапах контролю якості асфальтобетонної суміші.

Аналіз методів визначення водостійкості асфальтобетону

Водостійкість асфальтобетону є інтегральним показником, що характеризує здатність матеріалу зберігати свою структурну цілісність та міцність під дією вологи. Втрата водостійкості, спричинена погіршенням зчеплення на межі «бітум-мінеральний матеріал», є однією з основних причин передчасного руйнування асфальтобетонних шарів. Порівняння підходів до оцінки цього параметру в ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] та європейському ДСТУ EN 12697-12:2022 [12] виявляє як спільні принципи, так і суттєві відмінності в методології та акцентах.

Обидва стандарти засновані на одному й тому ж принципі: порівнянні механічних властивостей двох груп зразків — сухої (контрольної) та вологої (підданої спеціальному водонасиченню та кондиціонуванню). Ступінь збереження міцності вологих зразків відносно сухих і є показником водостійкості.

У ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] встановлено три окремі методи:

- 1) коефіцієнт короткострокової водостійкості (розділ 22): визначення міцності після вакуумного насичення та витримування у воді;
- 2) коефіцієнт довготривалої водостійкості (розділ 23): визначення міцності після вакуумного насичення та витримування у воді впродовж 15 діб;
- 3) коефіцієнт водостійкості експрес-методом (розділ 24): визначення міцності після комбінованого впливу вакууму та витримування за підвищеної температури (85 °C).

ДСТУ EN 12697-12:2022 [12] пропонує три різні методи (А, В, С), які відрізняються типом використовуваного випробування для оцінки впливу води:

- 1) метод А: оцінка водостійкості за зміною міцності на непрямий розтяг. Це найбільш поширений метод у світовій практиці;
- 2) метод В: оцінка за зміною міцності на стиск;
- 3) метод С: специфічний метод для м'яких асфальтобетонів, що оцінює зчеплення за кількістю відшарованого матеріалу після перемішування з водою.

Аналіз методів визначення водостійкості показує, що європейський підхід є більш стандартизованим, жорстким та наближеним до реальних умов експлуатування шарів асфальтобетону.

Процедури згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1], особливо короткострокова, є надто «м'якими». Відсутність кондиціонування за підвищеної температури не дозволяє повною мірою оцінити потенційну втрату адгезії, яка може проявитися в асфальтобетоні під час літньої спеки та дощів. Можливість використання різних показників міцності для обчислення коефіцієнта водостійкості робить результати, отримані в різних лабораторіях, непорівнювальними. Метод визначення довготривалої водостійкості за витримування впродовж 15 діб є надзвичайно тривалим та непрактичним для оперативного контролю якості. Експрес-метод передбачає витримування зразків за дуже високої температури, що може призвести не тільки до втрати адгезії, але й до механічного пошкодження зразків.

Варто звернути увагу на те, що ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [1] не встановлює жодних спеціальних вимог до виготовлення зразків саме для випробування на водостійкість. Передбачено використання стандартних зразків, виготовлених за загальною процедурою, так само як і для визначення міцності.

ДСТУ EN 12697-12:2022 [12] містить цілий ряд обов'язкових спеціальних умов для підготовки зразків, які відрізняють їх від зразків для інших випробувань, зокрема:

- 1) контрольоване ущільнення — використання меншої енергії ущільнення (менша кількість ударів або обертів);
- 2) виготовлення статистично однакових груп зразків — перед початком кондиціонування всі виготовлені зразки (щонайменше шість) ділять на дві підгрупи (суху та вологу) таким чином, щоб середня висота та середня об'ємна густина в обох групах були практично однаковими. Це гарантує, що

будь-яка різниця у міцності після випробування буде наслідком саме впливу води, а не початковою відмінністю між зразками.

Спеціальні вимоги в ДСТУ EN 12697-12:2022 [12] спрямовані на те, щоб зробити випробування більш чутливим та жорстким. Створення зразків із завідомо більш відкритою пористою структурою полегшує проникнення води всередину та створює більш агресивні умови для руйнування адгезійних зв'язків між бітумом та мінеральним матеріалом. Якщо асфальтобетон демонструє високу водостійкість за таких «найгірших» умов, можна з високою ймовірністю стверджувати, що в реальному асфальтобетонному шарі, де асфальтобетонна суміш буде ущільнена значно краще, його довговічність буде забезпечена.

Використання міцності на непрямий розтяг як критерію уніфікує випробування та робить результати порівнювальними. Цей показник є найбільш чутливим саме до адгезійних властивостей системи «бітум-мінеральний матеріал». Поєднання вакуумного насичення з тривалим кондиціонуванням за температури 40 °C є методом прискореного старіння, який значно краще прогнозує реальну поведінку матеріалу в асфальтобетонному шарі, ніж просто витримування у воді за кімнатної температури.

Технічне оснащення

Перехід на європейську систему стандартів нерозривно пов'язаний із потребою модернізування лабораторного обладнання. Виконаний аналіз показує, що ефективне впровадження європейських методів є неможливим без відповідного технічного оснащення.

Оновлення обладнання є доцільним та потрібним з наступних причин:

1) гіраторний ущільнювач є наріжним каменем сучасної методології об'ємного проєктування складу асфальтобетонних сумішей. Він забезпечує найбільш точне імітування польового ущільнення та надає унікальну інформацію про ущільнюваність асфальтобетонної суміші. Стандартні лабораторні преси, що використовують згідно з ДСТУ Б В.2.7-319:2016, не можуть слугувати його заміною;

2) для коректного визначення вмісту в'язучого потрібні сучасні муфельні печі з інтегрованими вагами, що дозволяють автоматично фіксувати завершення випробування, та ефективними системами допалювання викидів, що підвищує точність та безпеку робіт;

3) для прискорення процесу екстрагування в'язучого, зменшення впливу людського чинника та мінімізування контакту персоналу зі шкідливими розчинниками потрібними є автоматизовані системи екстрагування;

4) для достовірного визначення зернового складу мінеральної частини потрібно використовувати випробувальні сита виключно з квадратними отворами, оскільки наразі в Україні має місце використання гібридного набору сит — з круглими та квадратними отворами;

5) подальший розвиток та перехід до визначення експлуатаційних характеристик (жорсткість, втомна довговічність, стійкість до колієутворення) потребуватиме відповідного обладнання (універсальні випробувальні установки, колієутворювачі), яке також унормоване європейськими стандартами.

Висновки

Проведений детальний порівняльний аналіз методів випробування асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів, унормованих національним стандартом ДСТУ Б В.2.7-319:2016 та комплексом європейських стандартів серії EN 12697 і EN 13108, дозволяє зробити низку обґрунтованих висновків.

Встановлено фундаментальну концептуальну відмінність між двома системами стандартизації. Вітчизняний стандарт ДСТУ Б В.2.7-319:2016 є переважно прескриптивним (прописним), пропонуючи один, жорстко регламентований метод для кожного випробування. Натомість європейський підхід є функціональним та системним: він надає набір технічно обґрунтованих методів та чіткі вказівки (наприклад, через EN 13108-20) щодо вибору найбільш доцільної процедури залежно від типу асфальтобетонної суміші та мети випробування.

Виявлено критичні методологічні недоліки та внутрішні суперечності у ДСТУ Б В.2.7-319:2016, що ставлять під сумнів достовірність та порівнюваність результатів. До ключових проблем належать:

1) метод ущільнення пресуванням є деструктивним для мінерального каркасу через надвисокий тиск та умови навантажування та не імітує реальні умови влаштування асфальтобетонного шару;

2) метод визначення вмісту в'язучого випалюванням не передбачає обов'язкового калібрування на втрату маси заповнювача, що може призводити до систематичного завищення результатів;

3) метод визначення дійсної густини асфальтобетонної суміші містить внутрішню суперечність, оскільки розрахунковий метод базується на дійній густині мінеральних матеріалів, а експериментальний — на очевидній густині мінеральних матеріалів, що робить їхні результати непорівнюваними;

4) процедури кондиціонування у методі визначення водостійкості є недостатньо жорсткими та не повною мірою моделюють агресивний вплив вологи та температури на зміну властивостей асфальтобетону.

ДСТУ Б В.2.7-319:2016 є недостатньо адаптованим до сучасних матеріалів, оскільки в ньому відсутні вказівки щодо роботи з модифікованими асфальтобетонними сумішами чи асфальтобетонними сумішами на основі спінених бітумів.

Проведений аналіз однозначно свідчить про технічну та економічну доцільність повного, системного переходу на комплекс європейських стандартів серії EN 12697 та EN 13108. Такий перехід дозволить усунути існуючі методологічні розбіжності, забезпечити єдність і достовірність вимірювань, підвищити якість проєктування складів асфальтобетонних сумішей та створити прозору і зрозумілу систему контролю якості, гармонізовану з європейською, що є невід'ємним кроком євроінтеграційних процесів.

Потрібною умовою впровадження європейських стандартів є модернізування технічної бази, яку потрібно розглядати не просто як витрати, а як стратегічну інвестицію — інвестицію в достовірність результатів, ефективність роботи лабораторії, безпеку персоналу та, найголовніше, — в якість і довговічність дорожньої інфраструктури України.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2016. 87 с. (Інформація та документація).
2. ДСТУ EN 12697-30:2020 (EN 12697-30:2018, IDT) Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 30. Готування зразків ударним ущільнювачем. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ EN 12697-31:2021 (EN 12697-31:2019, IDT) Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 31. Підготування зразка гіраторним ущільнювачем. Київ, 2021. 19 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ EN 12697-33:2022 (EN 12697-33:2019, IDT) Бітумні суміші. Метод випробування. Частина 33. Зразок, підготовлений роликовим ущільнювачем. Київ, 2022. 23 с. (Інформація та документація).
5. ДСТУ EN 12697-56:2024 (EN 12697-56:2019, IDT) Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 56. Підготування зразків статичним ущільненням. Київ, 2024. 10 с. (Інформація та документація).
6. ДСТУ EN 13108-20:2018 (EN 13108-20:2016, IDT) Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 20. Методи типових випробувань. Київ, 2028. 29 с. (Інформація та документація).
7. ДСТУ EN 12697-1:2022 (EN 12697-1:2020, IDT) Бітумні суміші. Методи випробувань. Частина 1. Вміст розчинного в'язучого. Київ, 2022. 53 с. (Інформація та документація).
8. ДСТУ EN 12697-39:2022 (EN 12697-39:2020, IDT) Бітумні суміші. Методи випробувань. Частина 39. Вміст в'язучого під час прожарювання. Київ, 2022. 20 с. (Інформація та документація).

9. ДСТУ EN 12697-6:2022 (EN 12697-6:2020, IDT) Бітумні суміші. Методи випробувань. Частина 6. Визначення насипної щільності бітумних зразків. Київ, 2022. 17 с. (Інформація та документація).
10. ДСТУ EN 12697-5:2022 (EN 12697-5:2018, IDT) Бітумні суміші. Методи випробувань. Частина 5. Визначення максимальної щільності. Київ, 2022. 22 с. (Інформація та документація).
11. ДСТУ EN 12697-8:2022 (EN 12697-8:2018, IDT) Бітумні суміші. Методи випробувань. Частина 8. Визначення порожнистих характеристик бітумних зразків. Київ, 2022. 10 с. (Інформація та документація).
12. ДСТУ EN 12697-12:2018 (EN 12697-12:2018, IDT) Бітумомінеральні суміші. Методи випробування. Частина 12. Визначення водостійкості асфальтобетонних зразків. Київ, 2018. 15 с. (Інформація та документація).

References

1. DSTU B V.2.7-319:2016 Sumishi asfal'tobetonni i asfal'tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvan'. Kyiv, 2016. 87 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. DSTU EN 12697-30:2020 (EN 12697-30:2018, IDT) Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuвання. Chastyna 30. Hotuvannya zrazkiv udarnym ushchilniuvachem. Kyiv, 2018. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. DSTU EN 12697-31:2021 (EN 12697-31:2019, IDT) Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuвання. Chastyna 31. Pidhotuvannya zrazka hiratornym ushchilniuvachem. Kyiv, 2021. 19 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
4. DSTU EN 12697-33:2022 (EN 12697-33:2019, IDT) Bitumni sumishi. Metod vyprobuвання. Chastyna 33. Zrazok, pidhotovlenyi rolykovym ushchilniuvachem. Kyiv, 2022. 23 p. (Information and documentation) [in English].
5. DSTU EN 12697-56:2024 (EN 12697-56:2019, IDT) Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuвання. Chastyna 56. Pidhotuvannya zrazkiv statychnym ushchilnenniam. Kyiv, 2024. 10 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
6. DSTU EN 13108-20:2018 (EN 13108-20:2016, IDT) Bitumomineralni sumishi. Tekhnichni umovy. Chastyna 20. Metody typovykh vyprobuvan. Kyiv, 2028. 29 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. DSTU EN 12697-1:2022 (EN 12697-1:2020, IDT) Bitumni sumishi. Metody vyprobuvan. Chastyna 1. Vmist rozchynnoho viazhuchoho. Kyiv, 2022. 53 p. (Information and documentation) [in English].
8. DSTU EN 12697-39:2022 (EN 12697-39:2020, IDT) Bitumni sumishi. Metody vyprobuvan. Chastyna 39. Vmist viazhuchoho pid chas prozhariuvannya. Kyiv, 2022. 20 p. (Information and documentation) [in English].
9. DSTU EN 12697-6:2022 (EN 12697-6:2020, IDT) Bitumni sumishi. Metody vyprobuvan. Chastyna 6. Vyznachennia nasypnoi shchilnosti bitumnykh zrazkiv. Kyiv, 2022. 17 p. (Information and documentation) [in English].
10. DSTU EN 12697-5:2022 (EN 12697-5:2018, IDT) Bitumni sumishi. Metody vyprobuvan. Chastyna 5. Vyznachennia maksymalnoi shchilnosti. Kyiv, 2022. 22 p. (Information and documentation) [in English].
11. DSTU EN 12697-8:2022 (EN 12697-8:2018, IDT) Bitumni sumishi. Metody vyprobuvan. Chastyna 8. Vyznachennia porozhnistykh kharakterystyk bitumnykh zrazkiv. Kyiv, 2022. 10 s. (Information and documentation).
12. DSTU EN 12697-12:2018 (EN 12697-12:2018, IDT) Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuвання. Chastyna 12. Vyznachennia vodostiikosti asfaltobetonnykh zrazkiv. Kyiv, 2018. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Anatolii Tsynka, Ph.D., <http://orcid.org/0000-0002-0357-2325>

Ivan Kopynets, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-0908-4795>

Anton Zheltobriukh, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-0764-8793>

Oleksii Sokolov, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-4694-9647>

Oksana Sokolova, <https://orcid.org/0000-0003-4202-8661>

Alina Yunak, <https://orcid.org/0000-0002-5294-5554>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

COMPARISON OF DOMESTIC AND EUROPEAN TESTING METHODS FOR ASPHALT MIXTURES AND ASPHALT CONCRETES

Abstract

Introduction. Harmonization of the national regulatory framework with the European one is a key task for Ukraine's road sector. The quality and durability of asphalt concrete layers directly depend on the adequacy of testing methods applicable to the design of asphalt concrete mixtures and quality control. In Ukraine, these methods are regulated by DSTU B V.2.7-319:2016, whereas in the European Union a comprehensive system of EN 12697 standards is in force.

Problem Statement. Analysis shows that the methods regulated by DSTU B V.2.7-319:2016 contain a number of conceptual and procedural differences from European approaches. This concerns both laboratory compaction methods, which do not reproduce actual roller conditions, and methods for determining composition and volumetric properties, which include internal methodological inconsistencies and do not account for the characteristics of modern materials. Such discrepancies call into question the comparability of results and the effectiveness of the quality control system.

Objective. To conduct a detailed comparative analysis of key testing methods according to DSTU B V.2.7-319:2016 and the corresponding standards of the EN 12697 series, in order to scientifically substantiate the feasibility and directions for modernization of the domestic regulatory framework.

Methods. A comparative analysis of regulatory documents was carried out, including a comparison of principles, procedures, equipment, and evaluation criteria for laboratory compaction methods, composition determination, volumetric properties, and water resistance of asphalt concrete.

Results. It was established that the domestic compaction method by pressing is destructive to the mineral skeleton, unlike European methods (gyratory, rolling compaction), which better simulate real conditions. A critical methodological error was identified in the national method of determining binder content by ignition — namely, the absence of a calibration procedure for aggregate mass loss. An internal inconsistency was revealed in DSTU B V.2.7-319:2016 during the determination of maximum density (using the concepts of "true" and "apparent" density for calculation and experimental methods, respectively). It was demonstrated that the water resistance determination procedure according to DSTU B V.2.7-319:2016 is less stringent and representative compared to the accelerated conditioning method specified in DSTU EN 12697-12:2018.

Conclusions. The analysis proves that the further use of a number of methods regulated by DSTU B V.2.7-319:2016 is impractical due to their methodological shortcomings, which may lead to incorrect data and erroneous decisions. To ensure objective quality control, increase the durability of asphalt concrete layers, and achieve full integration into the European technical space, the necessity of a systematic and complete transition to the EN 12697 series of standards is substantiated.

Keywords: asphalt concrete, asphalt mixture, testing methods, harmonization of standards, DSTU B V.2.7-319:2016, EN 12697, laboratory compaction, gyratory compactor, volumetric properties, water resistance.

УДК 691.16

Даценко В. М.², канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0002-3944-2610>

Кириченко Г. В.², канд. екон. наук, <https://orcid.org/0000-0002-3783-0804>

Копинець І. В.¹, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-0908-4795>

Соколова О. Б.¹, <https://orcid.org/0000-0003-4202-8661>

Чечуга О. С.², канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0003-1643-6354>

¹Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

²Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

СУЧАСНІ ВИМОГИ ДО ЩЕБЕНЕВО-МАСТИКОВИХ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ ТА ЩЕБЕНЕВО-МАСТИКОВИХ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ

Анотація

Вступ. Підвищення довговічності дорожнього одягу та гармонізація національної нормативної бази з європейською є ключовими завданнями для дорожньої галузі України. Якість щебеневомастикового асфальтобетону, як одного з найефективніших матеріалів для верхніх шарів одягу, безпосередньо залежить від актуальності нормативних вимог. В Україні ці вимоги до 2024 року були унормовані ДСТУ Б В.2.7-127:2015, проте з метою впровадження сучасних підходів було розроблено та прийнято новий стандарт ДСТУ 9290-5:2024.

Проблематика. Аналіз показує, що вимоги згідно з ДСТУ Б В.2.7-127:2015, хоча і забезпечували базовий рівень якості, мали низку недоліків: недостатньо жорсткі вимоги до геометричних характеристик заповнювачів, орієнтація на застарілу номенклатуру бітумних в'язучих та, що найголовніше, відсутність методів контролю, які б прямо оцінювали експлуатаційні характеристики асфальтобетону, зокрема його опір колієутворенню. Такі розбіжності з європейською практикою стримували підвищення реального строку служби дорожніх покриттів.

Мета. Провести детальний порівняльний аналіз вимог до щебеневомастикових асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів згідно з ДСТУ Б В.2.7-127:2015 та новим ДСТУ 9290-5:2024, щоб ідентифікувати ключові нововведення та науково обґрунтувати їхній вплив на підвищення якості дорожнього будівництва.

Методи. Проведено порівняльний аналіз нормативних документів, що включає зіставлення класифікації, вимог до складників (заповнювачів, в'язучих, добавок), зернових складів, фізико-механічних властивостей, а також технологічних аспектів та методів контролю якості.

Результати. Встановлено, що новий стандарт ДСТУ 9290-5:2024 впроваджує фундаментальні зміни. Посилено вимоги до форми зерен щебеню. Оновлено нормативну базу для в'язучих з акцентом на сучасні модифіковані бітуми. Найважливішим нововведенням є впровадження обов'язкового випробування на стійкість до колієутворення, що є першим кроком до переходу на оцінку за експлуатаційними показниками. Крім того, значно посилено систему контролю якості через зменшення розміру партії вдвічі та інтеграцію сучасних європейських методів випробувань серії EN 12697.

Висновки. Аналіз доводить, що ДСТУ 9290-5:2024 є не просто оновленням, а системною реформою, що знаменує перехід від переважно рецептурного підходу до орієнтованого на експлуатаційні характеристики. Впровадження нового стандарту створює нормативне підґрунтя для вироблення більш довговічного щебеневомастикового асфальтобетону та забезпечує глибоку гармонізацію з європейським технічним простором, що є потрібною умовою для підвищення якості та надійності автомобільних доріг України.

Ключові слова: щебеневомастиковий асфальтобетон, щебеневомастикова асфальтобетонна суміш, нормативні вимоги, гармонізація стандартів, ДСТУ Б В.2.7-127:2015, ДСТУ 9290-5:2024, стійкість до колієутворення, якість дорожнього покриття.

Вступ

Розвиток дорожньої інфраструктури є одним із ключових факторів економічного зростання та інтеграції України у європейський простір. В умовах зростання інтенсивності руху та навантаги на дорожній одяг, питання його довговічності та експлуатаційної надійності набуває першочергового значення. Одним із найефективніших матеріалів дорожнього покриття, що зазнає найбільших руйнівних впливів, є щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА). Завдяки своїй каркасній структурі, високому вмісту щебеню кубовидної форми та стабілізованого бітумного в'язучого, ЩМА забезпечує високу зсувостійкість, опір колієутворенню та стійкість до втомного руйнування.

Впродовж тривалого часу основним нормативним документом, що унормовував вимоги до щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей (ЩМАС) та ЩМА в Україні, був ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1]. У цьому стандарті було встановлено класифікацію, технічні вимоги до складників, властивостей ЩМАС та ЩМА.

Проте, в рамках стратегії гармонізації національної нормативної бази з європейською, а також з метою впровадження сучасних методів оцінки якості та підвищення вимог до дорожньо-будівельних матеріалів, у 2024 році було прийнято новий національний стандарт — ДСТУ 9290-5:2024 [2]. Цей стандарт прийнято на заміну ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1], він знаменує новий етап у розвитку підходів до проектування та контролю якості ЩМАС та ЩМА в Україні. Одночасно було розроблено і стандарт ДСТУ 9282:2024 [3], в якому встановлено національні вимоги до ЩМАС відповідно до положень стандарту ДСТУ EN 13108-5:2018 [4].

Таким чином, виникає нагальна практична потреба у проведенні детального порівняльного аналізу положень старого та нового стандартів.

Метою цієї статті є виявлення, аналізування та систематизування ключових відмінностей у вимогах до щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів згідно з ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] та ДСТУ 9290-5:2024 [2].

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- 1) порівняти зміни у класифікації ЩМАС та ЩМА;
- 2) проаналізувати відмінності у вимогах до складників: заповнювачів, в'язучого та стабілізувальних добавок;
- 3) зіставити вимоги до зернових складів та показників фізико-механічних властивостей ЩМА;
- 4) висвітлити нововведення у методах контролю та правилах приймання продукції;
- 5) оцінити ступінь гармонізації нових вимог з європейськими нормами.

Результати цього дослідження дозволять дорожньо-будівельним організаціям, виробникам ЩМАС та науковцям краще зрозуміти напрям розвитку нормативної бази та адаптувати свої виробничі та контрольні процеси до сучасних вимог.

Основна частина

Зміни у класифікації та термінології

Аналіз нового стандарту ДСТУ 9290-5:2024 [2] порівняно з ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] виявляє суттєві зміни у підходах до класифікації, термінології та маркування ЩМАС, що свідчить про осучаснення та уніфікування нормативної бази.

Класифікація за найбільшим розміром заповнювача

Ключова зміна торкнулася переліку видів ЩМАС та ЩМА.

У ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] був поділ ЩМАС та ЩМА за максимальним розміром мінеральних зерен на п'ять видів: ЩМА(С)-40, ЩМА(С)-20 (20 мм), ЩМА(С)-15 (15 мм), ЩМА(С)-10 (10 мм), ЩМА(С)-5 (5 мм). У ДСТУ 9290-5:2024 [2] встановлено класифікацію за найбільшим номінальним розміром зерен заповнювача на чотири види: ЩМА(С)-20, ЩМА(С)-15, ЩМА(С)-10, ЩМА(С)-5.

Найбільш помітною відмінністю є виключення виду ЩМА(С)-40. Це рішення відображає сучасну практику дорожнього будівництва, де перевагу надають тоншому дорожньому покриттю, для

яких ЩМА з максимальним розміром заповнювача 40 мм використовують вкрай рідко. Також відбулося уточнення терміну з «максимального розміру» на «найбільший номінальний розмір», що є більш коректним з точки зору стандартизації заповнювачів.

Оновлення термінологічної бази

Хоча основні визначення залишилися концептуально схожими, новий стандарт вносить важливі термінологічні уточнення, спрямовані на гармонізацію з сучасною європейською практикою.

Заміна тріади «щебінь, пісок, мінеральний порошок» на «крупний заповнювач, дрібний заповнювач, наповнювач» є прямим кроком до уніфікування термінології з європейськими стандартами, де використовують саме такий поділ мінеральної частини. Це спрощує взаєморозуміння між фахівцями та інтеграцію української технічної документації у європейський контекст.

Умовна позначка (маркування)

Важливим нововведенням ДСТУ 9290-5:2024 [2] є запровадження чіткої та більш інформативної структури умовної позначки продукції. Якщо старий стандарт обмежувався лише вказанням виду (напр., ЩМАС-20), то новий вимагає розширеного маркування, яке включає:

- 1) вид суміші (напр., ЩМАС-20);
- 2) марку використаного бітуму (напр., БМПП 50/70-65);
- 3) позначення самого стандарту (ДСТУ 9290-5:2024).

Такий підхід дозволяє одразу ідентифікувати ключові характеристики ЩМАС, що є важливим для замовників, проєктантів та контролюючих органів, і знижує ризик неправильного застосування матеріалу.

Зміни у класифікації та термінології не є формальними, а відображають глибинний процес осучаснення нормативної бази: відмову від застарілих та рідковживаних рішень (ЩМА(С)-40), уніфікування професійної лексики та впровадження більш інформативного маркування продукції.

Вимоги до складників

Новий стандарт ДСТУ 9290-5:2024 [2] вносить низку суттєвих уточнень та посилює вимоги до всіх основних складників ЩМАС, що спрямовано на підвищення стабільності та довговічності ЩМА.

Крупний заповнювач (щебінь)

Щебінь формує каркас ЩМА, тому вимоги до нього є критично важливими.

Новий стандарт уніфікує та посилює вимоги до форми зерен щебеню. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] допускав уміст зерен пластинчастої та голчастої форми до 15 % для ЩМАС-10, ЩМАС-15, ЩМАС-20, ЩМАС-40 та до 10 % для ЩМАС-5. ДСТУ 9290-5:2024 [2] встановлює єдину, більш жорстку вимогу: вміст таких зерен не повинен перевищувати 10 % для всіх видів ЩМАС. Це нововведення сприятиме формуванню більш міцного та стійкого до деформацій кам'яного каркаса.

Вимога до коефіцієнта кубовидності залишилася незмінною — не менше 50 %. Проте новий стандарт уточнює метод його визначення, що підвищує об'єктивність контролю.

Марка за дробильністю для щебеню з вивержених та метаморфічних порід залишилася незмінною — не нижче 1200, а з осадових — не нижче 1000. Вимога до марки за стираністю також не змінилася — не нижче ніж Ст-І.

Дрібний заповнювач (пісок)

У новому стандарті збережено принципову вимогу щодо використання для вироблення ЩМАС виключно піску з відсівів подрібнення щільних гірських порід. Це запобігає використанню природних неподрібнених пісків, які можуть погіршити зсувостійкість ЩМА.

У ДСТУ 9290-5:2024 [2] розширено перелік стандартів, яким може відповідати пісок (ДСТУ Б В.2.7-32-95 [4], ДСТУ Б В.2.7-76-98 [5], ДСТУ Б В.2.7-210:2010 [6]), тоді як старий стандарт мав поклики лише на ДСТУ Б В.2.7-76-98 [5].

Вміст глинистих частинок (за методом набухання) залишився на тому ж рівні — не більше 0,5 % за масою.

Наповнювач (мінеральний порошок)

Основна зміна полягає в оновленні нормативної бази. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] мав поклики на ДСТУ Б В.2.7-121:2014 [7]. ДСТУ 9290-5:2024 [2] містить поклики на новий стандарт ДСТУ 9246-1:2023 [8]. Можливість замінювати до 50 % наповнювача пилоподібною фракцією (менше 0,071 мм) з відсівів подрібнення збережено в новому документі.

В'язуче (бітум)

Оновлення вимог до бітуму є одним із найважливіших кроків у новому стандарті. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] унормовував використання в'язких бітумів марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130 та полімер-модифікованих бітумів. ДСТУ 9290-5:2024 [2] робить акцент на сучасні стандарти для в'язучих: ДСТУ 9116:2021 [9] та ДСТУ 9133:2021 [10].

Це свідчить про орієнтацію на використання більш якісних, модифікованих в'язучих, що мають покращені експлуатаційні характеристики. Також новий стандарт чітко регламентує необхідність застосування добавок на основі поверхнево-активних речовин у разі незадовільного зчеплення бітуму з мінеральними матеріалами.

Стабілізуювальні добавки

Вимоги до основного типу стабілізуювальних добавок — целюлозного волокна — залишено без змін: Вологість: не більше ніж 5,0 % за масою; термостійкість — не більше ніж 7,0 % за масою. Обидва стандарти допускають використання інших типів стабілізуювальних добавок за умови підтвердження їх ефективності лабораторними випробуваннями.

Отже, в новому стандарті ДСТУ 9290-5:2024 [2] встановлено більш жорсткі вимоги до геометричних характеристик щебеню, оновлено та розширено нормативну базу для всіх складників, а також чітко зорієнтовано виробників на використання сучасних модифікованих бітумів та добавок. Це створює нормативне підґрунтя для вироблення ЩМАС зі стабільно вищими показниками якості.

Проектування складу суміші та вимоги до зернового складу

Принциповим моментом у переході від ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] до ДСТУ 9290-5:2024 [2] є не стільки зміна самих кривих зернового складу, скільки впровадження більш чіткого та уніфікованого підходу до процесу проектування складу ЩМАС.

Зерновий склад мінеральної частини

Пряме порівняння таблиць, що регламентують межі проходів крізь контрольні сита, показує, що вимоги до зернового складу для відповідних видів ЩМАС залишилися практично ідентичними. У таблиці 1 ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] та таблиці 2 ДСТУ 9290-5:2024 [2] для видів ЩМАС-20, ЩМАС-15, ЩМАС-10 та ЩМАС-5 встановлено однакові діапазони вмісту зерен мінерального матеріалу для всієї лінійки сит.

Це свідчить про те, що сама структурна концепція ЩМА з переривчастим зерновим складом, яка забезпечує створення міцного кам'яного каркасу, визнана ефективною та не потребувала кардинальних змін. Збереження цих вимог забезпечує наступність технологічних рішень для виробників. Також в новому стандарті збережено вимоги щодо максимального розміру зерен: їх розмір не повинен перевищувати номінальний більше ніж на 5 мм, а вміст — не більше 10 % від маси мінеральної частини.

Підхід до проектування складу

Найбільш суттєве нововведення стосується методології підбирання оптимального складу ЩМАС. Старий підхід був суто ітераційним. Він не надавав жодних орієнтовних значень вмісту в'язучого чи стабілізатора. Процес проектування полягав у підборі співвідношення мінеральних матеріалів для влучення у криву зернового складу, після чого лабораторно випробовували кілька варіантів з різним вмістом бітуму для досягнення необхідних показників фізико-механічних властивостей ЩМА.

Новий підхід (ДСТУ 9290-5:2024 [2], додаток А) є більш структурованим та надає інженеру-лаборанту чіткі вихідні дані. У таблиці А.1 наведено базовий (стартовий) уміст бітуму та стабілізуювальної добавки для кожного виду ЩМАС. Наприклад, для ЩМАС-15 рекомендовано

починати проектування з 6,0 % бітуму та 0,3 % стабілізуючої добавки. Це значно спрощує та прискорює процес підбирання складу, оскільки початкові дозування вже є науково обґрунтованими та наближеними до оптимальних. Подальший процес передбачає вироблення пробних замесів із незначними варіаціями вмісту бітуму та визначення оптимального складу за графіками залежностей ключових властивостей (вмісту повітряних пор, стікання в'язучого, міцності на стиск) від вмісту бітуму.

Впровадження базових значень вмісту складників є важливим кроком до стандартизації процесу проектування, що дозволяє зменшити вплив людського чинника та підвищити відтворюваність результатів у різних лабораторіях.

Зберігаючи перевірені часом вимоги до структури мінерального каркасу, у новому стандарті ДСТУ 9290-5:2024 [2] зроблено процес проектування складу ЩМАС більш науково обґрунтованим, передбачуваним та уніфікованим. Це нововведення сприятиме підвищенню стабільності якості сумішей та оптимізації роботи асфальтобетонних заводів.

Фізико-механічні властивості асфальтобетону

Перехід на ДСТУ 9290-5:2024 [2] ознаменувався не просто коригуванням, а якісним переглядом підходів до оцінки властивостей ЩМА. Основні зміни стосуються спрощення системи кліматичного районування та, що найважливіше, впровадження нового, орієнтованого на експлуатаційні умови, показника якості.

Спрощення кліматичного районування

Одним з перших кроків, що спрощує роботу з нормативним документом, є зміна підходу до кліматичного районування. У ДСТУ Б В.2.7-127:2015 [1] було використано складну систему з семи кліматичних районів, які об'єднували у складні групи для визначення вимог (наприклад, «А-1, А-2; А-3, А-6»). У ДСТУ 9290-5:2024 [2] зроблено перехід до значно простішої та логічнішої системи з трьох основних кліматичних районів: А-1, А-2 та А-3. Це дозволило зробити таблиці з вимогами більш читабельними та однозначними для інтерпретації.

Порівняння нормативних показників

Аналіз показує, що більшість числових значень для традиційних показників (пористість, водонасичення, міцність) були збережені, але перерозподілені відповідно до нової, спрощеної сітки кліматичних районів.

Наприклад, вимоги до границі міцності на стиск за температури 50 °С для ЩМА-10. У старому стандарті вони складали: більше ніж 0,9 МПа (для районів А-1, А-2, А-3, А-6), більше ніж 1,0 МПа (для районів А-4, А-5) та більше ніж 1,2 МПа (для району А-7). У новому стандарті ці ж значення тепер відповідають новим районам: більше ніж 0,9 МПа (для району А-1), більше ніж 1,0 МПа (для району А-2) та більше ніж 1,2 МПа (для району А-3).

Такий підхід забезпечує спадкоємність накопиченого досвіду, але робить застосування норм простішим. Водночас вимогу до коефіцієнта морозостійкості, що було введено Зміною № 1, збережено і в новому стандарті, що підтверджує її важливість для умов експлуатації в Україні.

Впровадження показника стійкості до колієутворення

Це фундаментальне нововведення ДСТУ 9290-5:2024 [2]. На відміну від попереднього стандарту, в якому зсувостійкість оцінювали лише через опосередковані показники міцності, новий стандарт вводить пряме випробування на опір колієутворенню.

У таблицях 3 та 4 нового стандарту надано нову характеристику — «Глибина колії, мм» з приміткою: «Не нормується. Визначення обов'язкове для накопичення даних». Це є першим і надзвичайно важливим кроком на шляху до впровадження в Україні «performance-based specifications» — технічних умов, заснованих на експлуатаційних показниках. Хоча на даному етапі жорстких критеріїв ще не встановлено, вимога щодо обов'язкового проведення випробування (згідно з ДСТУ EN 12697-22:2022 [9]) дозволить накопичити національну базу даних щодо стійкості різних складів ЩМА до колієутворення, навчити лабораторії проводити сучасні випробування, у майбутньому встановити обґрунтовані нормативні значення глибини колії для різної транспортної

навантаги та умов руху. Цей крок є прямою гармонізацією з європейською практикою, де випробування на колієутворення є одним з основних для асфальтобетонів дорожнього покриття.

Реформування вимог до показників фізико-механічних властивостей у ДСТУ 9290-5:2024 [2] має подвійний ефект. З одного боку, воно спрощує існуючу систему через оптимізування кліматичного районування, зберігаючи при цьому накопичений досвід. З іншого боку, воно робить революційний крок уперед, запроваджуючи обов'язковий контроль за ключовим експлуатаційним показником — стійкістю до колієутворення, що закладає фундамент для майбутнього підвищення довговічності дорожніх покриттів в Україні.

Технологічні аспекти та методи контролю

У новому стандарті ДСТУ 9290-5:2024 [2] впроваджено глибокі зміни у підходи до контролю якості, переводячи галузь від застарілих методик до сучасних, гармонізованих з європейськими. Це стосується як технологічних параметрів вироблення, так і всієї системи лабораторних випробувань та правил приймання продукції.

Температурні режими виробництва та укладання

ДСТУ 9290-5:2024 [2] вносить важливе уточнення, яке робить призначення температурних режимів більш науково обґрунтованим, особливо під час роботи з модифікованими ЩМАС. У старому стандарті було надано рекомендовані температури лише для бітумів марок БНД і загальну примітку, що для модифікованих в'язучих слід керуватися рекомендаціями виробника добавки. Це створювало певну невизначеність.

Новий стандарт установлює диференційований підхід. Таблиця 5 містить режими для немодифікованих бітумів, які в цілому відповідають попереднім нормам. Таблиця 6 є ключовим нововведенням: у ній встановлено температуру вироблення та укладання залежно від температури розм'якшеності модифікованого бітуму. Наприклад, для бітуму з температурою розм'якшеності не нижче ніж 65 °С температура ЩМАС під час відвантаження має бути (170 – 180 °С). Такий підхід є більш об'єктивним, оскільки він прив'язує технологічний параметр до конкретної фізичної властивості в'язучого, що забезпечує кращу оброблюваність та якість ущільнення ЩМАС.

Методи випробування

Це сфера фундаментальних змін. Якщо Зміною №1 до старого стандарту лише розпочато модернізацію, замінивши посилання з ДСТУ Б В.2.7-89-98 [10] на більш актуальний ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [11], то в новому стандарті зроблено повноцінний крок до європейської системи.

У ДСТУ 9290-5:2024 [2] поряд із національним ДСТУ Б В.2.7-319:2016 [11] введено прямі поклики на гармонізовані стандарти серії ДСТУ EN 12697 для визначення ключових показників: умісту в'язучого, характеристик пористості, стійкості до колієутворення та відбирання проб.

У новому стандарті збережено традиційний комбінований метод ущільнення (вібрування + пресування). Однак, в ньому зроблено революційний крок на перспективу, зазначивши: «Допустимо виготовлення зразків ЩМА згідно з ДСТУ EN 12697-31 (гіраторним ущільнювачем) для накопичення статистичних даних...». Це свідчить про запланований перехід на гіраторне ущільнення — світовий стандарт, який значно краще імітує процес ущільнення суміші в реальних дорожніх умовах.

Правила приймання та контроль якості

У новому стандарті суттєво посилено контроль за якістю виробленої продукції.

Найбільший обсяг партії, з якої відбирають пробу для приймально-здавальних випробувань, зменшено вдвічі — з 1 200 тонн у старому стандарті до 600 тонн у новому. Це означає, що за великих обсягів робіт контроль будуть проводити значно частіше.

Положеннями ДСТУ 9290-5:2024 [2] приймальний контроль зроблено більш комплексним. Якщо раніше для великих партій (> 600 т) частину випробувань (водонасичення, міцність на стиск за температури 50 °С) проводили лише для кожної другої проби, то тепер для кожної партії є

обов'язковими випробування не лише зернового складу та вмісту бітуму, а й умісту повітряних пор, водонасичення та границі міцності на стиск за температури 50 °С.

У ДСТУ 9290-5:2024 [2] реформовано всю систему забезпечення якості ЩМА. У ньому впроваджено об'єктивні критерії для технологічних режимів, інтегровано сучасні європейські методи випробувань, підготовлено підґрунтя для переходу на нові методи ущільнення та зроблено поточний контроль якості на заводах значно суворішим та всеосяжним.

Гармонізація з європейськими нормами

Паралельно з прийняттям ДСТУ 9290-5:2024 [2], було введено в дію ще один важливий документ — ДСТУ 9282:2024 [3]. Цей стандарт не замінює, а доповнює картину реформ, демонструючи глибинний рівень гармонізації з нормативною базою Європейського Союзу.

Модель «Рамковий стандарт + Національні вимоги»

ДСТУ 9282:2024 [3] створений як національний додаток до рамкового стандарту ДСТУ EN 13108-5:2018 [4]. Європейський підхід полягає в тому, що основний стандарт надає лише загальну структуру, методи та систему категорій для властивостей матеріалу (наприклад, категорія пористості, категорія стійкості до колієутворення тощо), але не встановлює конкретних числових значень. Кожна країна-член Європейського Союзу самостійно обирає, які саме категорії є обов'язковими на її території, і фіксує цей вибір у національному стандарті або додатку. Саме таку роль і виконує ДСТУ 9282:2024 [3] — він «наповнює» рамковий європейський стандарт конкретними вимогами для застосування в Україні.

Європейська класифікація та категорійний підхід

Аналіз ДСТУ 9282:2024 [3] виявляє повний перехід на європейську систему як у класифікації, так і в методології визначення вимог. На відміну від звичної класифікації (ЩМАС-15, ЩМАС-10) у ДСТУ 9290-5:2024 [2], у цьому стандарті використане європейське маркування за найбільшим номінальним розміром: ЩМАС 16, ЩМАС 11, ЩМАС 8, ЩМАС 4. Це саме та номенклатура, яку використовують у проєктній документації, розробленій за європейськими нормами.

Замість прямих числових діапазонів, ДСТУ 9282:2024 [3] оперує категоріями. Якщо ДСТУ 9290-5:2024 [2] для ЩМА-15 вимагає уміст повітряних пор в межах (1,5 – 4,0) % за об'ємом, то в ДСТУ 9282:2024 [3] для подібного ЩМАС 11 встановлено вимогу через категорії: $V_{\min 2,0}$ (найменша пористість не менше ніж 2,0 % за об'ємом) та $V_{\max 4,5}$ (найбільша пористість не більше ніж 4,5 % за об'ємом).

Такий підхід є більш гнучким і повністю відповідає європейській системі декларування характеристик продукції. Він також поширюється і на вимоги до складників, які встановлюють через категорії або класи.

Паралельне існування двох стандартів (ДСТУ 9290-5:2024 [2] та ДСТУ 9282:2024 [3]) свідчить про перехідний етап у дорожній галузі України. ДСТУ 9290-5:2024 [2] є еволюційним кроком. Він осучаснює і значно покращує існуючу національну систему, роблячи її зрозумілою для виробників, що працювали за старими нормами. ДСТУ 9282:2024 [3] є революційним кроком, що впроваджує «чисту» європейську модель. Він призначений для використання у проєктах, які повністю засновані на європейських стандартах.

Ця двоїста система дозволяє галузі поступово адаптуватися до нових вимог, навчати персонал та модернізувати лабораторне обладнання для повного переходу на європейські стандарти в майбутньому.

Висновки

Проведений порівняльний аналіз положень ДСТУ Б В.2.7-127:2015 та нового ДСТУ 9290-5:2024 дозволяє зробити висновок про те, що впровадження нового стандарту є не просто формальним оновленням, а комплексною та системною реформою підходів до вироблення та контролю якості щebeneво-мастикових асфальтобетонних сумішей асфальтобетонів в Україні. Ця реформа спрямована на підвищення експлуатаційних характеристик дорожнього покриття та глибoku гармонізацію національної нормативної бази з європейською.

Новий стандарт встановлює більш жорсткі та уніфіковані вимоги до якості мінеральних заповнювачів, зокрема до форми зерен щебеню. Водночас нормативна база для в'язучих оновлена з орієнтацією на використання високоякісних модифікованих бітумів згідно з новими стандартами.

Скасування рідкоживаного виду ЦМАС-40 та впровадження рекомендованих базових значень вмісту бітуму та стабілізуючої добавки для початку проектування складу суміші робить цей процес більш уніфікованим, швидким та науково обґрунтованим.

Найбільш революційним нововведенням є впровадження обов'язкового випробування на стійкість до колієутворення (глибина колії). Хоча на першому етапі цей показник не нормують, а лише накопичують для збору даних, цей крок знаменує початок переходу від опосередкованої оцінки властивостей (через міцність) до прямого контролю ключової експлуатаційної характеристики.

ДСТУ 9290-5:2024 офіційно інтегрує в практику українських лабораторій гармонізовані європейські методи випробувань серії EN 12697. Крім того, стандарт сигналізує про майбутній перехід на гіраторний метод виготовлення зразків ЦМА.

Зменшення найбільшого розміру партії вдвічі (з 1200 тонн до 600 тонн) та розширення переліку обов'язкових приймально-здавальних випробувань для кожної партії суттєво підвищують періодичність та ефективність контролю на асфальтобетонних заводах.

Таким чином, новий ДСТУ 9290-5:2024, у комплексі з ДСТУ 9282:2024, формує сучасну, дворівневу нормативну базу. ДСТУ 9290-5:2024 слугує еволюційним інструментом для модернізації існуючих виробництв, тоді як ДСТУ 9282:2024 впроваджує «чисту» європейську модель для інноваційних проєктів.

Успішна імплементація цих стандартів вимагатиме від дорожньої галузі України інвестицій у нове лабораторне обладнання, підвищення кваліфікації інженерного персоналу та адаптації технологічних процесів. Однак у довгостроковій перспективі це дозволить забезпечити стабільно високу якість щебенево-мастикових асфальтобетонів та, як наслідок, підвищити довговічність і надійність автомобільних доріг України.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.7-127:2015 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови. Київ, 2015. 24 с. (Інформація та документація).
2. ДСТУ 9290-5:2024 Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон. Технічні умови. Частина 5. Щебенево-мастикові суміші. Київ, 2024. 19 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ 9282:2024 Бітумомінеральні суміші. Національні вимоги до щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей згідно з ДСТУ EN 13108-5. Київ, 2024. 13 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ EN 13108-5:2018 (EN 13108-5:2016, IDT) Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 5. Щебенево-мастиковий асфальтобетон. Київ, 2018. 32 с. (Інформація та документація).
5. ДСТУ Б В.2.7-76-98 Пісок для будівельних робіт із відсівів подрібнення скельних гірських порід гірничо-збагачувальних комбінатів України. Технічні умови. Київ, 1998. 16 с. (Інформація та документація).
6. ДСТУ Б В.2.7-210:2010 Будівельні матеріали. Пісок із відсівів дроблення вивержених гірських порід для будівельних робіт. Технічні умови. Київ, 2010. 17 с. (Інформація та документація).
7. ДСТУ Б В.2.7-121:2014 Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови. Київ, 2014. 28 с. (Інформація та документація).
8. ДСТУ 9246-1:2023 Заповнювачі для асфальтобетонних сумішей та матеріалів, оброблених бітумним в'язучим. Технічні умови. Частина 1. Наповнювач. Київ, 2023. 17 с. (Інформація та документація).
9. ДСТУ 9116:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Бітуми дорожні, модифіковані полімерами. Технічні умови. Київ, 2021. 15 с. (Інформація та документація).
10. ДСТУ 9133:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Бітуми дорожні, модифіковані комплексами добавок. Технічні умови. Київ, 2021. 13 с. (Інформація та документація).

11. ДСТУ Б В.2.7-319:2016 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. Київ, 2016. 87 с. (Інформація та документація).

References

1. DSTU B V.2.7-127:2015 Sumishi asfal'tobetonni i asfal'tobeton shchebenevo-mastykovi. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2015. 24 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. DSTU 9290-5:2024 Sumishi asfal'tobetonni ta asfal'tobeton. Tekhnichni umovy. Chastyna 5. Shchebenevo-mastykovi sumishi. Kyiv, 2024. 19 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. DSTU 9282:2024 Bitumomineral'ni sumishi. Natsional'ni vymohy do shchebenevo-mastykovykh asfal'tobetonnykh sumishey zhidno z DSTU EN 13108-5. Kyiv, 2024. 13 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
4. DSTU EN 13108-5:2018 (EN 13108-5:2016, IDT) Bitumomineral'ni sumishi. Tekhnichni umovy. Chastyna 5. Shchebenevo-mastykovy asfal'tobeton. Kyiv, 2018. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
5. DSTU B V.2.7-76-98 Pisok dlya budivel'nykh robot iz vidsiviv podribnennya skel'nykh hirs'kykh porid hirnycho-zbahachuval'nykh kombinativ Ukrayiny. Tekhnichni umovy. Kyiv, 1998. 16 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
6. DSTU B V.2.7-210:2010 Budivel'ni materialy. Pisok iz vidsiviv droblennya vyverzhenykh hirs'kykh porid dlya budivel'nykh robot. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2010. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. DSTU B V.2.7-121:2014 Poroshok mineral'nyy dlya asfal'tobetonnykh sumishey. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2014. 28 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
8. DSTU 9246-1:2023 Zapovnyuvachi dlya asfal'tobetonnykh sumishey ta materialiv, obroblenykh bitumnym v'yazhuchym. Tekhnichni umovy. Chastyna 1. Napovnyuvach. Kyiv, 2023. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
9. DSTU 9116:2021 Bitum ta bitumni v'yazhuchi. Bitumy dorozhni, modyfikovani polimeramy. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2021. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
10. DSTU 9133:2021 Bitum ta bitumni v'yazhuchi. Bitumy dorozhni, modyfikovani kompleksamy dobavok. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2021. 13 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
11. DSTU B V.2.7-319:2016 Sumishi asfal'tobetonni i asfal'tobeton dorozhniy ta aerodromnyy. Metody vyprobuvan'. Kyiv, 2016. 87 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Volodymyr Datsenko², Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0002-3944-2610>

Anna Kyrychenko², Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-3783-0804>

Ivan Kopynets¹, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-0908-4795>

Oksana Sokolova¹, <https://orcid.org/0000-0003-4202-8661>

Oleksandr Chechuha², Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0003-1643-6354>

¹State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

²National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

MODERN REQUIREMENTS FOR STONE MASTIC ASPHALT MIXTURES AND STONE MASTIC ASPHALT

Abstract

Introduction. Increasing the durability of pavement structures and harmonizing the national regulatory framework with European standards are key tasks for Ukraine's road sector. The quality of stone mastic asphalt (SMA), as one of the most effective materials for surface courses, directly depends on the relevance of regulatory requirements. In Ukraine, these requirements were standardized by

DSTU B V.2.7-127:2015 until 2024. However, in order to introduce modern approaches, a new standard, DSTU 9290-5:2024, has been developed and adopted.

Problem Statement. Analysis shows that the requirements of DSTU B V.2.7-127:2015, although providing a basic quality level, had a number of shortcomings: insufficiently strict requirements for the geometric characteristics of aggregates, reliance on outdated nomenclature of bituminous binders, and most importantly, the absence of testing methods directly assessing asphalt performance, in particular rutting resistance. Such discrepancies with European practice restrained the real service life improvement of road pavements.

Objective. To carry out a detailed comparative analysis of the requirements for stone mastic asphalt mixtures and SMA according to DSTU B V.2.7-127:2015 and the new DSTU 9290-5:2024, in order to identify key innovations and scientifically substantiate their impact on improving road construction quality.

Methods. A comparative analysis of regulatory documents was conducted, including classification, requirements for components (aggregates, binders, additives), grading curves, physical and mechanical properties, as well as technological aspects and quality control methods.

Results. It was established that the new DSTU 9290-5:2024 introduces fundamental changes. Requirements for aggregate particle shape were strengthened. The regulatory framework for binders was updated, emphasizing modern modified bitumens. The most important innovation is the introduction of mandatory rutting resistance testing, marking the first step towards performance-based evaluation. In addition, quality control was significantly reinforced by halving the batch size and integrating modern European testing methods from the EN 12697 series.

Conclusions. The analysis proves that DSTU 9290-5:2024 is not merely an update but a systemic reform, marking the transition from a predominantly prescriptive approach to a performance-oriented one. The implementation of the new standard provides the regulatory foundation for producing more durable SMA and ensures deep harmonization with the European technical framework, which is a necessary condition for improving the quality and reliability of Ukraine's road network.

Keywords: stone mastic asphalt, stone mastic asphalt mixture, regulatory requirements, standard harmonization, DSTU B V.2.7-127:2015, DSTU 9290-5:2024, rutting resistance, pavement quality.

УДК 691.32

Кровяков С. О.¹, д-р техн. наук, професор, <http://orcid.org/0000-0002-0800-0123>

Ігнатенко А. В.², канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0001-9222-1051>

Фіногенов О. І.³, <http://orcid.org/0009-0005-3631-4786>

Лапіна О. І.¹, канд. техн. наук, доцент, <http://orcid.org/0000-0002-4081-8187>

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури (ОДАБА), м. Одеса, Україна

²Черкаський державний технологічний університет (ЧДТУ), м. Черкаси, Україна

³Товариство з обмеженою відповідальністю «Ростдорстрой» (ТОВ «РДС»), м. Одеса, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ФІБРОБЕТОНУ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Анотація

Вступ. Забезпечення необхідного рівня міцності, морозостійкості та зносостійкості дозволяє досягнути високої довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів. Одним з ефективних методів покращення означених фізико-механічних показників є дисперсне армування. Проте в реальних економічних умовах важливо оцінювати ефективність конкретного типу дисперсного армування також з врахуванням його впливу на собівартість матеріалу. Використання комплексу експериментально-статистичних моделей, побудованих за результатами реалізації планованого експерименту, дозволяє проводити обґрунтований вибір оптимальних складів фібробетонів для покриттів автодоріг.

Проблематика. Ефективність використання дисперсного армування суттєво залежить від властивостей бетонної матриці, на які впливає склад бетону, технологія його приготування тощо. Кількість дисперсної арматури, яка забезпечує найкраще зростання міцності бетону, не завжди є раціональною з економічної точки зору. До бетонів покриттів автомобільних доріг висувається низка вимог щодо міцності, морозостійкості, стиранисті. Забезпечити відповідність цим вимогам можна за різних варіантів складів бетонів і фібробетонів, кожен з яких буде мати свої особливості. Тому задача оптимізації складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття з врахуванням сучасних вимог до матеріалу та економічних чинників є актуальною.

Мета. Визначення оптимального складу фібробетону, який задовольняє вимогам до матеріалу жорсткого дорожнього покриття для автомобільних доріг Іа категорії та має найменшу собівартість.

Результати. За оптимальним планом проведений експеримент, в якому варіювалися 3 чинники складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття: кількість цементу від 300 кг/м³ до 380 кг/м³, кількість поліпропіленової фібри від 0 кг/м³ до 3,0 кг/м³, кількість пластифікатора лігносульфонатного типу від 0,6 % до 1,0 % від маси цементу. Розраховано комплекс експериментально-статистичних моделей, які описують вплив варійованих чинників на міцність бетону на стиск, міцність на розтяг при згині, морозостійкість, стиранисті і собівартість 1 м³. З використанням даних моделей проведено вибір оптимального складу фібробетону, який задовольняє вимогам до матеріалу покриттів доріг Іа категорії та має мінімальну собівартість. Для реалізації вибору за комплексом ЕС-моделей було побудовано 17 двофакторних діаграм типу «квадрат» з осями Х₂ (кількість фібри) і Х₃ (кількість пластифікатора). Квадрати будували за 17 рівних зафіксованих рівнях чинника х₁, що відповідає всьому діапазону варіювання кількості цементу з кроком 5 кг/м³. Така дискретизація дозволяє наочніше і точніше здійснити вибір оптимального рішення. Обрано склад фібробетону, що містить поліпропіленову фібру у кількості 0,36 кг/м³, що менше за кількість, яка забезпечує найвищі показники міцності, морозостійкості та зносостійкості. Проте з врахуванням особливостей роботи дисперсної арматури в бетонній матриці та з врахуванням ринкових цін на компоненти бетонної суміші саме такий склад є оптимальним.

Висновки. З використанням комплексу експериментально-статистичних моделей графічним методом обрано оптимальний склад фібробетону жорсткого дорожнього покриття. Обраний склад забезпечує необхідні рівні міцності, морозостійкості та стиранисті для покриттів доріг Ia і має мінімальну собівартість.

Ключові слова: автомобільна дорога, зносостійкість, жорсткий дорожній покриття, експериментально-статистичне моделювання, міцність, морозостійкість, оптимізація, поліпропіленова фібра.

Вступ

Застосування жорстких цементобетонних покриттів в Україні було вкрай обмеженою практикою, яка склалася історично. Це пояснюється достатню невисоким навантаження на вісь автомобіля, відносно не великою інтенсивністю руху та доступністю дешевих бітумів в минулі десятиріччя. У другому десятиріччі ХХІ сторіччя ситуація почала змінюватися і завдяки відчутним експлуатаційним перевагам в умовах великих навантажень все частіше застосовуються цементобетонні покриття. Основною перевагою жорстких покриттів перед асфальтобетонними є їх більша довговічність, що обумовлює економічну доцільність використання цементобетонів попре дещо вищу вартість влаштування [1]. Також цементобетонні покриття є стійкими до утворення колій та хвиль, а їх властивості майже не залежать від температурних коливань.

Досвід будівництва та експлуатації автомобільних доріг із цементобетонним покриттям показав високу ефективність застосування фібробетонів для влаштування покриттів [2, 3]. В якості дисперсної арматури в дорожньому будівництві використовують різні типи волокон, але переважно полімерні, сталі, базальтові та скляні [4-6]. Використання сталевих фібри дозволяє суттєво покращити рівень більшості важливих для бетонів дорожніх покриттів фізико-механічних показників. Проте через необхідність використовувати сталі волокна у кількості від 25 м до 100 кг на 1 м³ суміші такий тип дисперсного армування є дорогим. Тому на практиці більш широко використовують інші типи фібри, насамперед полімерні. Полімерна фібра є ефективною в умовах багаторазового навантаження, що важливо для конструкцій автодоріг [7].

У сучасних умовах фактично всі бетонні і фібробетонні суміші виготовляються з використанням пластифікаторів того чи іншого типу [6, 8]. Проте ефективність пластифікаторів залежить від рецептурно-технологічних особливостей складу бетону, зокрема типу цементу і рухомості суміші [9]. Тому при дослідженні властивостей фібробетонів також важливо враховувати вплив типу і кількості пластифікатора як чинника, що в значній мірі визначає властивості бетонної матриці.

Незважаючи на великий досвід розроблення складу бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів залежно від вимог до матеріалу та використаних матеріалів, для приготування суміші необхідно проводити оптимізацію складу бетону для кожного конкретного типу конструкції [10, 11]. При вирішенні задачі пошуку оптимального складу композиційного матеріалу, включаючи бетон і фібробетон, ефективним є використання методів планування експерименту й експериментально-статистичного моделювання [11, 12]. Застосування означених методів дозволяє отримати комплекс адекватних експериментально-статистичних (ЕС) моделей, що відображають вплив варіюваних досліджених чинників складу композиційного матеріалу на його експериментально визначені властивості. За даним комплексом проводиться багатокритеріальна оптимізація складу композиційного матеріалу.

Матеріали та методика дослідження

Експериментальні дослідження властивостей бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів проводили за D-оптимальним 15-ти точковим планом [11, 12]. Варіювали 3 наведені нижче чинники складу бетонів:

X₁, кількість цементу ПЦ II/A-III 500 P-H, від 300 кг/м³ до 380 кг/м³;

X₂, кількість поліпропіленової фібри X Mesh (довжина волокон 39 мм, еквівалентний діаметр 0,45 мм), від 0 кг/м³ до 3,0 кг/м³;

Х₃, кількість пластифікатора Sika® Plastiment®-1230 (виробляється на базі лігносульфонатів), від 0,6 % до 1,0 % від маси цементу.

В якості заповнювачів використовував гранітний щебінь фракції 5-20 мм і митий кварцовий пісок з модулем крупності 2,4.

Усі бетонні суміші мали рівну рухомість S1 при ОК від 2 см до 3 см, що досягалося підбором кількості води при відповідному коригуванні складу бетону. План 3-х факторного експерименту і складу досліджених бетонів і фібробетонів наведені в **табл. 1**.

Таблиця 1

План експерименту і складу досліджених бетонів і фібробетонів

№ складу	Рівні варійованих чинників			Склади досліджених бетонів і фібробетонів (кг/м ³)					
	х ₁ , цемент	х ₂ , фібра	х ₃ , пластифікатор	Цемент	Щебінь	Пісок	фібра X Mesh	Пластифікатор Plastiment®-1230	вода
1	-1	-1	-1	300	1 230	825	0	1,80	132
2	-1	-1	1			840		3,00	118
3	-1	0	0			833	1,5	2,40	123
4	-1	1	-1			815	3,0	1,80	138
5	-1	1	1			829		3,00	126
6	0	-1	0	340	1 210	792	0	2,72	138
7	0	0	-1			784	1,5	2,04	142
8	0	0	0			788		2,72	136
9	0	0	1			793	3,0	3,40	132
10	0	1	0			788		2,72	136
11	1	-1	-1	380	1 190	751	0	2,28	149
12	1	-1	1			760		3,80	142
13	1	0	0			752	1,5	3,04	146
14	1	1	-1			746	3,0	2,28	153
15	1	1	1			753		3,80	147

Для кожного з досліджених складів бетонів і фібробетонів визначала міцність на стиск і на розтяг при згині згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [13], стійкість до стирання згідно з ДСТУ Б В.2.7-212:2009 [14], морозостійкість згідно з [15]. Визначені рівні зазначених фізико-механічних показників, а також розрахована в цінах квітня 2025 року собівартість досліджених бетонів і фібробетонів в 15 контрольних точках, наведені в **табл. 2**.

Таблиця 2

План експерименту і складу досліджених бетонів і фібробетонів

№ складу	Міцність на стиск (f_{cm}), МПа	Міцність на розтяг при згині (f_{ctf}), МПа	Стираність (G), г/см ²	Морозостійкість (F), цикли	Собівартість (Св), грн/м ³
1	47,5	4,61	0,441	F100	2 984,16
2	51,8	4,92	0,437	F150	3 083,99
3	51,9	5,05	0,394	F150	3 379,30
4	52,1	5,02	0,386	F150	3 669,16

№ складу	Міцність на стиск (f_{cm}), МПа	Міцність на розтяг при згині ($f_{c,tf}$), МПа	Стіраність (G), г/см ²	Морозостійкість (F), цикли	Собівартість (Св), грн/м ³
5	53,5	5,22	0,359	F200	3 768,51
6	58,3	5,40	0,423	F150	3 264,47
7	57,9	5,57	0,367	F150	3 553,09
8	60,2	5,93	0,359	F200	3 607,40
9	61,2	6,01	0,348	F200	3 662,24
10	59,1	6,12	0,336	F200	3 952,40
11	56,7	5,82	0,415	F150	3 436,05
12	63,1	6,00	0,404	F200	3 557,57
13	65,9	6,32	0,343	F250	3 840,04
14	61,1	6,23	0,339	F200	4 123,57
15	66,7	6,57	0,332	F250	4 244,08

Аналіз впливу варійованих чинників на властивості бетонів і фібробетонів, а також більш детальна інформація щодо методів дослідження, наведені в статтях нашого авторського колективу [16, 17].

Результати досліджень

За наведеними у **табл. 2** даними було розраховано комплекс адекватних експериментально-статистичних (ЕС) моделей [12], що описують вплив варійованих чинників складу на властивості бетонів і фібробетонів:

$$f_{cm} \text{ (МПа)} = 60,24 + 5,67x_1 - 1,38x_1^2 \pm 0x_1x_2 + 0,77x_1x_3 + 1,50x_2 - 1,57x_2^2 - 0,46x_2x_3 + 2,10x_3 - 0,74x_3^2. \quad (1)$$

$$f_{c,tf} \text{ (МПа)} = 5,87 + 0,61x_1 - 0,17x_1^2 \pm 0,03x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,24x_2 - 0,09x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 0,15x_3 - 0,06x_3^2. \quad (2)$$

$$F \text{ (цикли)} = 191 + 30x_1 + 11x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 25x_2 - 14x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 25x_3 - 14x_3^2. \quad (3)$$

$$G \text{ (гр/см}^2\text{)} = 0,358 - 0,018x_1 + 0,010x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 - 0,037x_2 + 0,021x_2^2 - 0,002x_2x_3 - 0,007x_3 \pm 0x_3^2. \quad (4)$$

$$Св \text{ (грн/м}^3\text{)} = 3\,608,29 + 231,26x_1 + 1,09x_1^2 + 0,56x_1x_2 + 5,36x_1x_3 + 343,15x_2 \pm 0x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 55,04x_3 - 0,92x_3^2. \quad (5)$$

У ЕС-моделях (1)-(5) чинники x_1 - x_3 представлені у нормалізованому діапазоні від -1 до +1 [11, 12].

Відомо декілька методів вибору оптимальних рішень за отриманим комплексом ЕС-моделей, зокрема методів вибору оптимальних складів композитних матеріалів. Основними з них є графічний метод та метод Монте-Карло [12, 18]. Графічний метод є більш наочним, що важливо для реальної інженерної практики.

У даному дослідженні для реалізації вибору за ЕС-модями (1) – (5) було побудовано 17 двофакторних діаграм типу «квадрат» з осями X_2 (кількість фібри) і X_3 (кількість пластифікатора). Квадрати будували при відповідних 17 зафіксованих рівнях чинника x_1 від -1 до $+1$ з кроком $0,125$, що відповідає всьому діапазону варіювання кількості цементу від 300 кг/м^3 до 380 кг/м^3 з кроком 5 кг/м^3 . Тобто 300 кг/м^3 , 305 кг/м^3 , 310 кг/м^3 і так далі (рис. 1, рис. 2).

Для задач з 3-ма варійованими чинниками також можливим є вибір оптимальних рішень за тривимірною діаграмою типу «куб», яка охоплює весь 3-х факторний простір експерименту. Проте при одночасному відображенні на діаграмі такого типу ізоперхонь декількох показників завдяки передачі тривимірного простору на площині пошук рішень стає складним і менш точним. Саме за цією причиною в даному дослідженні було застосовано прийом представлення факторного простору у вигляді набору діаграм типу «квадрат». Така дискретизація має незначний недолік, а саме не розглядаються склади з проміжною кількістю цементу, не кратною 5 кг/м^3 , проте дозволяє наочніше і точніше проводити пошук оптимальних рішень. У фактичних промислових умовах дискретизація на рівні дозування цементу 5 кг/м^3 є допустимою.

Жорсткі дорожні покриття використовують переважно на найбільш завантажених дорогах. Відповідно було здійснено пошук оптимальних складів фібробетонів для доріг категорії Іа. З врахуванням вимогам ДБН В.2.3-4:2015 (додаток К) [19] і ДСТУ 8858:2019 [20] якості критеріїв обмеження використовували такі значення фізико-механічних характеристик:

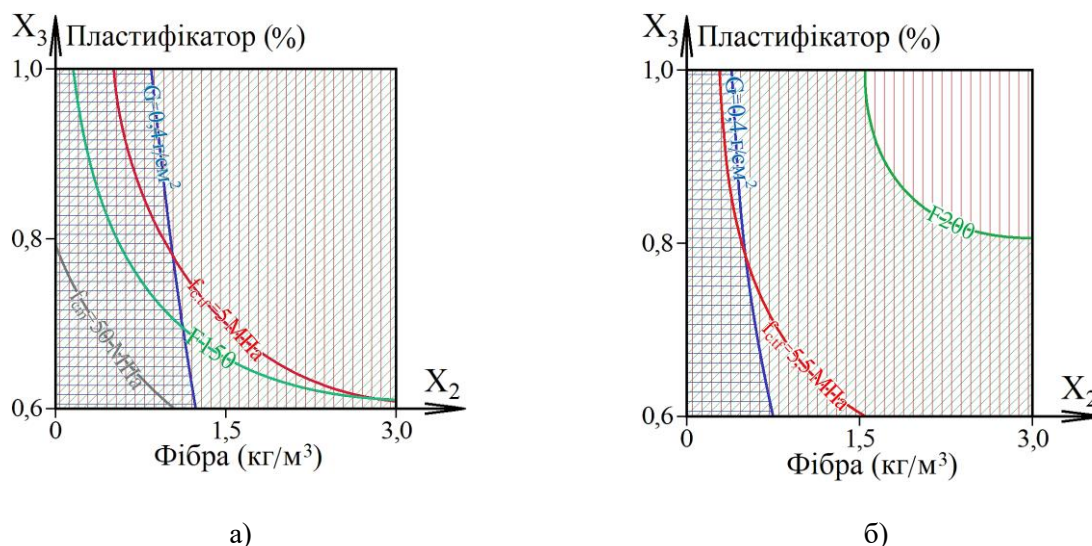
- міцність на стиск f_{cm} не менш 50 МПа (клас В40, С32/40);
- міцність на розтяг при згині $f_{c,tf}$ не менш $6,0 \text{ МПа}$ (клас В_{тб}4,8);
- морозостійкість F не нижче марки F200;
- стиранисть G не вище $0,40 \text{ г/см}^2$ (марка за стиранистю G2).

В якості критерію оптимізації використовувала собівартість 1 м^3 бетону. Даний критерій був обраний з врахуванням того, що в реальній практиці доволі часто виникає питання раціональності використання той або іншої кількості достатньо дорогої фібри. Відомо, що ефективність дисперсного армування суттєво залежить від властивостей бетонної матриці, на які впливає зокрема кількість цементу [7]. Фактично доволі часто кількість дисперсної арматури, яка забезпечує найвищі показники міцності фібробетону, не є раціональною з врахування як вимог до матеріалу відповідної конструкції, так і з врахуванням можливості досягти аналогічного рівня фізико-механічних властивостей при меншій кількості фібри, проте іншому складі бетону.

При виборі рішення ті частини факторного простору діаграм, які не відповідали критеріям обмеження за міцністю, морозостійкістю і стиранистю заштриховували відповідним кольором. Для міцності на стиск — сірим; для міцності на розтяг при згині — червоним; для морозостійкості — зеленим; для стиранисті — синім. Побудовані за ЕС-моделлю (5) ізолінії собівартості 1 м^3 фібробетону показані у не заштригованих зонах діаграм фіолетовим кольором.

Пошук оптимального складу проводили покроковим аналізом 17-ти побудованих двофакторних діаграм. Як видно з діаграм (рис. 1), що відображають властивості фібробетонів жорстких покриттів при кількості цементу у складі від 300 кг/м^3 до 330 кг/м^3 , за даного діапазону жоден склад не забезпечує виконання всього комплексу критеріїв обмеження. На рис. 1 відображені 2-і з 7-ми побудованих діаграм у діапазоні від $x_1 = -1$ (цементу 300 кг/м^3) до $x_1 = -0,25$ (цементу 330 кг/м^3). Наприклад як видно з рис. 1. а (мінімальна кількість цементу) навіть за використання максимальної кількості фібри і пластифікатора немає складів фібробетонів, що мають морозостійкість не нижче F200 та міцність на розтяг при згині не нижче 6 МПа . За кількості цементу 330 кг/м^3 (рис. 1. б) вже існує область, що забезпечує морозостійкість F200 і вище, проте жоден склад не забезпечує міцність на розтяг при згині не нижче 6 МПа .

На рис. 2 відображені діаграми, які використовували в подальшому аналізі. Як видно з рис. 2. а, при кількості цементу у суміші 335 кг/м^3 вже існує область рішень, що задовольняє всьому комплексу критеріїв обмеження. У даній області обрано склад № 1, координата якого зазначена на діаграмі жовтим колом з відповідною позначкою «1». Проте даний склад не є оптимальним, тому що собівартість 1 м^3 фібробетону складу № 1 дорівнює 3910 грн/м^3 , що обумовлено значною кількістю фібри ($2,85 \text{ кг/м}^3$) і пластифікатора (майже 1% від маси цементу або $3,3 \text{ кг/м}^3$).



- а) $x_1 = -1$, кількість цементу 300 кг/м³;
 б) $x_1 = -0,25$, кількість цементу 330 кг/м³.

Рисунок 1 — Відсутні складів фібробетонів, що відповідають висунутим критеріям обмеження при кількості цементу до 330 кг/м³

Проведений надалі аналіз діаграм, що відображають властивості фібробетонів при поступовому збільшенні кількості цементу показав (**рис. 2. б – рис. 2. є**), що при зростанні дозування цементу з 335 кг/м³ до 365 кг/м³ собівартість 1 м³ фібробетону, що забезпечує необхідні рівні міцності, морозостійкості та стиранисті, поступово знижується. На **рис. 2** наведені 7-м з 10-ти проаналізованих діаграм (ще 7 були проаналізовані раніше, частина наведена на **рис. 1**). На кожній діаграмі обирали склад із найменшою собівартістю в межах факторного простору відповідної діаграми. А саме:

- склад № 2 (**рис. 2. б**, кількість цементу 340 кг/м³) має собівартість 3 775 грн/м³;
- склад № 3 (**рис. 2. в**, кількість цементу 345 кг/м³) має собівартість 3 680 грн/м³;
- склад № 4 (на **рис. 2** не відображений, кількість цементу 350 кг/м³) має собівартість 3 630 грн/м³;
- склад № 5 (**рис. 2. г**, кількість цементу 355 кг/м³) має собівартість 3 595 грн/м³;
- склад № 6 (на **рис. 2** не відображений, кількість цементу 360 кг/м³) має собівартість 3 580 грн/м³;
- склад № 7 (**рис. 2. д**, кількість цементу 365 кг/м³) має собівартість 3 565 грн/м³;
- склад № 8 (**рис. 2. е**, кількість цементу 370 кг/м³) має собівартість 3 570 грн/м³;
- склад № 9 (на **рис. 2** не відображений, кількість цементу 375 кг/м³) має собівартість 3 580 грн/м³;
- склад № 10 (**рис. 2. є**, кількість цементу 380 кг/м³) має собівартість 3 585 грн/м³.

Таким чином, найменшу собівартість має склад № 7, який можна визнати оптимальним. Координати обраного складу у факторному просторі експерименту, повні відомості про склад фібробетону та його прогнозовані властивості наведені в **табл. 3**. Можна відмітити, що даний склад містить кількість поліпропіленової фібри, яка є меншою за ту, що забезпечувала найвищі показники міцності, морозостійкості та зносостійкості (мінімальній стиранисті). Проте з врахуванням особливостей роботи дисперсної арматури в бетонній матриці, яка залежить зокрема від її міцності, а також з врахуванням фактичних ринкових цін на компоненти бетонної суміші саме такий склад є оптимальним.

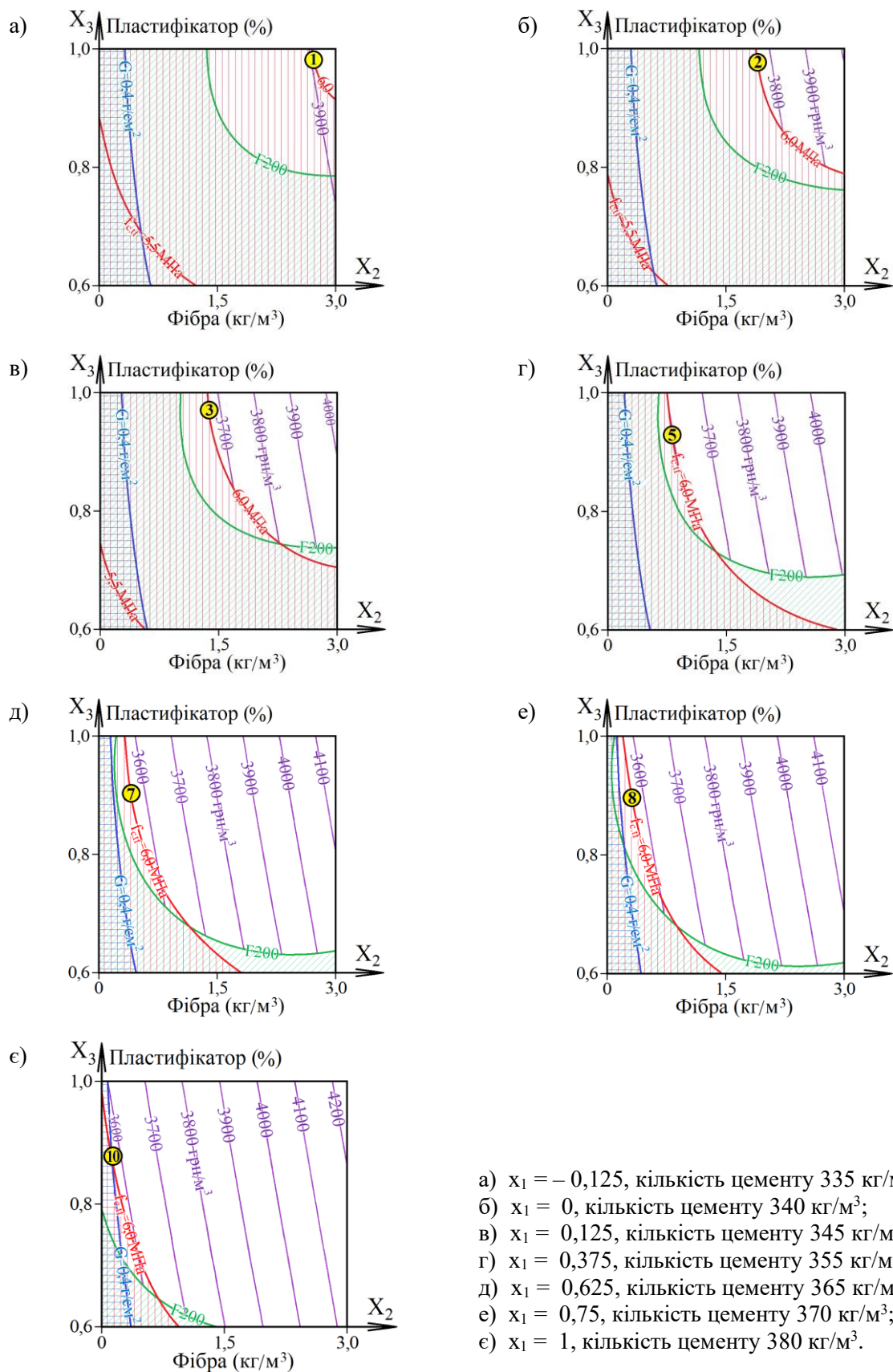


Рисунок 2 — Пошук оптимального складу фібробетону жорсткого дорожнього покриття

Таблиця 3

Обраний оптимальний склад фібробетону та його фізико-механічні властивості

Координати обраного складу у факторному просторі експерименту	Склад фібробетону	Фізико-механічні властивості, собівартість
$x_1 = 0,375$ $x_2 = -0,740$ $x_3 = 0,505$	Цемент 365 кг/м ³ ; Щебінь 1 198 кг/м ³ ; Пісок 763 кг/м ³ ; Фібра 0,360 кг/м ³ ; Пластифікатор 3,35 кг/м ³ (0,91 %); Вода 143 л/м ³	Міцність на стиск 62,2 МПа; Міцність на розтяг при згині 6,0 МПа; Морозостійкість F200; Стираність 0,39 г/см ² ; Собівартість 3565 грн/м ³

Також важливо відзначити, що даний обраний склад є оптимальним саме з позиції його застосування в бетонах жорстких дорожніх покриттів доріг Іа категорії з врахуванням собівартості як критерію оптимальності. За інших критеріїв оптимальності, наприклад мінімізації вуглецевого сліду [21], оптимальний склад фібробетону буде іншим.

Висновки

З використанням комплексу адекватних ЕС-моделей, що описують вплив кількості цементу, фібри і пластифікатора на властивості бетону жорсткого дорожнього покриття, проведена багатокритеріальна оптимізація та обрано оптимальний склад фібробетону для покриттів автомобільних доріг Іа категорії. Даний склад має найменшу собівартість при забезпеченні необхідної міцності, морозостійкості та зносостійкості матеріалу. Застосування фібробетону забезпечує високу довговічність покриття в типових для України кліматичних умовах, що важливо з позиції подальших експлуатаційних витрат.

Список літератури

1. Цинка А. О., Зеленовський В. А., Райковський В. Ф., Гамеляк І. П., Рибальченко С. А. Перспективи застосування жорсткого дорожнього одягу під час будування автомобільних доріг та удосконалення його конструювання і розрахунку. *Дороги і мости*. 2024, Вип. 30. С. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.105>.
2. Talmale P. P., Solanke S., Baktiwale V. V. Application of fiber blended cement in rigid pavement. *AIP Conference Proceedings*, 2024, 2974(1), 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0187804>.
3. Eisa M. S., Basiouny M. E., Youssef A. M. Effect of macro-synthetic fibers on the drying shrinkage performance of rigid pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6, 212. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00577-y>.
4. Shakir H. M., Al-Tameemi A. F., Al-Azzawi A. A. A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1895, 012053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012053>.
5. Lau C. K., Chegenizadeh A., Htut T. N. S., Nikraz H. Performance of the Steel Fibre Reinforced Rigid Concrete Pavement in Fatigue. *Buildings*, 2020, 10, 186. <https://doi.org/10.3390/buildings10100186>.
6. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O., Bobetsky Y. Nanomodified Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Enhanced Operational Characteristics.. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024, 438. P. 362–371. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-036>.
7. Santhosh J. C., Samal S. R., Ganesh V. N., Pavani D., Sridhar R.S. Experimental Investigation on the Effect of Polypropylene Fibers with Respect to the Fatigue Behavior of Rigid Pavement. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, 207, P. 383–395. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-631>.
8. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucińska T., Rykhlytska O. Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 6, (6 (102), P. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111>.
9. Alonso M. M., Palacios M., Puertas F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1), P.151–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020>.

10. Гамеляк І. П., Шургая А. Г., Якименко Я. М., Чиженко Н. П. Математичні моделі властивостей високоміцних бетонів для дорожнього будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2017, № 169, С. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084>.
11. Дворкін Л. Й. Експериментально-статистичне моделювання при проектуванні складів бетонів. К.: Кондор. 2020. 205 с.
12. Ляшенко Т. В., Вознесенский В. А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одеса: *Астропрінт*, 2017. 168 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ, 2010. 43 с. [Чинний від 01.09.2010]. (Інформація та документація).
14. ДСТУ Б В.2.7-212:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення стираності. Київ, 2010. 9 с. [Чинний від 01.09.2010]. (Інформація та документація).
15. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. Київ, 1996. 9 с. [Чинний від 01.09.2010]. (Інформація та документація).
16. Kroviakov S., Finohenov O., Ihnatenko A. Determination of the effect of the amount of polypropylene fiber and plasticizer on the strength and abrasion resistance of concretes for rigid pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, 2 (6 (134)), P. 53–60 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322590>.
17. Лапіна О. І., Фіногенов О. І. Дослідження та експериментально-статистичне моделювання впливу складу на морозостійкість фібробетонів покриттів автомобільних доріг. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2025, 11, С. 98-106. DOI: <http://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-11-98-106>.
18. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A., Orešković M. Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation. *Materials*, 2023, 16, 2846. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072846>.
19. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. 91 с. [Чинний від 2016-04-01]. (Інформація та документація).
20. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. 16 с. [Чинний від 2020-07-01]. (Інформація та документація).
21. Khan M.Saq., Khan M. Sar., Khan M. I., Al-Nawasir R., Maureira-Carsalade N., Avudaiappan S., Choudhry R.M. Enhancing rigid pavement performance: Experimental study and design optimization of bentonite clay-blended concrete with a focus on durability. *Case Studies in Construction Materials*. 2025, 22, e04641. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04641>.

References

1. Tsynka A. O., Zelenovsky V. A., Raykovskiy V. F., Gamelyak I. P., Rybalchenko S. A. Perspektyvy zastosuvannya zhorstkoho dorozhn'oho odyahu pid chas buduvannya avtomobil'nykh dorih ta udoskonalennya yoho konstruyuvannya i rozrakhunku. [Prospects for the use of rigid road surfaces during the construction of highways and the improvement of its design and calculation]. *Roads and Bridges*. 2024, Issue 30. P. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.105> [in Ukrainian].
2. Talmale P. P., Solanke S., Baktiwale V. V. Application of fiber blended cement in rigid pavement. *AIP Conference Proceedings*, 2024, 2974(1), 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0187804> [in English].
3. Eisa M. S., Basiouny M. E., Youssef A. M. Effect of macro-synthetic fibers on the drying shrinkage performance of rigid pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2021, 6, 212. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00577-y> [in English].
4. Shakir H. M., Al-Tameemi A. F., Al-Azzawi A. A. A review on hybrid fiber reinforced concrete pavements technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1895, 012053 DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1895/1/012053> [in English].
5. Lau C. K., Chegenizadeh A., Htut T. N. S., Nikraz H. Performance of the Steel Fibre Reinforced Rigid Concrete Pavement in Fatigue. *Buildings*, 2020, 10, 186. <https://doi.org/10.3390/buildings10100186>.
6. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Vakhula O., Bobetsky Y. Nanomodified Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Enhanced Operational Characteristics.. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2024, 438. P. 362–371. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_36 [in English].

7. Santhosh J. C., Samal S. R., Ganesh V. N., Pavani D., Sridhar R.S. Experimental Investigation on the Effect of Polypropylene Fibers with Respect to the Fatigue Behavior of Rigid Pavement. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, 207, P. 383-395. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-7509-6_31 [in English].
8. Kropyvnytska T., Sanytsky M., Rucińska T., Rykhlitska O. Development of nanomodified rapid hardening clinker-efficient concretes based on composite Portland cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 6, (6 (102), P. 38–48. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185111> [in English].
9. Alonso M. M., Palacios M., Puertas F. Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1), P.151-162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.020> [in English].
10. Gameliak I., Shurgaya A., Jakymenko Ja., Chyzenko N. Matematychni modeli vlastyvostrych vysokomitsnykh betoniv dlya dorozhn'oho budivnytstva [Mathematical models of properties of high-strength concretes for road construction]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2017, No. 169, P. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111084> [in Ukrainian].
11. Dvorkin L. Y. Eksperymental'no-statystychni modelyuvannya pry proektuvanni skladiv betoniv [Experimental and statistical modeling in the design of concrete compositions]. K.: Condor. 2020. 205 p. [in Ukrainian].
12. Lyashenko T. V., Voznesensky V. A. Methodology of recipe and technological fields in computer-aided construction materials science [Metodolohyya retsepturno-tekhnolohycheskykh poley v komp'yuternom stroitel'nom materyalovedenny]. Odesa: Astropoint, 2017. 168 p. [in Ukrainian].
13. DSTU B V.2.7-214:2009. Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrol'nyimi zrazkami [Building materials. Concretes. Methods of determining strength according to control samples]. Kyiv, 2010. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
14. DSTU B V.2.7-212:2009 Budivel'ni materialy. Betony. Metody vyznachennya styranosti [Building materials. Concretes. Methods for determining abrasion resistance]. Kyiv, 2010. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
15. DSTU B V.2.7-49-96. Budivel'ni materialy. Betony. Pryskoreni metody vyznachennya morozostiykosti pry bahatorazovomu zamorozhuvanni ta vidtavanni [Building materials. Concretes. Accelerated methods of determining frost resistance during repeated freezing and thawing]. Kyiv, 1996. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
16. Kroviakov S., Finohenov O., Ihnatenko A. Determination of the effect of the amount of polypropylene fiber and plasticizer on the strength and abrasion resistance of concretes for rigid pavement. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2025, 2 (6 (134)), P. 53–60 DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322590> [in English].
17. Lapina O. I., Finohenov O. I. Doslidzhennya ta eksperymental'no-statystychni modelyuvannya vplyvu skladu na morozostiykist' fibrobetoniv pokryttiv avtomobil'nykh dorih [Analysis and experimental statistical modeling of the composition effect on the frozen resistance of fibre concretes for road pavements]. *Modern construction and architecture*. 2025, 11, P. 98-106. DOI: <http://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-11-98-106> [in Ukrainian].
18. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A., Orešković M. Modelling the Influence of Composition on the Properties of Lightweight Plaster Mortar and Multicriteria Optimisation. *Materials*, 2023, 16, 2846. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16072846> [in English].
19. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannya. Chastyna II. Budivnytstvo [Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction]. Kyiv, 2015. 91 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
20. DSTU 8858:2019. Sumishi tsementobetonni dorozhni ta tsementobeton dorozhniy. Tekhnichni umovy [Cement-concrete road mixtures and cement-concrete road. Technical conditions]. Kyiv, 2019. 16 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
21. Khan M. Saq., Khan M. Sar., Khan M. I., Al-Nawasir R., Maureira-Carsalade N., Avudaiappan S., Choudhry R. M. Enhancing rigid pavement performance: Experimental study and design optimization of bentonite clay-blended concrete with a focus on durability. *Case Studies in Construction Materials*. 2025, 22, e04641. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04641> [in English].

Sergii Kroviakov¹, D.Sc., Professor, <http://orcid.org/0000-0002-0800-0123>

Andrii Ihnatenko², Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0001-9222-1051>

Oleg Finohenov³, <http://orcid.org/0009-0005-3631-4786>

Olga Lapina¹, Ph.D., Associate Professor, <http://orcid.org/0000-0002-4081-8187>

¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (OSACEA), Odesa, Ukraine

²Cherkasy State Technological University (CSTU), Cherkasy, Ukraine

³Limited liability company «Rostdorstroy» (LLC «RDS»), Odesa, Ukraine

OPTIMISATION OF THE COMPOSITION OF FIBRE-REINFORCED CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT USING A SET OF EXPERIMENTAL-STATISTICAL MODELS

Abstract

Introduction. The requisite strength, frost resistance, and abrasion resistance allow for a high operating life of concrete for rigid pavements. One of the effective methods to improve these physical and mechanical properties is dispersed reinforcement. However, under real economic conditions, it is important to evaluate the effectiveness of a specific type of dispersed reinforcement, considering its impact on the production cost of the material. The use of a set of experimental-statistical models, which are based on the results of the designed experiment, enables us to make a sound selection of optimal compositions of fibre-reinforced concrete for road pavement.

Problems. The effectiveness of dispersed reinforcement significantly depends on concrete matrix properties influenced by the concrete's composition, production technology, etc. The amount of dispersed reinforcement that provides the best increase in concrete strength is not always economically rational. Some requirements are imposed on road pavement concrete regarding strength, frost resistance, and abrasion resistance. Compliance with these requirements can be achieved through various designs of concrete mix and fibre-reinforced concrete, each with its own characteristics. Therefore, optimising the composition of fibre-reinforced concrete for rigid road pavements, taking into account modern material requirements and economic factors, is highly relevant.

Aim. The optimisation of fibre-reinforced concrete composition that meets the requirements for the material of rigid road pavement for automobile roads of the category Ia and has a lower production cost.

Results. The experiment was conducted according to an optimal plan. Three factors of the rigid road pavement fibre-reinforced concrete composition varied as follows: cement content from 300 kg/m³ to 380 kg/m³, polypropylene fibre content from 0 kg/m³ to 3.0 kg/m³, and lignosulfonate-based plasticiser content from 0.6 % to 1.0 % of the cement mass. The set of experimental-statistical models was computed. The models describe the influence of the varied factors on the concrete's compressive strength, flexural tensile strength, frost resistance, abrasion resistance, and the cost of 1 m³. Using these models, the optimal composition of fibre-reinforced concrete was selected. The concrete meets the material requirements for category Ia road pavements and has the minimum cost. To implement the selection based on the set of experimental-statistical models, 17 two-factor «square» type diagrams were made with axes X₂ (fibre quantity) and X₃ (plasticiser quantity). The squares were built at 17 equal fixed levels of factor X₁, corresponding to the entire range of cement quantity variation with a step of 5 kg/m³. Such discretisation allows for a more accurate and precise selection of an optimal solution. The fibre-reinforced concrete composition containing polypropylene fibre in 0.36 kg/m³ was selected. It is less than the amount that ensures the highest parameters of strength, frost resistance, and abrasion resistance. However, considering the specifics of how dispersed reinforcement functions within the concrete matrix and taking into account the market prices for concrete mix components, this particular composition is optimal.

Conclusion. Using the set of experimental-statistical models, the graphic method selects the optimal composition of fibre-reinforced concrete for rigid pavement. The composition guarantees required strength, frost resistance, and abrasion resistance for the category Ia road pavement and has minimal cost.

Keywords: road, rigid pavement, polypropylene fibre, optimisation, strength, frost resistance, abrasion resistance, experimental-statistical modelling.

УДК 625.7/.8

Арінушкіна О. О., <https://orcid.org/0009-0007-6870-3764>Костін Д. Ю., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-4278-2990>*Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), м. Харків, Україна*

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВЛАШТУВАННЯ КРУПНОЗЕРНИСТИХ ЩЕБЕНЕВО-ПІЩАНИХ СУМІШЕЙ УКРІПЛЕНИХ ЦЕМЕНТОМ АРМОВАНИХ ПОЛІПРОПІЛЕНОВИМИ ФІБРОВОЛОКНАМИ

Анотація

Вступ. Останнім часом широкої популярності під час проведення ремонтно-будівельних робіт на дорожній мережі України набувають укріплені мінеральними в'язучими крупнозернисті щебенево-піщані суміші, переважно низьких марок за міцністю. В якості в'язучого в цих сумішах застосовуються мінеральні в'язучі в чистому вигляді, в більшості випадків це цементи або шлакопортландцементи, у кількості від 2 % до 4 % від маси суміші. Цього дозування, як правило, достатньо для забезпечення нормативних значень показників міцності та морозостійкості, що вимагаються чинними стандартами.

Проблематика. Однак крім вищезазначених переваг, ці матеріали мають і певні недоліки такі як, низька морозостійкість яка властива саме для низьких марок за міцністю. Найпростішим шляхом підвищення морозостійкості є підвищення вмісту мінерального в'язучого у складі суміші та підвищення марки за міцністю, але це в подальшому негативно відображається на тріщиностійкості шару основи дорожнього одягу та появі відображених температурних тріщин на шарі дорожнього покриття. Раніше виконаними дослідженнями встановлено, що одним із варіантів підвищення міцностних показників та морозостійкості є введення до складу укріплених щебенево-піщаних сумішей фіброволокон.

Мета роботи. Виробнича перевірка отриманих попередньо результатів дослідження впливу мікроармування поліпропіленовими фіброволокнами крупнозернистої щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом на змішувачі примусової дії, подальше укладання та ущільнення отриманого матеріалу в шарі основи дорожнього одягу.

Матеріали і методи. Для виробництва армованої щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом було використано щебенево-піщану суміш С7 виробництва ТОВ «Кривбас-щебінь» з гранітної сировини. У якості в'язучого було використано шлакопортландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш 400 виробництва ТОВ «Мінеральні порошки та суміші» у кількості 3,5 % від маси мінеральної частини. Для забезпечення якісного ущільнення, забезпечувалась оптимальна вологість суміші з зальним вмістом води 8,0 % від маси кам'яного матеріалу. Для мікроармування суміші використовувалось волокно армуюче поліпропіленове довжиною 18 мм.

Результати. Після набуття зразками віку у 28 діб, було проведено випробування зразків результати показали, що введення поліпропіленових фіброволокон до складу крупнозернистої щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом марки М20 в виробничих умовах, дозволило підвищити міцність матеріалу на стиск на 19 % та міцність на непрямий розтяг на 90 % від значень показників для суміші без поліпропіленових фіброволокон. Також після 10 циклів заморожування-відтавання суміш з вмістом поліпропіленових фіброволокон суттєво збільшилась морозостійкість. У дослідженому випадку, коефіцієнт морозостійкості за міцності на стиск підвищився на 24 %, а за непрямого розтягу на 34 %.

Висновки. Впровадження технології фіброармування крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом марки за міцністю М20, підвищує всі фізико-механічні показники. Міцність на стиск отримала приріст на 19 %, а міцність на непрямий розтяг зросла на 90 %. Також це дозволило підвищити морозостійкість щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом за умови випробування зразків на стиск на 24 %, а за непрямого розтягу на 34 %. При спостереженні за процесом укладання армованих фіброволокнами щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом за

допомогою асфальтоукладача та їх ущільнення додаткових складнощів або труднощів виявлено не було. Однак для більш широкого промислового застосування даної технології, є необхідність розробки додаткової системи дозування фіброволокон, її синхронізації з бортовим обладнанням установки та її подальше включення в загальний цикл роботи.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, шари основи, цемент, щебенево-піщана суміш, міцність, фіброволокна, тріщиноутворення.

Вступ

Останні десятиліття, науковці багатьох наукових установ та Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ), займаються питаннями впровадження новітніх технологій та удосконалення сучасних дорожньо-будівельних матеріалів, що застосовуються під час проведення ремонтно-будівельних робіт дорожньої мережі України. Сучасна тенденція прийняття проектних рішень при конструюванні дорожніх одягів автомобільних доріг, все частіше показує застосування в конструктивних шарах основи укріплених крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей. В якості в'язучого в таких сумішах, в більшості випадків, застосовуються мінеральні в'язучі в чистому вигляді, як правило, цементи або шлакопортландцементи, у кількості від 2 % до 4 %, чого досить часто достатньо для забезпечення нормованих показників міцності, що вимагаються ДСТУ 9177-3:2022 «Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими» [1]. Відповідно, перевагою таких матеріалів, є їх відносно невелика вартість та простота виготовлення у виробничих умовах. Альтернативою є отримання такого матеріалу методом змішування на дорозі з застосуванням дорожніх фрез або ресайклерів. Однак, приймаючи до уваги переваги цих матеріалів вони мають і певні недоліки такі як, низька тріщиностійкість, яка властива для високих марок та низька морозостійкість яка властива для низьких марок за міцністю.

Раніше виконаними дослідженнями встановлено [2], що одним із варіантів підвищення міцностних показників є введення фіброволокон до складу укріплених щебенево-піщаних сумішей. При введенні до складу таких сумішей фіброволокон, є можливість підвищити міцність на стиск до 30 % та міцність на розтяг при вигині або міцність на розкол по твірній до 50 %.

Перевірка отриманих результатів в виробничих умовах є одним із основних завдань, перед подальшим застосуванням технології укріплення щебенево-піщаних сумішей армованих фіброволокнами в більших масштабах.

Мета і завдання роботи. Перевірка попередньо отриманих результатів армування поліпропіленовими фіброволокнами щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом в виробничих умовах на змішувачі примусової дії, подальше укладання та ущільнення отриманого матеріалу в шарі основи дорожнього одягу.

Основна частина

Додавання фіброволокон (поліпропіленових, базальтових, целюлозних, сталевих, скловолонна та ін.) у склад будівельних матеріалів дозволяють створити міцний та стійкий до утворення мікротріщин та усадки матеріал. Цей спосіб покращення властивостей набув широкого використання в інших будівельних матеріалах, які також застосовуються при будівництві дорожніх одягів. Визначенням впливу різних фіброволокон різної довжини та у різній концентрації в матеріалах, що використовуються для влаштування шарів основ дорожніх одягів займалися Бражнік Г. В., Гамеляк І. П., Жданюк В. К., Оніщенко А. В., Панасюк Я. І., Сунь Дзянь, Толмачов С. М. та інші.

Перевірка раніше отриманих результатів досліджень [2] у виробничих умовах, дозволить встановити можливість застосування запропонованої технології покращення фізико-механічних показників укріплених мінеральними в'язучими щебенево-піщаних сумішей, а також виявити проблеми та недоліки, які можуть виникнути під час виконання робіт.

Впровадження технології армування поліпропіленовими фіброволокнами щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом виконувалось на виробничій базі ТОВ «Автомобільна-Південь» в м. Дергачі (Харківська область). Отримана під час впровадження суміш, в подальшому була

використана для влаштування шару основи дорожнього одягу на підходах до мосту через річку Волоська Балаклійка на автомобільній дорозі Р-79 Харків – Зміїв – Балаклія – Гороховатка км 85+580.

Для виробництва армованої щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом було використано щебенево-піщану суміш С7 виробництва ТОВ «Кривбас-щебінь» з гранітної сировини. Властивості суміші представлені в **табл. 1**.

Таблиця 1

Властивості щебенево-піщаної суміші С7

Назва показника, що визначається (згідно НД)	Одиниця виміру	Значення показника		НД на методи випробувань	Відповідність вимогам НД
		Відповідно до вимог НД	Фактичне значення		
Зерновий склад за ДСТУ 9177-2:2022 [3] Повні залишки на ситі 40 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 0 до 15 вкл.	1,4	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 20 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 20 до 40 вкл.	25,6	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 10 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 40 до 65 вкл.	43,1	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 5 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 55 до 80 вкл.	55,0	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 2,5 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 65 до 90 вкл.	66,7	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 0,63 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 85 до 95 вкл.	91,0	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 0,16 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 95 до 100 вкл.	98,8	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Повні залишки на ситі 0,05 мм	%	п. 7.4 табл. 7.2 від 95 до 100 вкл.	99,6	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.3	Відповідає
Насипна щільність	кг/м ³	Фактичне значення	1590	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.17	-
Вологість	%	Фактичне значення	4,5	ДСТУ 9179:2022 [4] п. 5.19	-

У якості в'язучого було використано шлакопортландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш 400 виробництва ТОВ «Мінеральні порошки та суміші» у кількості 3,5 % від маси мінеральної частини. Для забезпечення якісного ущільнення, забезпечувалась оптимальна вологість суміші з зальним вмістом води 8,0 % від маси кам'яного матеріалу.

Для мікроармування суміші використовувалось волокно армуюче поліпропіленове довжиною 18 мм виготовлені за ТУ У 24.7-32781078-001:2006 «Волокно армуюче поліпропіленове (ВАП)» [5].

Застосована щебенево-піщана суміш, за гранулометричним складом відповідає вимогам ДСТУ 9177-3:2022 «Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими» [1]. Вміст цементу та води у складі сумішей підбирався фахівцями ТОВ «Автомагістраль Південь», а оптимальний вміст поліпропіленових фіброволокон встановлений у кількості 0,03 % від маси мінеральної частини, було попередньо досліджено в лабораторії кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ [2] та підтверджено для суміші, яка застосовувалась під час впровадження.

Для виготовлення укріпленої щебенево-піщаної суміші використовувалась установка MARINI coldFALT600 (рис. 1).



Рисунок 1 — Установка MARINI coldFALT600

Під час проведення виробничого експерименту, було виготовлено два види суміші, перша без фіброволокон, друга з поліпропіленовими фіброволокнами. Введення суміші відбувалося в ручному режимі безпосередньо на стрічковий конвеєр перед системою дозування накопичувальних бункерів вручну (рис. 2).



Рисунок 2 — Введення фіброволокон до складу суміші

Під час випуску суміші було відібрано проби укріплених цементом щебенево-піщаних сумішей з фіброволокнами та без них, після чого в лабораторії ТОВ «Автомагістраль-Південь» заформовано циліндричні лабораторні зразки безпосередньо на виробничій базі за допомогою гіраторного ущільнювача, для подальших порівняльних досліджень фізико-механічних показників після набрання зразками міцності у віці 28 діб. Після виготовлення зразки були загорнуті в стрейч-плівку (кожен окремо) та перші три доби зберігались в лабораторії ТОВ «Автомагістраль-Південь», після чого були передані до випробувальної лабораторії кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг ХНАДУ.

Наступним етапом було завантаження автосамоскидів приготовленими сумішами та транспортування їх на об'єкт будівництва. Укладання виготовлених сумішей виконувалось за допомогою асфальтоукладача Bomag BF 800C (рис. 3) окремо по смугах руху відповідно вимог ДСТУ 9178:2022 «Настанова з улаштування шарів дорожнього одягу з щебенеми, гравійними та укріплених матеріалів» [6].



Рисунок 3 — Укладання укріплених цементом щебенево-піщаних сумішей

Ущільнення суміші, після укладання, виконувалося групою котків з різними типами робочих органів. Першим виконував ущільнення коток на пневматичних шинах Bomag BW24 RH загальною вагою 24 тонни. Наступним виконував ущільнення гладковальцевий коток Bomag BW161 AD масою 10 тонн, Завершував ущільнення гладковальцевий коток Bomag BW202 AD масою 12,3 тонни. Процес ущільнення (рис. 4).



Рисунок 4 — Ущільнення укріплених цементом щебенево-піщаних сумішей

Після набуття зразками віку у 28 діб, зразки було піддано випробуванню. Досліджувалися наступні показники: «Міцність на стиск», «Міцність на непрямий розтяг» та «Коефіцієнт морозостійкості» Результати виконаних випробувань представлені в **табл. 2**.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості укріплених цементом щебенево-піщаних сумішей

Позначення суміші	Міцність на стиск <i>RCT</i> , МПа	Міцність на непрямий розтяг <i>Rp</i> , МПа	Коефіцієнт морозостійкості (за стику)	Коефіцієнт морозостійкості (за непрямого розтягу)
ЩПС.Кр.Ц.М20. ДСТУ 9177-3:2022	3,35	0,50	0,55	0,44
ЩПС.Кр.Ц.М20. ДСТУ 9177-3:2022 + Фібра	3,98	0,95	0,68	0,59

Результати випробувань зразків показали, що введення поліпропіленових фіброволокон довжиною 18 мм до складу крупнозернистої щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом марки М20 в виробничих умовах, підвищує міцність на стиск на 19 %, а міцність на непрямий розтяг на 90 % від значень показників для суміші без поліпропіленових фіброволокон. Також наявність в суміші поліпропіленових фіброволокон суттєво підвищує морозостійкість. У даному випадку, коефіцієнт морозостійкості за стиску підвищився на 24 %, а за непрямого розтягу на 34 %, що свідчить про суттєву ефективність фіброармування в виробничих умовах.

Висновки

Результати впровадження технології фіброармування крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом суттєво покращує всі фізико-механічні показники. Введення до складу щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом поліпропіленових волокон підвищує міцність на стиск на 19 %, міцність на непрямий розтяг на 90 %. Введення поліпропіленових волокон, також дозволяє підвищити морозостійкість щебенево-піщаної суміші укріпленої цементом за умови випробування зразків за стиску на 24 %, а за непрямого розтягу на 34 %.

У процесі укладання за допомогою асфальтоукладача та ущільнення армованих фіброволокнами щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом додаткових складнощів або труднощів виявлено не було.

Однак варто зазначити, що для більш широкого промислового застосування даної технології, необхідно розробити додаткову систему дозування фіброволокон, її синхронізацію з бортовим обладнанням установки та її подальше включення в загальний цикл роботи.

Список літератури

1. ДСТУ 9177-3:2022 Матеріали щебеневої та гравійної для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими. ДП «УкрНДНЦ». 2023, 20 с. (Інформація та документація).
2. Аринушкіна О. О., Костін Д. Ю. Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах, укріплених цементом. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, ЛНТУ. 2025. Випуск 23. С. 19–30. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02).
3. ДСТУ 9177-2:2022 Матеріали щебеневої та гравійної для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 2. Матеріали неукріплені. ДП «УкрНДНЦ». 2023, 17 с. (Інформація та документація).

4. ДСТУ 9179:2022 Щебінь та гравій зі щільних гірських порід і металургійних шлаків для дорожнього будівництва. Методи фізико-механічних випробувань. ДП «УкрНДНЦ». 2023, 65 с. (Інформація та документація).
5. ТУ У 24.7-32781078-001:2006. Волокно армуюче поліпропіленове (ВАП). URL: <http://plastificator.com.ua/cert/Fibers.pdf> (дата звернення: 28.04.2017).
6. ДСТУ 9178:2022 Настанова з улаштування шарів дорожнього одягу з щебеневих, гравійних та укріплених матеріалів. ДП «УкрНДНЦ». 2022, 28 с. (Інформація та документація).

References

1. DSTU 9177-3:2022. Materialy shchebenevi ta hraviini dlia dorozhnoho budivnytstva. Tekhnichni umovy. Chastyna 3. Materialy, ukripleni mineralnymi viazhuchymy. (DSTU 9177-3:2022 Crushed stone materials and gravel materials for the road building industry specifications/ Part 3. The materials bound by the mineral binders). Kyiv, 2023. 20 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. Arinushkina O. O., Kostin D. Y. Doslidzhennia optymalnoi kontsentratsii polipropilenovykh fibrovolokon u krupnozernistykh shchebenevo-pishchanykh sumishakh, ukriplenykh tsementom (Research of the optimal concentration of polypropylene fibers in coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with cement). *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. Luts'k, LNTU. 2025. No. 23. P. 19–30. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02/](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02/) [in Ukrainian].
3. DSTU 9177-2:2022. Materialy shchebenevi ta hraviini dlia dorozhnoho budivnytstva. Tekhnichni umovy. Chastyna 2. Materialy neukripleni. (DSTU 9177-2:2022 Crushed stone materials and gravel materials for the road building industry specifications. Part 2. Unbound materials). Kyiv, 2023. 17 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
4. DSTU 9179:2022 Shchebin ta hravii zi shchilnykh hirs'kykh porid i metalurhiinykh shlakiv dlia dorozhnoho budivnytstva. Metody fizyko-mekhanichnykh vyprobuvan (DSTU 9179:2022 Natural crushed stone and gravel of denserocks and metallurgical slags for road building. Methods of physical and mechanical tests). Kyiv, 2023. 65 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
5. ТУ У 24.7-32781078-001:2006 Волокно армуюче поліпропіленове (ВАП). URL: <http://plastificator.com.ua/cert/Fibers.pdf>. (Last accessed: 28.04.2017) [in Ukrainian].
6. DSTU 9178:2022 Nastanova z ulashtuvannia shariv dorozhnoho odiahu z shchebenevykh, hraviinykh ta ukriplenykh materialiv. (DSTU 9178:2022 Guide on construction of layers of road pavement from crushed stone materials, gravel materials and bound materials). Kyiv, 2023. 28 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

Olena Arinushkina, <https://orcid.org/0009-0007-6870-3764>

Dmytro Kostin, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7879-6614>

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

IMPLEMENTATION OF THE TECHNOLOGY OF COARSE-GRADED CRUSHED STONE AND SAND MIXTURES REINFORCED WITH CEMENT AND POLYPROPYLENE FIBERS APPLICATION

Abstract

Introduction. Recently, coarse-grained crushed stone and sand mixtures reinforced with mineral binders, mainly of low strength grades, have become widely popular during repair and construction work on the road network of Ukraine. As a binder in these mixtures, mineral binders are used in pure form, in most cases cements or slag Portland cements are used, in an amount of 2 % to 4 % of the mixture weight. This dosage is usually sufficient to ensure the normative values of strength and frost resistance required by current standards.

Problems. However, in addition to the advantages, these materials also have certain disadvantages, such as low frost resistance, which is characteristic of low strength grades. The easiest way to increase frost resistance is to increase the content of mineral binder in the mixture, but this subsequently negatively affects the crack resistance of the base layer of the road surface and the appearance of reflected temperature cracks in the road surface layer. Previously performed studies have established that one of the options for increasing strength and frost resistance is the introduction of fiber fibers into the composition of reinforced crushed stone-sand mixtures.

Purpose of the work. Production verification of the previously obtained results of the study of the influence of polypropylene fiber reinforcement of coarse-grained crushed stone-sand mixture reinforced with cement on a forced-action mixer, further laying and compaction of the resulting material in the base layer of the road surface.

Materials and methods. For the production of reinforced crushed stone-sand mixture reinforced with cement, crushed stone-sand mixture C7 produced by LLC «Kryvbas-shchebin» from granite raw materials was used. Slag Portland cement PC II/B-Sh 400 produced by LLC «Mineral powders and mixtures» was used as a binder in the amount of 3.5 % of the mass of the mineral part. To ensure high-quality compaction, the optimum moisture content of the mixture was ensured with a total water content of 8.0 % by weight of the stone material. For micro-reinforcement of the mixture, polypropylene reinforcing fiber with a length of 18 mm was used.

The results. After the samples reached the age of 28 days, the samples were tested. The results showed that the introduction of polypropylene fibers into the composition of a coarse-grained crushed stone-sand mixture reinforced with M20 cement under production conditions, allowed to increase the compressive strength of the material by 19 % and the indirect tensile strength by 90 % of the values of the indicators for the mixture without polypropylene fibers. Also, after 10 freeze-thaw cycles, the frost resistance of the mixture containing polypropylene fibers significantly increased. In the studied case, the frost resistance coefficient in compression increased by 24 %, and in indirect tension by 34 %.

Conclusions. The introduction of fiber reinforcement technology for coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with cement of strength grade M20 increases all physical and mechanical indicators. Compressive strength increased by 19 %, and indirect tensile strength increased by 90 %. This also allowed to increase the frost resistance of the crushed stone-sand mixture reinforced with cement when testing samples in compression by 24 %, and in indirect tension by 34 %. Observation of the process of laying fiber-reinforced crushed stone-sand mixtures reinforced with cement using an asphalt paver and their compaction revealed no additional difficulties or difficulties. However, for a wider industrial application of this technology, there is a need to develop an additional fiber dosing system, synchronize it with the on-board equipment of the installation, and further include it in the overall work cycle.

Keywords: highway, road surface, base layers, cement, gravel-sand mixture, strength, fiber, cracking.

УДК 625.825

Шлюнь Н. В., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-1040-8870>Засць Ю. О., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-1836-2010>Шевчук Л. В., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>Худолій С. М., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6054-6708>

Національний транспортний університет (НТУ), Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИНИКНЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ЕФЕКТІВ В АРМОВАНИХ ДОРОЖНІХ КОНСТРУКЦІЯХ, ЗА ТЕРМОПРУЖНОЇ НЕСУМІСНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ПОКРИВУ ТА АРМАТУРИ

Анотація

Вступ. У регіонах з різкими коливаннями температур при їх сезонних і добових змінах дуже часто спостерігається явище утворення локальних дефектів і тріщин в асфальтобетонних покриттях автомобільних доріг. Значною мірою це зумовлено неоднорідністю термомеханічних властивостей матеріалів шарів покриття та основи. Для запобігання цим явищам у конструкцію покриттів вводять армуючі стрижні та сітки.

Проблематика. Проблематика виконаних досліджень полягає у встановленні закономірностей термомеханічного деформування композитних матеріалів (на прикладі асфальтобетону), які підсилені армуючими стрижнями, в полях змінних температур.

Мета. Мета роботи полягає у виведенні математичних співвідношень, які визначають внутрішньоструктурні термонапруження в композитах, викликані змінними полями температур і неоднорідністю матеріалів.

Матеріали та методи. На базі теорії термопружності поставлено задачу про плоский термодетформований стан пружного середовища, що містить пружний стрижень кругового перерізу з відмінними термомеханічними параметрами. Для випадку зміни температури системи на постійну величину побудовано аналітичний розв'язок рівнянь, отримано вирази для термодетформацій і термонапружень.

Результати. На прикладі асфальтобетонного матеріалу, армованого склопластиковими стрижнями, побудовані аналітичні вирази для значень додаткових контактних термонапружень, а також сформульовані умови термомеханічної несумісності матеріалів асфальтобетону та арматури.

Висновки. Використовуючи методи теорії термопружності, було показано, що у випадках несумісності термомеханічних характеристик матеріалів асфальтобетону та арматури в її безпосередній близькості виникають додаткові локалізовані термонапруження. Ці напруження, навіть за помірних перепадів температури, можуть досягати критичних значень і призводити до локальних дефектів і тріщин. Оскільки ці дефекти мають прихований характер, їх не завжди можна виявити на практиці.

Ключові слова: автомобільна дорога, асфальтобетон, дорожній одяг, внутрішньоструктурні термонапруження, змінні поля температури, композит покриття, стрижнева арматура.

Вступ

Міцність і довговічність конструкцій дорожнього одягу доріг, мостів і тунелів значною мірою залежать від двох ключових чинників: інтенсивності транспортних навантажень і кліматичних умов. Найбільш помітні руйнування дорожнього покриття відбуваються в кліматичних зонах з великими перепадами температури, особливо в міжсезоння, коли температурні градієнти є найвищими.

Одним з найпоширеніших видів руйнувань, спричинених температурою, є поява поперечних тріщин. Вони виникають через надмірне поздовжнє напруження, коли при низьких температурах верхні шари дорожнього одягу не можуть вільно скорочуватися. Щоб запобігти цьому, в конструкцію

дороги додають «розвантажувальні температурні шви» та арматуру (поздовжню, сітчасту тощо). Армвання підвищує загальну міцність дорожньої конструкції, зменшує деформації, збільшує строк його експлуатації та скорочує витрати на ремонт.

Під час теоретичного аналізу впливу арматури на міцність конструкцій та дослідженні загальних термомеханічних властивостей армованих (композитних) матеріалів і дорожніх покриттів, як правило, визначають зведені (ефективні) параметри комбінованих систем. Ці системи містять включення у вигляді частинок, волокон або стрижнів [4, 6]. У першому випадку розглядаються моделі однорідних і неоднорідних сферичних частинок, зокрема тих, що вкриті оболонковими шарами [4]. При цьому аналізуються два типи розташування включень: упорядковане [2] та стохастичне (випадкове) [10]. Для таких систем обчислюються зведені значення модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона, коефіцієнта теплопровідності та коефіцієнта температурного розширення всієї системи.

У конструкціях дорожнього одягу доріг і мостів, покритих асфальтобетоном, відбуваються складні процеси термодеструкції та термодеструкції [3, 9, 13, 16, 17, 19, 20]. У наукових роботах [5, 7, 12, 14] вже були розглянуті методи визначення термодинамічних властивостей армованого асфальтобетону (з частинками, волокнами чи стрижнями), але тут ці завдання ускладнюються можливістю створення матеріалів з направленими (анізотропними) властивостями.

Важливо також враховувати, що додавання армуючих елементів з іншого матеріалу може не лише покращити загальні властивості композиту, але й спричинити виникнення локальних внутрішніх термонапружень під впливом температури. Це відбувається, якщо термомеханічні характеристики компонентів несумісні. Для пластичних матеріалів такі напруження можуть викликати деформації та дефекти, а для крихких - призвести до локальних тріщин. Ці дефекти часто є прихованими та їх важко виявити, тому задача їх теоретичного прогнозування є важливою.

Постановка задачі

Сформулюємо задачу про стаціонарне температурне деформування нескінченного пружного середовища 2 (матриці), яке армоване стрижнем 1 кругового перерізу радіуса r_1 . На **рис. 1** виділено фрагмент цієї системи.

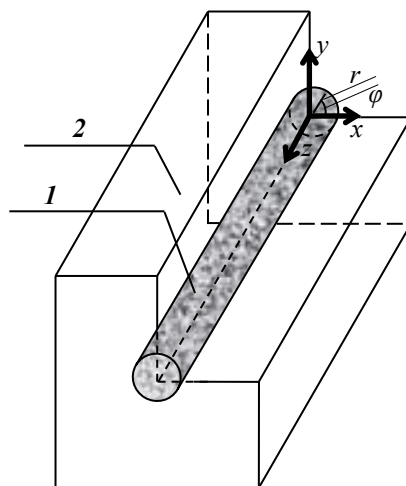


Рисунок 1 — Схема стрижневого включення 1 в середовище матриці 2

Для побудови математичної моделі використаємо циліндричну систему координат $O r \phi z$, де вісь z збігається з віссю стрижня. Термомеханічні характеристики стрижня 1 та середовища 2 відповідно визначаються: модулем пружності E_1 , E_2 , коефіцієнтом Пуассона ν_1 , ν_2 та коефіцієнтами температурного розширення α_1 і α_2 . Нехай температура системи стаціонарно змінюється на величину ΔT . Розглянемо випадок, коли термопружні відносні деформації $\varepsilon_z^{(i)}(r, \phi, z)$ кожного з тіл $i = 1, 2$

вздовж осі Oz дорівнюють нулю, а сама система перебуває в плоскому осесиметричному термодетформованому стані. Цей стан описується рівняннями рівноваги [1, 8, 11, 15, 18].

$$\frac{d\sigma_r^{(i)}}{dr} + \frac{\sigma_r^{(i)} - \sigma_\phi^{(i)}}{r} = 0, \quad (i=1,2), \quad (1)$$

де $\sigma_r^{(i)}, \sigma_\phi^{(i)}$ — нормальні радіальні та колові напруження тіл 1 і 2 на відповідних майданчиках $r = \text{const}$ і $\phi = \text{const}$. Виразимо нормальні термонапруження через деформації $\varepsilon_r^{(i)}, \varepsilon_\phi^{(i)}, \varepsilon_z^{(i)}$.

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left((1-\nu_i)\varepsilon_r^{(i)} + \nu_i(\varepsilon_\phi^{(i)} + \varepsilon_z^{(i)}) - (1+\nu_i)\alpha_i\Delta T \right), \\ \sigma_\phi^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left((1-\nu_i)\varepsilon_\phi^{(i)} + \nu_i(\varepsilon_r^{(i)} + \varepsilon_z^{(i)}) - (1+\nu_i)\alpha_i\Delta T \right), \\ \sigma_z^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left((1-\nu_i)\varepsilon_z^{(i)} + \nu_i(\varepsilon_r^{(i)} + \varepsilon_\phi^{(i)}) - (1+\nu_i)\alpha_i\Delta T \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$(i=1,2).$

Далі врахуємо, що $\varepsilon_z^{(i)}(r, \phi, z) = 0$. Тоді вирази (2) спростяться

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left((1-\nu_i)\varepsilon_r^{(i)} + \nu_i\varepsilon_\phi^{(i)} - (1+\nu_i)\alpha_i\Delta T \right), \\ \sigma_\phi^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left((1-\nu_i)\varepsilon_\phi^{(i)} + \nu_i\varepsilon_r^{(i)} - (1+\nu_i)\alpha_i\Delta T \right), \\ \sigma_z^{(i)}(r) &= \frac{E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)} \left(\nu_i(\varepsilon_r^{(i)} + \varepsilon_\phi^{(i)}) - (1+\nu_i)\alpha_i\Delta T \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$(i=1,2).$

У формулі (3) використано деформації, що залежать від радіального переміщення $u(r)$:

$$\varepsilon_r^{(i)}(r) = \frac{\partial u^{(i)}}{\partial r}, \quad \varepsilon_\phi^{(i)}(r) = \frac{u^{(i)}}{r}, \quad (i=1,2). \quad (4)$$

З урахуванням формул для напружень (3) та деформацій (4), рівняння рівноваги для кожного з тіл $i=1,2$ набуде вигляду:

$$\frac{d^2 u^{(i)}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{(i)}}{dr} - \frac{1}{r^2} u^{(i)} = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) можна записати в більш компактній формі:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru^{(i)}) \right] = 0, \quad (i=1,2). \quad (6)$$

Після подвійного інтегрування лівої частини рівняння (6) за r , ми отримуємо його розв'язки:

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= rC_1 + \frac{1}{r}C_2 \quad \text{при } i=1, \\ u^{(2)}(r) &= rC_3 + \frac{1}{r}C_4 \quad \text{при } i=2. \end{aligned} \quad (7)$$

Невідомі константи C_i ($i = \overline{1,4}$) визначаються з урахуванням граничних умов та умов контакту при $r = r_1$.

$$u^{(0)}(0) = 0, \quad (8)$$

$$u_r^{(1)}(r_1) = u_r^{(2)}(r_1), \quad (9)$$

$$\sigma_r^{(1)}(r_1) = \sigma_r^{(2)}(r_1), \quad (10)$$

$$\sigma_r^{(2)}(r) \rightarrow 0 \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (11)$$

На **рис. 2** представлена скінченно-елементна модель осевого перерізу стрижневого включення 1 в середовище матриці 2.

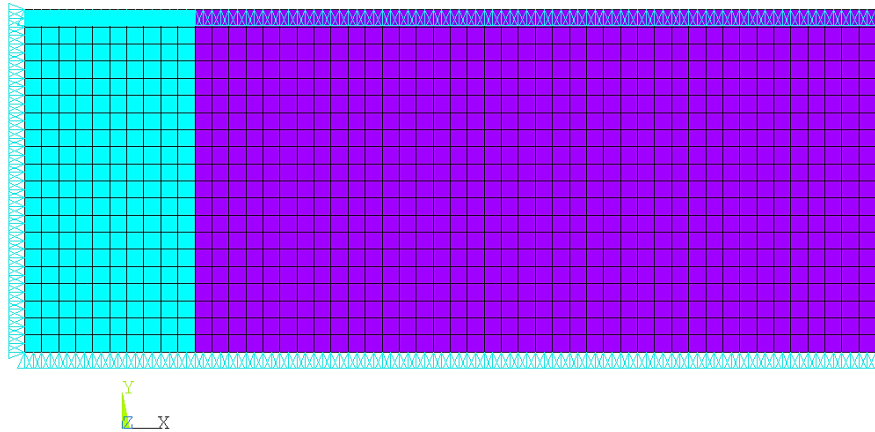


Рисунок 2 — Скінченно-елементна модель осевого перерізу армованої системи з накладеними граничними умовами

З умови (8) випливає

$$C_2 = 0. \quad (12)$$

Використовуючи рівності (7) та (12), ми можемо виразити деформації та напруження для тіл 1 і 2.

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^{(1)}(r) &= C_1, \quad \varepsilon_\varphi^{(1)}(r) = C_1, \\ \varepsilon_r^{(2)}(r) &= C_3 - \frac{1}{r^2} C_4, \quad \varepsilon_\varphi^{(2)}(r) = C_3 + \frac{1}{r^2} C_4, \\ \sigma_r^{(1)}(r) &= \frac{E_1}{1-2\nu_1} \left(\frac{C_1}{1+\nu_1} - \alpha_1 \Delta T \right), \\ \sigma_r^{(2)}(r) &= \frac{E_2}{1+\nu_2} \left(\frac{C_3}{1-2\nu_2} - \frac{C_4}{r_1^2} - \frac{1+\nu_2}{1-2\nu_2} \alpha_2 \Delta T \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Використовуючи умову (11) з останнього рівняння системи (13) отримуємо:

$$C_3 = (1+\nu_2) \alpha_2 \Delta T \quad (14)$$

Константи C_1 і C_4 знайдемо із системи рівнянь (9), (10), враховуючи умову (13):

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{[E_1 \alpha_1 + E_2 (1-2\nu_1) \alpha_2] (1+\nu_1) (1+\nu_2) \Delta T}{E_1 (1+\nu_2) + E_2 (1+\nu_1) (1-2\nu_1)}; \\ C_4 &= \frac{r_1^2 E_1 [(1+\nu_1) \alpha_1 - (1+\nu_2) \alpha_2] (1+\nu_2) \Delta T}{E_1 (1+\nu_2) + E_2 (1+\nu_1) (1-2\nu_1)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Підставимо отримані значення констант у вираз для відшукування переміщень(7):

$$\begin{aligned} u^{(1)}(r) &= \frac{r[E_1\alpha_1 + E_2(1-2\nu_1)\alpha_2](1+\nu_1)(1+\nu_2)\Delta T}{E_1(1+\nu_2) + E_2(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} \quad (0 \leq r \leq r_1), \\ u^{(2)}(r) &= r(1+\nu_2)\alpha_2\Delta T + \frac{r_1^2}{r} \frac{E_1[(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2](1+\nu_2)\Delta T}{E_1(1+\nu_2) + E_2(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} \quad (r \geq r_1). \end{aligned} \quad (16)$$

Важливо відзначити, що в рівності для радіального переміщення $u^{(2)}(r)$ перший доданок є переміщенням в однорідному середовищі 2, якби стрижня 1 не існувало. Другий доданок виникає через вплив стрижня і зменшується пропорційно радіусу r_1 .

Наведемо також співвідношення для напружень у стрижні 1:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)}(r) &= \sigma_\varphi^{(1)}(r) = -\frac{E_1E_2[(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2]\Delta T}{E_1(1+\nu_2) + E_2(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}, \\ \sigma_z^{(1)}(r) &= -\frac{E_1[E_1(1+\nu_2) + E_2(1-\nu_1)]\alpha_1 - E_2\nu_1(1+\nu_2)\alpha_2}{E_1(1+\nu_2) + E_2(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}\Delta T, \end{aligned} \quad (17)$$

$(0 \leq r \leq r_1).$

і в середовищі 2

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(2)}(r) &= -\frac{r_1^2}{r^2} \cdot \frac{E_1E_2[(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2]\Delta T}{E_1(1+\nu_2) + E_2(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}, \\ \sigma_\varphi^{(2)}(r) &= \frac{r_1^2}{r^2} \cdot \frac{E_1E_2[(1+\nu_1)\alpha_1 - (1+\nu_2)\alpha_2]\Delta T}{E_1(1+\nu_2) + E_2(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}, \\ \sigma_z^{(2)}(r) &= -E_2\alpha_2\Delta T, \end{aligned} \quad (r \geq r_1). \quad (18)$$

Графіки цих функцій, представлені на **рис. 3**. Також їм властива осесиметричність тобто вони залежать лише від відстані від центру стрижня r та зменшуються обернено пропорційно квадрату радіальної координати $(1/r^2)$. Це підтверджує, що найбільший ризик руйнування існує саме на межі контакту армуючого елемента та матриці.

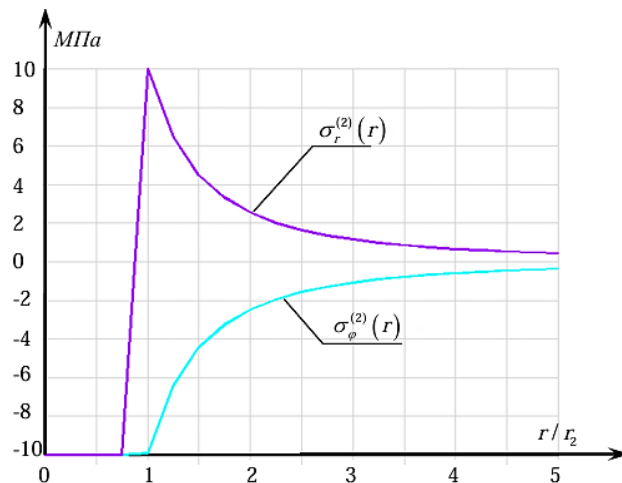


Рисунок 3 — Графіки розподілу напружень $\sigma_r^{(2)}(r)$ та $\sigma_\varphi^{(2)}(r)$ в площині осевого перерізу армованої системи при плоскому термодформуванні

Крім того радіальні $\sigma_r^{(2)}(r)$ та колові напруження $\sigma_\phi^{(2)}(r)$ рівні за абсолютним значенням, але мають протилежні знаки. Це означає, що в одних і тих же точках системи матеріал одночасно зазнає як розтягу, так і стиснення, що може бути особливо небезпечним для матеріалів з різною міцністю на розтягнення і стиснення, таких як асфальтобетон.

Знак напружень залежить від співвідношення між коефіцієнтами температурного розширення стрижня (α_1) і середовища (α_2). Якщо, наприклад, $\alpha_1 > \alpha_2$, то стрижень намагатиметься розширитися більше, ніж матриця, що призведе до появи колових напружень розтягу і стискальних — у радіальному напрямі, і навпаки. Це означає, що, оскільки асфальтобетон при розтягуванні має меншу міцність, ніж при стисканні, при будь-яких змінах температури ΔT будуть реалізовуватися несприятливі термонапруження $\sigma_r^{(2)}(r)$ або $\sigma_\phi^{(2)}(r)$.

Очевидно, що значення термомеханічних параметрів, за яких чисельники дробів у формулі (18) для функцій $\sigma_r^{(2)}(r)$ і $\sigma_\phi^{(2)}(r)$ дорівнюють нулю, є термічно сумісними. Тому рівність:

$$\frac{\alpha_1}{1+\nu_2} = \frac{\alpha_2}{1+\nu_1}, \quad (19)$$

є умовою сумісності термомеханічних параметрів матриці та армуючого стрижня.

Аналіз числових результатів

Як приклад, розглянемо випадок включення склопластикового стрижня радіуса r_1 з термомеханічними параметрами $E_1 = 34,83$ ГПа, $\alpha_1 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$, $\nu_1 = 0,35$ в асфальтобетонне середовище з параметрами $E_2 = 2,41$ ГПа, $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ $1/^\circ\text{C}$, $\nu_2 = 0,2988$ при зміні температури $\Delta T = -20^\circ\text{C}$. За цих умов термонапруження у системі склали $\sigma_r^{(1)} = \sigma_\phi^{(1)} = -10,37$ МПа, $\sigma_r^{(2)} = -10,37 \frac{r_1^2}{r^2}$ МПа, $\sigma_\phi^{(2)} = 9,64$ МПа.

На основі проведеного числового моделювання поля додаткових термопружних напружень представлені на **рис. 4**.

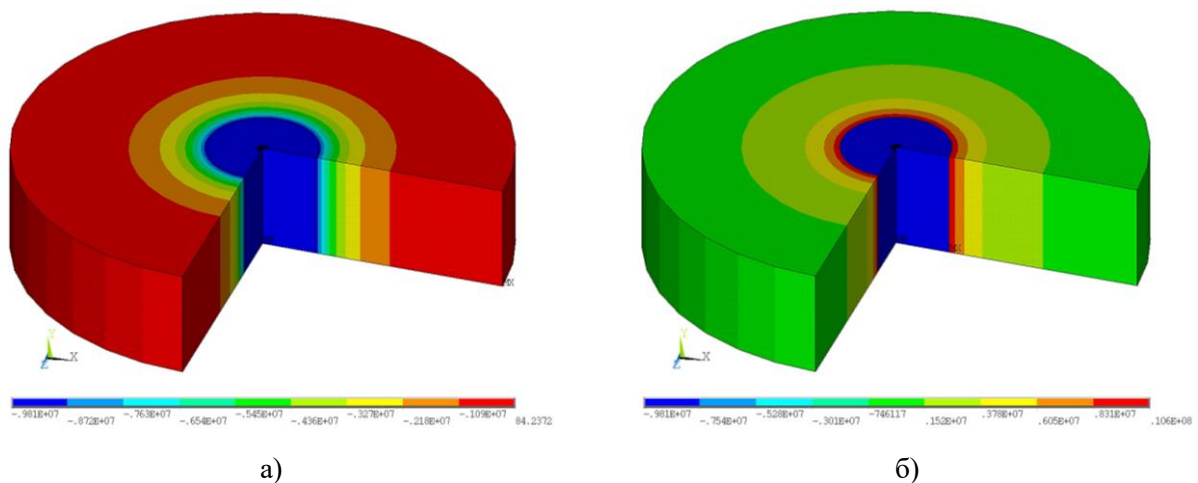


Рисунок 4 — Схеми розподілу додаткових термопружних напружень $\sigma_r^{(2)}(r)$ (а) та $\sigma_\phi^{(2)}(r)$ (б) за умови включення склопластикового стрижня в матрицю асфальтобетону

Таким чином, якщо врахувати, що межа міцності асфальтобетону при стисканні становить від 5 до 20 МПа, а при розтязі він виявляється в 6÷8 раз менше цих значень, то можна зробити

висновок, що за таких умов додаткові термонапруження, спричинені склопластиковим армуючим стрижнем, можуть призвести до виникнення локальних дефектів у його малому okolí.

Висновки

Поставлена задача про теоретичне моделювання явища зародження додаткових термонапружень у дорожньому покритті, армованому суцільним стрижнем. За допомогою методів термопружності було сформульовано диференціальні рівняння для плоского осесиметричного деформованого стану нескінченного циліндричного тіла, що знаходиться в нескінченному пружному середовищі, за стаціонарної зміни температури

Знайдено аналітичне розв'язання цих рівнянь, що дозволило визначити додаткові термопереміщення, деформації та напруження в системі. Показано, що максимальні значення додаткових термонапружень виникають на поверхні контакту армуючого стрижня з покритвом і зменшуються обернено пропорційно квадрату відстані від цієї поверхні.

Встановлено, що величина додаткових термонапружень зростає зі збільшенням термомеханічної несумісності матеріалів системи та радіальної жорсткості стрижня. На прикладі армування асфальтобетону склопластиковим стрижнем було продемонстровано, що навіть за незначних змін температури додаткові термонапруження можуть досягати критичних значень, що призводить до локальних дефектів у матеріалі.

Список літератури

1. Beleicheva T. G. and Ziling, K. K. Thermoelastic axisymmetric problem for a two-layer cylinder. *J. Appl. Mech. Technical Physics*, 19, 108–113, (1978).
2. Boubaker Fetiza Ali, Khedoudja Soudani, and Smail Haddadi. Effect of waste plastic and crumb rubber on the thermal oxidative ageing of modified bitumen. *Road Mat. and Pav. Des.* 2022, V. 23, Issue 1. P. 222–233.
3. Brian Hill, Daniel Oldham, Behzad Behnia et al. Evaluation of low temperature viscoelastic properties and fracture behavior of bio-asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*. 2018, V.19, 4, P. 362–369.
4. Christensen R. M., Lo K.H. Solutions for effective shear properties in three-phase sphere and cylinder models. *J. Mech. Phys. Solids*. 1979. V. 27. P. 315–330.
5. Christian Karch. Micromechanical analysis of thermal expansion coefficient. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2014, V. 3, 3. P. 1–15.
6. Christiansen R. M. Mechanics of Composite Materials. Wiley: New York, NY, USA, 1979.
7. Gholamali Shafabakhsh, Mohammadreza Aliakbari Bidokhti, and Hassan Divandan. Evaluation of the performance of SBS/Nano-Al₂O₃ composite-modified bitumen at high temperature. *Road Mat. and Pavement*, 2021, V. 22, Issue 11. P. 2523–2537.
8. Hetnarski R. B. and Ignaczak J. Mathematical Theory of Elasticity, Taylor and Francis, New York, (2004).
9. Jorge Pais, Caio Santos, Paulo Pereira et al. The adjustment of pavement deflections due to temperature variations. *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 21, 2020, Issue 13. P. 1585–1594.
10. Ju J. W., Chen T. M. Effective elastic moduli of two-phase composites containing randomly dispersed spherical inhomogeneities. *Acta Mech.* 1994, 103(1). P. 123–144.
11. Kovalenko A.D. Thermoelasticity: Basic Theory and Applications, Wolters-Noordhoff Groningen, The Netherlands, (1972).
12. Marcela Fiedlerova, Petr Jisa, Kamil Stepanek. Using various thermal analytical methods for bitumen characterization. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2021, V. 14, Issue 4. P. 459–465.
13. Md Amanul Hasan, Rafiqul A. Tarefder. Development of temperature zone map for mechanistic empirical (ME) pavement design. *Journal of Pavement Research and Technology*. 2018, V. 11, Issue 1. P. 99–111.

14. Mirosław Graczyk, Józef Rafa, Adam Zofka Pavement modelling using mechanical and thermal homogenization of layered systems. *Roads and Bridges. Drogi i Mosty*. Issue 17. 2. 2018. P. 141–157.
15. Nowacki W. Thermoelasticity, 2 nd ed., Oxford: PWN – Polish Scientific Publishers, Warsaw and Pergamon Press, (1986).
16. Setiawan Dian M. The role of temperature differential and subgrade quality on stress, curling, and deflection behavior of rigid pavement. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, Volume 29, Issue 5 – 6, id. 10, 12 p.
17. Tarn Minh Phan, Tri Ho Minh Le, and Dae-Wook Park. Evaluation of cracking resistance of healed warm mix asphalt based on air-void and binder content. *Road Materials and Pavement Design*. 2022, V. 23, Issue 1. P. 47–61.
18. Trusdell, C. (ed.), Carlson, D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics, Vol. Via/2, Springer, Berlin, (1972).
19. Yang Liu, Zhendong Qian, Dong Zheng, Meng Zhang Interlaminar thermal effect analysis of steel bridge deck pavement during gussasphalt mixture paving. *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 20, 2019. Issue 11. P. 1323–1335.
20. Yingjun Jiang, Changqing Deng, Zhejiang Chen, and Yuhang Tian. Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, V. 21. Issue 4. P. 447–456.

References

1. Beleicheva T. G. and Ziling, K. K. Thermoelastic axisymmetric problem for a two-layer cylinder. *J. Appl. Mech. Technical Physics*, 19, 108–113, (1978) [in English].
2. Boubaker Fetiza Ali, Khedoudja Soudani, and Smail Haddadi. Effect of waste plastic and crumb rubber on the thermal oxidative ageing of modified bitumen. *Road Mat. and Pav. Des.* 2022, V. 23, Issue 1. P. 222–233 [in English].
3. Brian Hill, Daniel Oldham, Behzad Behnia et al. Evaluation of low temperature viscoelastic properties and fracture behavior of bio-asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*. 2018, V.19, 4, P. 362–369 [in English].
4. Christensen R. M., Lo K.H. Solutions for effective shear properties in three-phase sphere and cylinder models. *J. Mech. Phys. Solids*. 1979. V. 27. P. 315–330 [in English].
5. Christian Karch. Micromechanical analysis of thermal expansion coefficient. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2014, V. 3, 3. P. 1–15 [in English].
6. Christiansen R. M. Mechanics of Composite Materials. Wiley: New York, NY, USA, 1979 [in English].
7. Gholamali Shafabakhsh, Mohammadreza Aliakbari Bidokhti, and Hassan Divandan. Evaluation of the performance of SBS/Nano-Al₂O₃ composite-modified bitumen at high temperature. *Road Mat. and Paves*, 2021, V.22, Issue 11. P. 2523–2537 [in English].
8. Hetnarski R. B. and Ignaczak J. Mathematical Theory of Elasticity, Taylor and Francis, New York, (2004) [in English].
9. Jorge Pais, Caio Santos, Paulo Pereira et al. The adjustment of pavement deflections due to temperature variations. *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 21, 2020 Issue 13. P. 1585–1594 [in English].
10. Ju J. W., Chen T. M. Effective elastic moduli of two-phase composites containing randomly dispersed spherical inhomogeneities. *Acta Mech*. 1994, 103(1). P. 123–144 [in English].
11. Kovalenko A. D. Thermoelasticity: Basic Theory and Applications, Wolters-Noordhoff Groningen, The Netherlands, (1972) [in English].
12. Marcela Fiedlerova, Petr Jisa, Kamil Stepanek. Using various thermal analytical methods for bitumen characterization. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2021, V. 14. Issue 4. P. 459–465 [in English].
13. Md Amanul Hasan, Rafiqul A. Tarefder. Development of temperature zone map for mechanistic empirical (ME) pavement design. *Journal of Pavement Research and Technology*. 2018, V. 11, Issue 1. P. 99–111 [in English].

14. Mirosław Graczyk, Józef Rafa, Adam Zofka Pavement modelling using mechanical and thermal homogenization of layered systems. Roads and Bridges *Drogi i Mosty*. Issue 17, 2, 2018, P. 141–157 [in English].
 15. Nowacki W. Thermoelasticity, 2 nd ed., Oxford: PWN – Polish Scientific Publishers, Warsaw and Pergamon Press, (1986) [in English].
 16. Setiawan Dian M. The role of temperature differential and subgrade quality on stress, curling, and deflection behavior of rigid pavement. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, Volume 29, Issue 5 – 6. id. 10. 12 p. [in English].
 17. Tarn Minh Phan, Tri Ho Minh Le, and Dae-Wook Park. Evaluation of cracking resistance of healed warm mix asphalt based on air-void and binder content. *Road Materials and Pavement Design*. 2022. V. 23, Issue 1. P. 47–61 [in English].
 18. Trusdell, C. (ed.), Carlson, D.E. Thermoelasticity, Encyclopedia of Physics, Vol. Via/2, Springer, Berlin, (1972) [in English].
 19. Yang Liu, Zhendong Qian, Dong Zheng, Meng Zhang Interlaminar thermal effect analysis of steel bridge deck pavement during gussasphalt mixture paving. *International Journal of Pavement Engineering*. Volume 20, 2019. Issue 11. P. 1323–1335 [in English].
 20. Yingjun Jiang, Changqing Deng, Zhejiang Chen, and Yuhang Tian. Evaluation of the cooling effect and anti-rutting performance of thermally resistant and heat-reflective pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, V. 21, Issue 4. P. 447–456 [in English].
-

Nataliia Shlyun, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1040-8870>

Yuliia Zaiets, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1836-2010>

Lyudmyla Shevchuk, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5748-9527>

Serhii Hudolij, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-6054-6708>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF THE OCCURRENCE OF THERMOMECHANICAL EFFECTS IN REINFORCED ROAD STRUCTURES, DUE TO THERMOELASTIC INCOMPATIBILITY OF PAVEMENT AND REINFORCEMENT MATERIALS

Abstract

Introduction. In regions with sharp temperature fluctuations during their seasonal and daily changes, the phenomenon of local defects and cracks forming in the asphalt concrete pavements of roads and bridges is very often observed. This is largely due to the heterogeneity of the thermomechanical properties of the materials in the pavement layers and base. To prevent these phenomena, reinforcing rods and grids are introduced into the pavement structure.

Problems. The problem addressed in the conducted research is to establish the patterns of thermomechanical deformation of composite materials (specifically, asphalt concrete) reinforced with steel rods under the influence of variable temperature fields.

Purpose. The objective of this work is to derive mathematical relationships that define the internal structural thermal stresses in composites, caused by variable temperature fields and material heterogeneity.

Materials and methods. Based on the theory of thermoelasticity, the problem of a plane thermodeformed state of an elastic medium containing a circular elastic rod with different thermomechanical parameters was formulated. For the case of a constant change in the system's temperature, an analytical solution to the equations was constructed, and expressions for thermal deformations and thermal stresses were obtained.

The results. Using the example of asphalt concrete material reinforced with fiberglass rods, analytical expressions for the values of additional contact thermal stresses were constructed, and the conditions for the thermomechanical incompatibility of asphalt concrete and reinforcement materials were formulated.

Conclusions. Using the methods of thermoelasticity theory, it was shown that in cases of incompatibility of the thermomechanical characteristics of asphalt concrete and reinforcement materials, additional localized thermal stresses arise in their immediate vicinity. These stresses, even at moderate temperature changes, can

reach critical values and lead to local defects and cracks. Since these defects are hidden, they cannot always be detected in practice.

Keywords: road, asphalt concrete, pavement, composite, variable temperature fields, intrastructural thermal stresses, rod reinforcement, surface course.

УДК 625.7/.8

Каськів В. І.¹, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>Касай К. І.², <https://orcid.org/0000-0003-3292-3339>¹Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна²Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ НА ВОДНО-ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Анотація

Вступ. Автомобільні дороги формують базову інфраструктуру перевезень, а їхній технічний стан безпосередньо впливає на стабільність логістики, безпеку руху та економічну ефективність. Значна частина дорожньої мережі України має нежорсткий дорожній одяг, для якого вирішальну роль відіграє стан ґрунтів робочого шару земляного полотна.

Проблематика. Підвищення надійності дорожньої конструкції є актуальним питанням галузі. Ураховуючи, що міцнісні і деформативні показники нежорсткого дорожнього одягу залежать від фізико-механічних показників ґрунту основи і відповідно від його вологості, існує потреба в урахуванні всіх чинників впливу на них і у точних розрахункових залежностях.

Мета. Розробити інженерно-придатний підхід математичного моделювання впливу атмосферних опадів на водно-тепловий режим робочого шару земляного полотна.

Матеріали та методи. За основу взято модель водно-теплого режиму, яка базується на диференціальних рівняннях переносу тепла і вологості в часткових похідних.

Результати. Запропоновано для розрахунку поля вологості $W(z, t)$ у шарі ґрунту за глибиною z замість функції $f(t)$ — однорідного за глибиною і перемінного в часі джерела надходження вологи, ввести функцію $f(z, t) = q(t) p(z)$, яка на думку авторів більш коректно відтворює надходження вологи від дощів у дорожню конструкцію.

Висновки. Запропонована постановка на базі дифузійного рівняння з просторово-часовим джерелом є збалансованою за складністю та точністю для інженерних розрахунків. Вона дозволяє використовувати фактичні дані опадів, враховувати реалістичну зміну вологості з глибиною, враховувати вид ґрунту.

Ключові слова: автомобільна дорога, вологість, водно-тепловий режим, ґрунт, дорожня конструкція, дощ, земляне полотно, опади, робочий шар.

Вступ

Автомобільні дороги були і залишаються одним із основних логістичних шляхів для будь-якої країни, а їхня надійність і забезпечення основних транспортно-експлуатаційних показників є критичною умовою безперервності перевезень, економічної стійкості та забезпечення безпеки дорожнього руху. Окрім того, однією із важливих складових вартості товару чи матеріалів є транспортна складова, величина якої на пряму залежить від швидкості і відстані транспортування. Тому питання забезпечення експлуатаційної надійності шляхів сполучення, підвищення міцності конструкції дорожнього одягу та строку його служби залишаються завжди актуальними і на часі. Також слід врахувати, що найбільші витрати під час ремонтів, реконструкції чи нового будівництва автомобільних доріг припадають саме на влаштування дорожнього одягу. Надійність конструкції якого визначається поєднанням транспортних навантажень, регіональних природних умов і водно-тепловим режимом (ВТР) земляного полотна.

Основна частина

Як відомо, в Україні майже вся мережа автомобільних доріг загального користування (за виключенням окремих ділянок) і вулично-дорожня мережа населених пунктів має дорожній одяг нежорсткого типу. Для дорожньої конструкції нежорстких дорожніх одягів критично важливим елементом є ґрунти земляного полотна (особливо робочий шар), фізико-механічні характеристики яких знижуються якщо їхня вологість зростає. Таку ж тенденцію показують довготривалі дослідження і спостереження, зокрема науковців США, які на замовлення Федерального управління автомобільних доріг (FHWA) виконували програму, яка включала в себе як польові, так і лабораторні випробування (Long-Term Pavement Performance Program) [1–3]. Результати досліджень свідчать про суттєву сезонну зміну модулів пружності шарів конструкції дорожнього одягу і підстильного ґрунту, мінімальні значення яких припадають на періоди підвищеної вологості — насамперед навесні. Такі ж результати отримали в своєму дослідженні у 2023 році Rahman M.M. та інші, які досліджували вплив вологості на модуль пружності ґрунту основи для прогнозування утворення колій на дорожньому покритті [4].

Максимальна сезонна вологість, як зазначалось, спостерігається у весняний період, тому саме цей період приймають розрахунковим. Ключовою інженерною проблемою постає збільшення міцності ґрунтів у розрахунковий період і стабілізація їхніх властивостей протягом року. Ефективний шлях — раціональне регулювання ВТР: обмеження надходження / утримання вологи, керування тепловими умовами верхньої зони земляного полотна та належне поверхнєве водовідведення. Поряд із капілярно-пароподібним зволоженням не можна недооцінювати дощові опади: у ґрунтах робочого шару високих насипів чи при глибокому заляганні ґрунтових вод у теплий період року саме опади стають основним джерелом зволоження [4 – 10].

Для більшості регіонів України від 60 % до 85 % річної кількості опадів випадає у теплий період (квітень – жовтень), тож аналіз стану конструкції та режимів відведення поверхневих вод доцільно фокусувати на цьому інтервалі.

Основні принципи, класифікацію і загальну систему рівнянь водно-теплого режиму (ВТР) дорожньої конструкції були закладені «на початку — в середині» двадцятого століття, зокрема видатним українським ученим-дорожником Сіденком В.М. [11, 12]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + b \frac{\partial W}{\partial t} \\ \frac{\partial W}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + a_1 b_1 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де T — температура, °С;

t — час, год;

a — коефіцієнт теплопровідності ґрунту, м²/год;

z — глибина (змінна координата), м;

b — коефіцієнт, який характеризує виділення або поглинання ґрунтом тепла внаслідок фазових перетворень, °С;

W — вологість, долі од.;

a_1 — коефіцієнт вологопровідності ґрунту, м²/год;

b_1 — коефіцієнт термоміграції (термодифузії) вологи, 1/°С.

У наукових працях Золотаря І. О., Пузакова В. М., Сіденка В. М., Тулаєва А. Я. [12] отримані аналітичні розв'язки системи (1) для різних схем зволоження, але в основному, увага була приділена зволоженню ґрунтів робочого шару земляного полотна внаслідок капілярного підняття вологи від ґрунтових вод або інфільтрації вологи із бокових каналів, а також пароподібному зволоженню і термоміграції вологи ґрунтів.

Як відмічалось, основна кількість опадів на території України припадає на теплий період року — з квітня по жовтень. Впродовж цього періоду температура повітря коливається більш відчутно ніж температура земляного полотна. Причому температура земляного полотна змінюється не значно порівняно з його вологістю, яка залежно від інтенсивності опадів може коливатися в широкому діапазоні від 0,0 W_T до 0,8 – 0,9 W_T (W_T — вологість на межі текучості). У роботах [11, 12] показано, що у дорожній конструкції до моменту встановлення деякої вологості набагато раніше встановлюється повний розподіл температури, тобто встановлюється стаціонарний теплообмін, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. Тому,

враховуючи ці передумови, можна знехтувати відповідними складовими системи (1) і звести її до рівняння:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}. \quad (2)$$

У роботі [6, 7] вплив атмосферних опадів враховано шляхом введення в рівняння (2) функції $f(t)$, а замість коефіцієнта вологопровідності, який згідно в методикою його визначення [12], відображає здатність ґрунтів до капілярного підняття, а не до інфільтрації, було введено коефіцієнт дифузії ґрунтової вологи (дифузивність) — D .

$$D = K_\phi \Psi_{\text{МГ}} n \text{ МГ}^n \theta^{n+0,6} \theta_{\text{max}}^{-(2n+7,6)}, \quad (3)$$

$$n = \frac{[2,7-5,2 \cdot 10^{-6} (100 \text{ НВ}/\rho_d)]}{\lg (\text{НВ}/\text{МГ})},$$

де D — коефіцієнт дифузії капілярної вологи, $\text{см}^2/\text{с}$;

K_ϕ — коефіцієнт фільтрації, $\text{см}/\text{с}$;

$\Psi_{\text{МГ}}$ — капілярно-сорбційний потенціал ґрунтової вологи при максимальній гігроскопічній вологості, см ;

МГ — максимальна гігроскопічна вологість, $\text{см}^3/\text{см}^3$;

θ — початкова вологість ґрунту $\text{см}^3/\text{см}^3$;

θ_{max} — повна вологість ґрунту $\text{см}^3/\text{см}^3$;

НВ — найменша вологоємність ґрунту, $\text{см}^3/\text{см}^3$;

ρ_d — щільність сухого ґрунту, $\text{кг}/\text{см}^3$.

З врахуванням залежностей (3) і те, що $\partial T/\partial t = 0$, у [6, 7] отримано вихідне рівняння математичної моделі для визначення вологості земляного полотна залежно від дії атмосферних опадів:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + f(t), \quad (4)$$

де W — вологість ґрунту, долі одиниць;

t — час, год;

z — глибина (змінна координата), м.

Під час атмосферних опадів має місце інфільтраційний водно-тепловий режим. За цього режиму для високих насипів у [7] було розроблено дві розрахункові схеми ВТР дорожньої конструкції, які обумовили різні початкові і граничні умови рівняння (2).

Перша схема передбачала відсутність дорожнього одягу або коли він водонепроникний, також її можна використовувати для тільки що зведених дорожніх насипів, насипів залізниць, узбіч чи укосів насипів і виїмок, які знаходяться в експлуатації.

Розглядаючи граничну задачу, коли вологість поверхневого шару земляного полотна після проходження дощу наближається до вологості повного вологонасичення ($W_{\text{пв}}$), можна виділити два розрахункові випадки. Перший — коли утворюється тимчасова калюжа і є застій води, а також при довгих зatoryжних дощах, тоді вологість поверхневого шару земляного полотна досягає $W_{\text{пв}}^* = 0,9 W_{\text{пв}}$.

Дослідженнями Л. Rehati було встановлено, що коефіцієнт водонасичення ґрунту не перевищує значення 0,9 із-за наявності в його порах повітря. Другий — у всіх інших випадках, і тоді $W_{\text{пв}}^* = (0,65 \dots 0,85) W_{\text{пв}}$.

Для цієї схеми, виходячи з припущення, що вологість в межах робочого шару змінюється незначно і дорівнює деякій початковій вологості W_0 , а вплив ґрунтових вод відсутній, так як насип високий, початкові і граничні умови сформульовано таким чином:

$$W(z, 0) = W_0; W(0, t) = W_{\text{пв}}^*, W(\lambda, t) = W_0, \quad (5)$$

де $W_{\text{пв}}^* = (0,65 \dots 0,90) W_{\text{пв}}$ — вологість поверхневого шару земляного полотна після проходження дощу у часах від вологості повного вологонасичення

λ — глибина інфільтрації опадів, тобто глибина до граничного значення якої дія опадів впливає на вологість ґрунтів.

Друга схема передбачала присутність водотривкого дорожнього одягу.
Граничні умови під дорожнім одягом:

$$W(0, t) = W_0 + m_D t, \quad (6)$$

де m_D — коефіцієнт, рівний горизонтальній складовій дифузивності.

За цих початкових і граничних умов у [6, 7] отримано математичну модель зміни вологості ґрунтів робочого шару земляного полотна автомобільних доріг від дії атмосферних опадів:

$$\left. \begin{aligned} i_{np,p} &= \phi(S, t); \\ f(t) &= \psi(t, \beta, i_{np,p}, Q, E); \\ W(z, t) &= W_{IIB} + A \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] - f(t)t; \\ W(z, t) &= W_{IIB} + \frac{A z}{\lambda} + \frac{2 A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} B C + f(t) L \sum_{n=1}^{\infty} N C; \\ W(z, t) &= W_0 + m_D t \left(1 - \frac{z}{\lambda} \right) - \frac{2 m_D t}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} B C + f(t) L \sum_{n=1}^{\infty} N C; \\ A &= (W_0 - W_{IIB}), \quad B = \sin \left(\frac{n \pi z}{\lambda} \right); \\ C &= \frac{2 \lambda^2}{D \pi^3}, \quad L = n^{-1} \exp \left(-\frac{D n^2 \pi^2}{\lambda^2} t \right); \\ N &= n^{-3} ((-1)^n - 1) \cdot \left[\exp \left(-\frac{D n^2 \pi^2}{\lambda^2} t \right) - 1 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де $i_{np,p}$ — приведена розрахункова інтенсивність дощу, яка залежить від кількості опадів, що випали і їхньої тривалості, мм/год.

Якщо проаналізувати рівняння (4), то це лінійне параболічне (дифузійне) рівняння вологості $W(z, t)$ у шарі ґрунту за глибиною z . Функція $f(t)$ — це однорідне за глибиною і змінне в часі джерело надходження води, яке відображає усереднений вплив опадів.

Початкові і граничні умови (5) і (6) «створюють» градієнти й визначають, як волога на поверхні проникає в глибину шару.

Модель (4) відповідає випадкам, коли дифузивність можна вважати сталою (коливання W помірні), а вплив атмосферних опадів адекватно описує усереднене у просторі джерело.

Коли доступні реальні дані півніограм або погодинні дані опадів, доцільно задавати просторово-часове джерело.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + f(z, t), \quad (8)$$

де $f(z, t)$ — волога від атмосферних опадів в точці z на момент часу t .

$$f(z, t) = q(t) p(z), \quad (9)$$

де $q(t)$ — часовий профіль інтенсивності зволоження на поверхні дорожньої конструкції, мм/год;

$p(z)$ — форма вертикального розподілу (наприклад, експоненціальне затухання $e^{-\beta z}$ або $\alpha e^{-\alpha z}$).

Цей підхід представляє атмосферні опади як часозмінний потік $q(t)$ (інтенсивність дощу), розподілений за глибиною за профілем $p(z)$, який швидко затухає (експоненційно). Параметри β або α залежать від виду ґрунту. Ці параметри визначають експериментально або калібрують за допомогою числового моделювання. Зокрема така задача числового моделювання інфільтрації дощової води у тіло насипу автомобільної дороги розташованого в місті Сантандер (Північна Іспанія) розглядається у роботі [5] де автори використали метод скінченних елементів (МСЕ).

На відміну від просторово однорідного джерела функція $f(z, t)$ дозволяє врахувати реальні дощі (пікову інтенсивність, тривалість, паузи); задати фізично обґрунтоване (експериментально встановлене) затухання впливу з глибиною (через параметри β або α); відрізнити короткі

зливи (сильний поверхневий імпульс) від затяжних дощів (глибша інфільтрація плюс довша тривалість впливу).

Також введенням щільності води ρ_w і сухого ґрунту ρ_d у рівнянні (10) можна врахувати вид ґрунту і його стан в дорожній конструкції чи насипу:

$$f_w(z, t) = \frac{\rho_w}{\rho_d} q(t) p(z). \quad (10)$$

Отримані значення зміни вологості $W(z, t)$ враховують при зміні фізико-механічних характеристик ґрунтів (модуль пружності, зчеплення, кут тертя тощо). Зростання вологості у робочому шарі зменшує ці показники тому коректне задання функції (10) є ключем до реалістичної оцінки несної спроможності і довговічності дорожньої конструкції.

Висновки

Надійність нежорстких дорожніх одягів істотно визначається коливаннями вологості робочого шару земляного полотна, тож регулювання водно-теплого режиму дорожньої конструкції залишається постійним інженерним пріоритетом.

Запропонована постановка на основі лінійного дифузійного рівняння з просторово-часовим джерелом $f(z, t) = q(t) p(z)$ є придатною інженерною основою для оцінювання впливу вологи опадів. Представлення опадів у вигляді часової інтенсивності $q(t)$ та вертикальної форми зміни вологості $p(z)$ (із фізично обґрунтованим затуханням за глибиною) дозволяє використовувати як реальні пліовіограми, так і їхні усереднені показники, що зробить прогнозування інфільтрації вологи опадів більш точнішим.

Для коректного застосування запропонованого рівняння й існуючих моделей потрібне визначення і калібрування коефіцієнта дифузії капілярної вологи, а також підбір закону зміни вологості ґрунту із глибиною з урахуванням виду ґрунту та дорожньої конструкції.

Список літератури

1. FHWA (LTPP): Seasonal Variations in the Moduli of Unbound Pavement Layers (FHWA-HRT-04-079). URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/04079/>.
2. Idaho DOT (ITD): Monitoring and Modeling Subgrade Soil Moisture for Pavement Design and Rehabilitation in Idaho (Final Report). URL: <https://apps.itd.idaho.gov/apps/research/Completed/RP124C.pdf>
3. Ahmed Abdelgawad, Mostafa A. Abo-Hashema. Modeling of seasonal variation of subgrade resilient modulus using ltp data. 13th Annual International Conference, Asphalt, Pavement Engineering and InfrastructureAt: Liverpool Centre for Materials Technology (LCMT), Liverpool, UK February 2014 URL: https://www.researchgate.net/publication/341213911_MODELING_OF_SEASONAL_VARIATION_OF_SUBGRADE_RESILIENT_MODULUS_USING_LTPP_DATA.
4. Rahman M. M. et al. (2023): Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. Geosciences 2023, 13(4), 103; DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103>.
5. Norambuena-Contreras J. et al. Nonlinear numerical simulation of rainwater infiltration through road embankments by FEM. Applied Mathematics and Computation. 219 (4). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.08.025>.
6. Каськів В. І. Математична модель розподілу вологості ґрунтів у робочому шарі високих насипів з врахуванням інфільтрації вологи дощів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2017. Вип. 100. С. 3–10. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/003-010.pdf.
7. Каськів В. І. Удосконалення показників робочої зони високих насипів з врахуванням інфільтрації атмосферних опадів : дис... канд. техн. наук : 05.22.11. К., 1998. 286 с.
8. Петрович В. В., Касай К. І., Дослідження характеристик опадів для розрахунків поверхневого водовідведення й інфільтрації вологи в ґрунт земляного полотна автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип. 115-2. С. 137–146. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/115.2/137.pdf.

9. Каськів В. І., Касай К. І. Аналіз підходів щодо оцінювання просочування опадів у ґрунт узбіччя автомобільних доріг. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 30. С. 253–263. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.253>.
10. Бубела А. В. Дослідження закономірностей зволоження дорожньої конструкції та методи його регулювання. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 105. С. 44–48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf.
11. Сіденко В. М. Розрахунок і регулювання водно-теплогового режиму дорожніх одягів і земляного полотна. Автотрансиздат, 1962. 116 с.
12. Пузаков М. А., Золотарь І. О., Сіденко В. М., Туласєв А. Я. Водно-тепловий режим земляного полотна і дорожніх одягів. *Транспорт*, 1971. 414 с.

References

1. FHWA (LTPP): Seasonal Variations in the Moduli of Unbound Pavement Layers (FHWA-HRT-04-079). URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/04079/> [in English].
2. Idaho DOT (ITD): Monitoring and Modeling Subgrade Soil Moisture for Pavement Design and Rehabilitation in Idaho (Final Report). URL: <https://apps.itd.idaho.gov/apps/research/Completed/RP124C.pdf> [in English].
3. Ahmed Abdelgawad, Mostafa A. Abo-Hashema. Modeling of seasonal variation of subgrade resilient modulus using ltp data. 13th Annual International Conference, Asphalt, Pavement Engineering and InfrastructureAt: Liverpool Centre for Materials Technology (LCMT), Liverpool, UK February 2014 URL: https://www.researchgate.net/publication/341213911_MODELING_OF_SEASONAL_VARIATION_OF_SUBGRADE_RESILIENT_MODULUS_USING_LTPP_DATA [in English].
4. Rahman M. M. et al. (2023): Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences* 2023, 13(4), 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences13040103> [in English].
5. Norambuena-Contreras J. et al. Nonlinear numerical simulation of rainwater infiltration through road embankments by FEM. *Applied Mathematics and Computation*. 219 (4). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.08.025> [in English].
6. Kaskiv V. I. Matematychna model rozpodilu volohosti gruntiv u robochomu shari vysokikh nasypiv z vrakhuvanniam infiltratsii volohy doshchiv. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo* (Mathematical model distribution soil humidity in the working layer high embankments taking into account moisture infiltration of the rain). 2017. Issue 100. P. 3–10. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/003-010.pdf [in Ukrainian].
7. Kaskiv V. I. Udoshkonalennia pokaznykiv robochoi zony vysokykh nasypiv z vrakhuvanniam infiltratsii atmosferykh opadiv (Improvement of indicators of the working zone of high embankments, taking into account the infiltration of atmospheric precipitation) : dys... kand. tekhn. nauk : 05.22.11. K., 1998. 286 p. [in Ukrainian].
8. Petrovych V. V., Kasai K. I. Doslidzhennia kharakterystyk opadiv dlia rozrakhunkiv poverkhnevoho vodovidvedennia y infiltratsii volohy v grunt zemlianooho polotna avtomobilnykh dorih. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo* (Study of precipitation characteristics for calculations of surface water drainage and moisture infiltration into the soil of road subgrade). 2024. Vyp. 119. Ch.2. P. 137–146 [in Ukrainian].
9. Volodymyr Kaskiv, Kostiantyn Kasai. Analysis of approaches to assessing rainwater infiltration into roadside soils. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 253–263 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.253> [in Ukrainian].
10. Bubela A. V. Doslidzhennia zakonmironostei zvolozhennia dorozhnoi konstrukttsii ta metody yoho rehuliuвання. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo* (Study of patterns of moistening of the road structure and methods of its regulation). 2019. Issue 105. P. 44–48. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/105/44.pdf [in Ukrainian].
11. Sidenko V. M. Rozrakhunok i rehuliuвання vodno-teplovoho rezhymu dorozhnikh odiahiv i zemlianooho polotna (Calculation and regulation of the water-thermal regime of road surfaces and ground surface). *Avtotransizdat*, 1962. 116 p.

12. Puzakov M. A., Zolotar I. O., Sidenko V. M., Tulaiev A. Ia. Vodno-teplovyyi rezhym zemliano-ho polotna i dorozhnikh odiahiv (Hydro-thermal regime of the road embankment and pavement structures). *Transport*, 1971. 414 p. [in Ukrainian].

Volodymyr Kaskiv¹, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

Kostiantyn Kasai², <https://orcid.org/0000-0003-3292-3339>

¹State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

²National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODELING OF THE EFFECT OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON THE HYDRO-THERMAL REGIME OF A ROAD EMBANKMENT

Abstract

Introduction. Roads constitute the backbone of the transport infrastructure, and their technical condition directly affects logistics stability, traffic safety, and economic efficiency. A significant portion of Ukraine's road network has flexible pavements, for which the condition of the subgrade soil plays a decisive role.

Problem statement. Enhancing the reliability of road structures remains a pressing issue in the sector. Since the strength and deformation parameters of flexible pavements depend on the physical and mechanical characteristics of the subgrade soil—and consequently on its moisture content—there is a need to account for all influencing factors and to develop accurate computational relationships.

Objective. To develop an engineering-applicable mathematical modeling approach to assess the impact of atmospheric precipitation on the hydro-thermal regime of the working layer of the road embankment.

Materials and methods. The proposed approach is based on a hydro-thermal model that employs differential equations of heat and moisture transfer in partial derivatives.

Results. To compute the moisture field $W(z, t)$ in the soil layer along depth z , the authors propose, instead of the commonly used function $f(t)$ — a time-dependent but depth-uniform source of moisture inflow — to introduce a function $f(z, t) = q(t) p(z)$. This formulation more accurately represents the moisture ingress from rainfall into the pavement structure.

Conclusions. The proposed formulation, based on a diffusion equation with a spatial-temporal source, provides a balanced compromise between computational complexity and accuracy for engineering applications. It enables the use of actual rainfall data, accounts for realistic moisture variation with depth, and considers the type of soil involved.

Keywords: road, moisture, hydro-thermal regime, soil, pavement structure, rainfall, embankment, precipitation, working layer.

УДК 625.7/.8

Кривобок О. В., <https://orcid.org/0000-0002-5424-8664>Острроверхий О. Г., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2182-2209>*Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна*

СУЧАСНІ МЕТОДИ УКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ ТА СПОСОБИ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ

Анотація

Вступ. У статті розглянуто основні методи укріплення ґрунтів у будівництві автомобільних доріг. Проведено детальний аналіз основних методів укріплення з точки зору інженерно-геологічних умов, економічної ефективності та довговічності. Визначено, що найбільш оптимальний вибір технології забезпечить підвищення несучої здатності дорожньої основи, зниження деформацій і збільшення строку служби дорожнього одягу.

Проблематика. В умовах воєнного стану в Україні, вибір ділянок для будівництва дорожньої інфраструктури стає особливо важливим. Обмеженість придатних територій змушуватиме використовувати ділянки зі слабкими ґрунтами для будівництва автомобільних доріг. Для забезпечення надійності та безпеки дорожнього одягу на таких територіях необхідно застосовувати спеціальні інженерні рішення та технології для укріплення шарів дорожнього одягу. Це дозволить ефективно використовувати наявні ресурси з несприятливими ґрунтовими умовами, оперативно відновлювати дорожню мережу та забезпечувати потреби населення і військових в умовах надзвичайних ситуацій.

Мета. Проаналізувати основні методи укріплення ґрунтів та вибір оптимальних рішень щодо укріплення для забезпечення надійності та довговічності дорожнього одягу.

Висновки. Розглянуті методи укріплення ґрунтів та вибору оптимальних рішень задля підвищення надійності конструкцій дорожнього одягу є однією з ключових задач у дорожньому будівництві оскільки це гарантує довговічність автомобільних доріг та безперервну роботу транспортної мережі, знижує потребу у частих ремонтних роботах та, відповідно, зменшує витрати на утримання доріг при обмеженому фінансуванні дорожньої галузі.

Ключові слова: автомобільна дорога, ґрунт, довговічність, дорожній одяг, технологія, укріплення ґрунтів.

Вступ

Одним із способів укріплення конструкції є укріплення шарів дорожнього одягу для підвищення несної здатності. Однак неоднорідність напружень і міцності в укріплених шарах значно більша, ніж в покритті. У перспективі це може мати негативний вплив на довговічність конструкції та сприяти виникненню передчасних пошкоджень.

Також необхідно зазначити, що в умовах сьогодення основне навантаження від рухомої техніки сприймає дорожня основа. Основна проблема полягає в тому, що вона не є стабільною. Укріплені шари, що слугують основою для дорожнього покриття, схильні до просочування вологою під впливом атмосферних опадів. Взаємодія вологи з ґрунтом у поєднанні з циклічними перепадами температур (зокрема, замерзання-відтавання) та динамічними навантаженнями від транспортних засобів призводить до нерівномірного просідання основи дорожнього одягу. Цей процес спричиняє деформацію структури дорожнього одягу та проявляється у вигляді тріщин, вибоїв та інших пошкоджень дорожнього покриття, незалежно від його матеріалу чи якості виконання. Нерівномірне просідання є критичним фактором, що знижує термін експлуатації дорожнього покриття та підвищує витрати на його ремонт і обслуговування.

Основна частина

У проєктах дорожнього будівництва ґрунт використовують як основу дорожнього одягу. Одним із методів покращення фізико-механічних показників є стабілізація за допомогою цементуючих матеріалів (цемент, вапно, зола-виносу, бітум або їх комбінація). Стабілізацію можна здійснювати двома способами: на місці та поза місцем будівництва.

Стабілізація ґрунту є ключовим процесом у дорожньому будівництві, спрямованим на покращення фізико-механічних властивостей ґрунту для забезпечення міцності, довговічності та стійкості дорожнього одягу. Стабілізація не завжди є універсальним засобом для поліпшення характеристик ґрунту. Вибір технології залежить від того, які саме властивості ґрунту необхідно модифікувати.

Стабілізація з використанням добавок

Стабілізація з використанням добавок передбачає введення цементуючих матеріалів для покращення властивостей ґрунту. Основними методами стабілізації є:

Стабілізація вапном

Вапно є економічно вигідним способом стабілізації ґрунту. Цей метод передбачає додавання вапна до ґрунту для покращення його властивостей, таких як міцність і стійкість до вологи. Використовують різні типи вапна: гідратоване вапно з високим вмістом кальцію, моногідратоване доломітове вапно, кальцитне негашене вапно або доломітове вапно. Зазвичай кількість вапна становить від 5 % до 10 % за масою ґрунту. Це робить глинисті ґрунти більш сухими та менш чутливими до змін вмісту вологи [6]. Така стабілізація також може включати пуцоланову реакцію, під час якої пуцоланові матеріали реагують з вапном у присутності води, утворюючи цементуючі сполуки [5,7]. Для цього можна використовувати як негашене вапно, так і гідратоване вапно. Найпоширенішим є негашене вапно через переваги порівняно з гідратованим вапном [7].

Стабілізація цементом

Стабілізація ґрунту цементом полягає у зв'язуванні частинок ґрунту внаслідок гідратації цементних частинок, які утворюють кристали, що можуть зчіплюватися між собою, забезпечуючи високу міцність на стиск. Для досягнення ефективного зв'язування цементні частинки повинні покривати більшість частинок матеріалу. Щоб забезпечити хороший контакт між частинками ґрунту та цементом, а отже, ефективну стабілізацію, необхідно змішувати цемент із ґрунтом із певним гранулометричним складом. Ґрунтоцемент — це високоущільнена суміш ґрунту / заповнювача, цементу та води. Ґрунтоцемент стає твердим і довговічним матеріалом у міру гідратації цементу та розвитку його міцності. Стабілізацію цементом виконують під час процесу ущільнення. Оскільки цемент заповнює порожнини між частинками ґрунту, коефіцієнт пористості ґрунту зменшується. Після додавання води до ґрунту цемент реагує з водою і твердне, що приводить до збільшення об'ємної ваги ґрунту. Завдяки твердінню цементу також зростають міцність на зсув і несна здатність. Цемент сприяє зниженню рідинної межі, підвищенню індекса пластичності та оброблюваності глинистих ґрунтів. Реакція цементу не залежить від мінералів ґрунту, а ключову роль відіграє його реакція з водою, яка може бути наявною у будь-якому ґрунті [10]. Це пояснює, чому цемент використовують для стабілізації широкого спектра ґрунтів. На ринку доступні різні типи цементу, зокрема звичайний портландцемент, доменний цемент, сульфатостійкий цемент і високоалюмінатний цемент. Вибір цементу зазвичай залежить від типу ґрунту, що підлягає обробці, та бажаної кінцевої міцності. Процес гідратації — це процес, під час якого відбувається реакція цементу. Він починається, коли цемент змішується з водою та іншими компонентами для певного застосування, що призводить до явища твердіння.

Хімічна стабілізація

Хімічна стабілізація ґрунту передбачає зміну фізико-хімічних властивостей навколо та всередині глинистих частинок, завдяки чому ґрунт потребує менше води для задоволення статичного дисбалансу. Хлорид кальцію, який є гігроскопічним, використовується як добавка для утримання води в механічно стабілізованих ґрунтових основах. Температура замерзання чистої води знижується, що сприяє

запобіганню або зменшенню морозного пучення. Завдяки пригніченню електричного подвійного шару сіль зменшує поглинання води та, відповідно, втрату міцності дрібнозернистих ґрунтів. Хлорид кальцію діє як флокулянт ґрунту та полегшує ущільнення. Для компенсації втрати хімікату через вимивання може знадобитися періодичне застосування хлориду кальцію. Щоб сіль була ефективною, відносна вологість атмосфери повинна перевищувати 30 %. Хлорид натрію є ще однією хімічною речовиною, яку можна використовувати для цієї мети з подібною стабілізуючою дією, як у хлориду кальцію. Силікат натрію — це ще одна хімічна речовина, яка використовується для цієї мети в комбінації з іншими хімікатами, такими як хлорид кальцію, полімери, хром. Ці речовини сприяють зміні фізико-хімічних властивостей ґрунту, зменшуючи його потребу у воді та покращуючи стабільність.

Стабілізація золою-винесення

Одним із перспективних методів удосконалення фізико-механічних властивостей ґрунтів є застосування золи-винесення — побічного продукту теплових електростанцій.

Зола-винесення містить активні сполуки кремнезему та кальцію, які в поєднанні з водою вступають у пуцоланові реакції. У результаті утворюються цементуючі речовини, що зменшують пористість, покращують зв'язність частинок ґрунту та забезпечують зростання його міцності. Стабілізації ґрунтів за допомогою золи-винесення є ефективним та екологічно орієнтованим рішенням, що дозволяє одночасно підвищити якість основ і раціонально використовувати промислові відходи. Однак для досягнення оптимального результату важливим є контроль складу золи та правильний вибір умов застосування.

Стабілізація бітумом

Стабілізація ґрунту бітумом — це процес, при якому контрольована кількість бітумного матеріалу ретельно змішується з наявним ґрунтом або заповнювачем для формування стабільної основи або поверхневого шару. Бітум підвищує когезію та несну здатність ґрунту, а також робить його стійким до дії води. Тип бітуму, який використовують, залежить від типу ґрунту, що стабілізується, методу будівництва та погодних умов. У районах із низькими температурами слід уникати використання смоли як в'язучого матеріалу через її високу температурну чутливість. При додаванні бітумних матеріалів до ґрунту вони забезпечують когезію та зменшують водопоглинання.

Чинники, що впливають на міцність стабілізованого ґрунту

Наявність органічних речовин, сульфатів, сульфідів і вуглекислого газу в стабілізованих ґрунтах може бути причиною зниження міцності стабілізованих матеріалів [5].

Органічні речовини

У багатьох випадках верхні шари ґрунту містять значну кількість органічних речовин. Однак у дренуючих ґрунтах органічна речовина може проникати на глибину до 1,5 м [5]. Органічні речовини в ґрунті реагують із продуктами гідратації, наприклад, гідроксидом кальцію, що призводить до зниження рН. Низьке значення рН може уповільнити процес гідратації та вплинути на твердіння стабілізованих ґрунтів, ускладнюючи або унеможливаючи їх ущільнення.

Сульфати

Використання стабілізаторів на основі кальцію в ґрунтах, багатих на сульфати, призводить до того, що в умовах надлишкової вологи стабілізований ґрунт реагує з утворенням кальцієвого сульфоалюмінату (етрингіту) або таумаситу. Ці продукти займають більший об'єм, ніж сумарний об'єм реагентів. Для розчинення сульфатів і перебігу реакції може знадобитися додаткова вода, крім тієї, що була присутня під час змішування [5, 11].

Сульфіди

У багатьох відходах і промислових побічних продуктах можуть бути присутні сульфіди, наприклад, у вигляді піриту заліза. Окислення утворює сірчану кислоту, яка в присутності карбонату кальцію може реагувати з утворенням гіпсу. Утворений гідратований сульфід у присутності надлишкової води може атакувати стабілізований матеріал подібно до сульфатів. Гіпс також може бути присутнім у природних ґрунтах [5, 10].

Ущільнення

На практиці додавання в'язучого суттєво впливає на щільність ґрунту. Стабілізована суміш має нижчу максимальну суху щільність, ніж нестабілізований ґрунт, за однакового ступеня ущільнення. Оптимальний вміст води зростає зі збільшенням кількості в'язучого [5]. У цементно-стабілізованих ґрунтах процес гідратації починається одразу після контакту цементу з водою. Цей процес передбачає твердіння ґрунтової суміші, що означає необхідність ущільнення суміші якомога швидше. Затримка в ущільненні може призвести до затвердіння стабілізованої ґрунтової маси, що вимагатиме додаткових зусиль для досягнення того ж ефекту. Це може спричинити серйозне руйнування зв'язків і, відповідно, втрату міцності. На відміну від цементу, затримка в ущільненні для вапно-стабілізованих ґрунтів може мати певні переваги. Вапно-стабілізований ґрунт потребує періоду дозрівання, щоб вапно могло дифундувати через ґрунт, забезпечуючи максимальний вплив на пластичність. Після цього періоду вапно-стабілізований ґрунт можна повторно змішати та остаточно ущільнити, що приводить до значної міцності порівняно з іншими методами [5].

Вологість

У стабілізованих ґрунтах достатній вміст води є важливим не лише для перебігу процесу гідратації, але й для ефективного ущільнення. Повністю гідратований цемент поглинає приблизно 20 % своєї ваги води з навколишнього середовища [5], тоді як негашене вапно поглинає близько 32 % своєї ваги води [5, 9]. Недостатній вміст води призводить до того, що значна її частина поглинається ґрунтом, унаслідок чого в'язучий матеріал не отримує достатньої кількості води для повноцінної гідратації. Для ґрунтів із високою водоутримувальною здатністю (глинистих, торф'яних та органічних) це може уповільнювати перебіг гідратаційних процесів і, відповідно, знижувати кінцеву міцність стабілізованого шару [9].

Температура

Пуцоланова реакція чутлива до змін температури. У польових умовах температура постійно змінюється протягом дня. Пуцоланові реакції між в'язучими матеріалами та частинками ґрунту сповільнюються за низьких температур, що призводить до зниження міцності стабілізованої маси. У холодних регіонах рекомендується проводити стабілізацію ґрунту в теплу пору року [5].

Висновки

Стабілізація ґрунтів є ключовим етапом дорожнього будівництва, спрямованим на підвищення несної здатності та довговічності основ дорожнього одягу. Використання різних стабілізаторів дозволяє керувати фізико-механічними властивостями ґрунту, зокрема об'ємною стабільністю, міцністю, стисливістю, водопроникністю та стійкістю до зовнішніх впливів. Вибір оптимального типу стабілізатора має ґрунтуватися на результатах лабораторних і натурних випробувань, що враховують геотехнічні характеристики та умови експлуатації. Подальший розвиток технологій стабілізації пов'язаний із впровадженням інноваційних матеріалів і комплексних методів зміцнення основ, які забезпечують підвищення якості ущільнення, морозостійкості й тріщиностійкості. Для підтвердження ефективності стабілізаторів необхідне системне проведення випробувань у різних кліматичних умовах, з урахуванням можливого впливу глобальних змін клімату на їхню довговічність і стабільність властивостей.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.1-2-96 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація. Київ. 1996. 52 с. (Інформація та документація).
2. ДСТУ ISO 14688-1:2021 Геотехнічні дослідження та випробування. Ідентифікація та класифікація ґрунтів. Частина 1. Ідентифікація та опис. Київ. 2001. 55 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ ISO 14688-2:2021 Геотехнічні дослідження та випробування. Ідентифікація та класифікація ґрунтів. Частина 2. Класифікація (ISO 14688-2:2017, IDT). Київ. 2021 35 с. (Інформація та документація).

4. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ. 2015. 52 с. (Інформація та документація).
5. Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO. (5)
6. Keller Inc., (2011). Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method. Keller Bronchure, 32-01E: URL: <http://keller-foundations.co.uk/technique/deep-dry-soilmixing>.
7. White, D. (2005). Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4.
8. EuroSoilStab. (2002). Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Bryssel.
9. Hicks, R. (2002). Alaska Soil Stabilization Design Guide.
10. Al-Tabbaa, A. and Evans, W. C. (2005). Stabilization-Solidification Treatment and Remediation: Part I: Binders and Technologies-Basic Principal. Proceedings of the International Conference on Stabilization/Solidification Treatment and Remediation. P. 367–385. Cambridge, UK: Balkema.
11. Hebib, S. and Farrell, E. R. (1999). Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. P. 81–84. Stockholm: Balkema.

References

1. DSTU B V.2.1-2-96 Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Grunty. Klasyfikatsiia (Foundations and bases of buildings and structures. Soils. Classification). Kyiv. 1996. 52 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
2. DSTU ISO 14688-1:2021 Heotekhnichni doslidzhennia ta vyprovuvannia. Identyfikatsiia ta klasyfikatsiia gruntiv. Chastyna 1. Identyfikatsiia ta opys (Geotechnical investigations and testing. Identification and classification of soils). Kyiv. 2001. 55 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
3. DSTU ISO 14688-2:2021 Heotekhnichni doslidzhennia ta vyprovuvannia. Identyfikatsiia ta klasyfikatsiia gruntiv. Chastyna 2. Klasyfikatsiia (Geotechnical investigations and testing. Identification and classification of soils. Part 2. Classification) (ISO 14688-2:2017, IDT). Kyiv. 2021 35 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
4. ДБН В.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo (Motorways. Part I. Design. Part II. Construction). Kyiv. 2015. 52 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
5. Sherwood, P. (1993). Soil stabilization with cement and lime. State of the Art Review. London: Transport Research Laboratory, HMSO. (5) [in English].
6. Keller Inc., (2011). Improvement of Weak Soils by the Deep Soil Mixing Method. Keller Bronchure, 32-01E: URL: <http://keller-foundations.co.uk/technique/deep-dry-soilmixing> [in English].
7. White, D. (2005). Fly Ash Soil Stabilization for Non-Uniform Subgrade Soils. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4 [in English].
8. EuroSoilStab. (2002). Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization. CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III) Bryssel [in English].
9. Hicks, R. (2002). Alaska Soil Stabilization Design Guide [in English].
10. Al-Tabbaa, A. and Evans, W. C. (2005). Stabilization-Solidification Treatment and Remediation: Part I: Binders and Technologies-Basic Principal. Proceedings of the International Conference on Stabilization/Solidification Treatment and Remediation P. 367–385. Cambridge, UK: Balkema [in English].
11. Hebib, S. and Farrell, E. R. (1999). Some Experiences of Stabilizing Irish Organic Soils. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization. P. 81–84. Stockholm: Balkema [in English].

Oleksandr Kryvobok, <https://orcid.org/0000-0002-5424-8664>

Oleg Ostroverkhyi, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2182-2209>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

MODERN METHODS OF SOIL STABILIZATION IN ROAD CONSTRUCTION AND WAYS TO IMPROVE THEM

Abstract

Introduction. The article discusses the main methods of soil stabilization in road construction. A detailed analysis of the main methods of reinforcement is carried out from the point of view of engineering and geological conditions, economic efficiency, and durability. It is determined that the most optimal choice of technology will ensure an increase in the bearing capacity of the road base, a reduction in deformations, and an increase in the service life of the road surface.

Issues. In the context of martial law in Ukraine, the selection of sites for road infrastructure construction is becoming particularly important. The limited availability of suitable areas will force the use of sites with weak soils for road construction. To ensure the reliability and safety of road surfaces in such areas, special engineering solutions and technologies must be used to reinforce the layers of the road surface. This will allow for the effective use of available resources with unfavorable soil conditions, the rapid restoration of the road network, and the provision of the needs of the population and the military in emergency situations.

Objective. To analyze the main methods of soil reinforcement and select optimal reinforcement solutions to ensure the reliability and durability of road surfaces.

Conclusions. The methods of soil reinforcement and the selection of optimal solutions to improve the reliability of road pavement structures are one of the key tasks in road construction, as this guarantees the durability of motorways and the continuous operation of the transport network, reduces the need for frequent repairs and, accordingly, reduces road maintenance costs with limited funding for the road industry.

Keywords: road, durability, soil reinforcement, soil, pavement, technology.

УДК 625.7/.8

Скрипник А. Л., канд. екон. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-4461-9433>Ячник М. В., <https://orcid.org/0009-0006-2510-6997>*Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна*

ОЦІНЮВАННЯ ВІДПОВІДНОСТІ ІННОВАЦІЙНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ У КОНТЕКСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕГЛАМЕНТУ (ЄС) № 305/2011 (CPR)

Анотація

Вступ. У сучасних умовах трансформації будівельної галузі України питання допуску на ринок та оцінювання відповідності інноваційних будівельних матеріалів і виробів є ключовими для забезпечення стійкого відновлення та розвитку інфраструктури, а також для інтеграції до європейського ринку. Водночас фактичне скасування нормативної бази для технічних умов (ТУ) створило значні складності оцінки відповідності такої продукції, оскільки вітчизняні процедури визначення технічної прийнятності будівельної продукції відрізняються від європейських.

Проблематика. У статті розглянуто правові та процедурні аспекти оцінки відповідності інноваційних будівельних матеріалів у контексті впровадження Регламенту (ЄС) № 305/2011 (CPR) та нового Регламенту 2024/3110. Особливу увагу приділено продукції, яка не охоплена гармонізованими європейськими стандартами (EN) і, відповідно, вимагає застосування з визначення прийнятності (EAD), нового національного стандарту або технічних умов (ТУ). Виконано аналіз особливості процедур розроблення європейських документів з визначення прийнятності та отримання на його підставі європейської технічної оцінки (ETA), а також вітчизняні процедури визначення технічної прийнятності будівельної продукції.

Мета. Дослідити механізми оцінки відповідності інноваційних будівельних матеріалів в Україні, на які відсутні hEN, та запропонувати шляхи вирішення існуючих проблем у контексті впровадження Регламенту ЄС № 305/2011 (CPR) та майбутнього впровадження Регламенту ЄС 2024/3110.

Матеріали і методи. Аналіз чинного законодавства України та ЄС, порівняльний аналіз українських та європейських систем визначення технічної прийнятності будівельної продукції.

Результати. Виявлено недоліки у механізмах оцінювання відповідності інноваційної будівельної продукції порівняно з європейськими підходами (зокрема два різних механізми визначення технічної прийнятності будівельної продукції (за EAD та за національними документи України з визначення прийнятності), необхідність фінансування розроблення нових нормативних документів виробниками інноваційної будівельної продукції, недостатня кількість та обмежена сфера призначених Органів з визначення технічної прийнятності будівельної продукції та випробувальних лабораторій, відсутність можливостей визнання EAD українськими Органами з сертифікації продукції тощо).

Висновки. Запропоновано практичні рекомендації для усунення виявлених проблем, які вимагають скоординованих зусиль органів державної влади, донорів, наукових установ, виробників будівельної продукції та органів з оцінки відповідності.

Ключові слова: гармонізований стандарт, дорожньо-будівельна продукція, інноваційні будівельні матеріали, європейський документ з визначення прийнятності, оцінювання відповідності, Регламент ЄС 305/2011 (CPR), Регламент ЄС 2024/3110, сертифікація продукції, технічні умови.

Вступ

У сучасних умовах трансформації будівельної галузі України питання безпечності, якості та відповідності будівельних матеріалів є ключовими для забезпечення відбудови за принципом «Build Back Better» та виходу промисловості будматеріалів України на ринок ЄС. Адаптація Регламенту ЄС 305/2011 (CPR) [1] в українське законодавство через ухвалення Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» [2] (який стане єдиним техрегламентом будівельної продукції

в Україні з 2026 року) висувають перед виробниками нові виклики, пов'язані з необхідністю належного документального та цифрового супроводу продукції, перманентної співпраці з уповноваженими органами з оцінки відповідності та готовності до проведення обстеження виробництва відповідно до системи AVCP, визначеної стандартом на відповідну продукцію (які в Україні легалізовані Постановою КМУ від 9 червня 2021 р. № 596 [3]).

У той же час слід зазначити, що певний перелік будівельних матеріалів і виробів (перш за все інноваційних) не підпадає під сферу дії Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку», і в першу чергу по причині відсутності відповідних гармонізованих європейських стандартів (далі — hEN). Для такої продукції у ЄС розробляється і затверджується інший тип нормативного документа — EAD, оцінювання відповідності за яким не передбачено сферою дії вітчизняних органів із сертифікації будівельної продукції. Натомість для таких видів будівельної продукції передбачена процедура визначення технічної прийнятності, для якої за рішенням виробника продукції можуть застосовуватись деякі EAD [2] або розробляться аналогічні національні документи [4], а також призначено один Орган з визначення технічної прийнятності будівельної продукції (далі — ОВТП) [5].

Тривалий час в Україні для надання на ринок інноваційної продукції, на яку відсутні державні стандарти, використовували так звані технічні умови (ТУ), які мали встановлену структуру та підлягали державній реєстрації. ТУ розробляли та затверджували виробники продукції, і, відповідно, могли не повністю відповідати вимогам забезпечення належних споживних властивостей та безпечності будівельної продукції. Також ускладненим було оцінювання відповідності будівельної продукції, виробленої за ТУ, оскільки даний різновид нормативного документа розповсюджується на продукцію лише одного виробника і зазвичай відсутній у сфері акредитації Органів оцінювання відповідності будівельної продукції (далі — ООВ).

У переважній більшості галузей вітчизняної економіки ТУ продовжують застосовуватись, однак правова база застосування даного виду документів для будівельної продукції в Україні наразі фактично скасована. Спочатку Наказом Мінекономрозвитку від 26.05.2014 № 615 «Про затвердження Зміни № 5 до національного стандарту України ДСТУ 1.3:2004 та скасування національного стандарту України ДСТУ 1.6:2004» [6] було скасовано державну реєстрацію ТУ, далі Наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства № 262/1614 (з1375-16) від 26.09.2016 [7] було скасовано «Порядок видання та розповсюдження нормативних документів у галузі будівництва і промисловості будівельних матеріалів» [8], і в підсумку було скасовано постанову КМУ від 1 березня 2006 р. № 240 «Про затвердження Правил підтвердження придатності нових будівельних виробів для застосування» (яка передбачала оцінку їх відповідності на підставі ТУ) [9]. У той же час, за нашими спостереженнями, переважна більшість вітчизняних виробників будівельної продукції продовжує використовувати ТУ як підставу для надання її на ринок.

Проведений нами аналіз свідчить, що тема оцінки відповідності інноваційних будівельних матеріалів у контексті впровадження Регламенту ЄС № 305 в Україні є недостатньо дослідженою, незважаючи на її високу актуальність. Так існуючі дослідження переважно зосереджені на процесі гармонізації національного законодавства з нормативною базою ЄС у сфері будівництва (зокрема, значний обсяг праць присвячений Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» як ключовому національному акту, що імплементує вимоги Регламенту ЄС 305/2011 (CPR)). Водночас проблемні питання оцінювання відповідності вітчизняних інноваційних будівельних матеріалів і виробів, на які відсутні hEN, наразі не знайшли належного відображення ані у нормативній базі, ані у наукових працях (окрім праць ДП «НДІБК» [10]). Саме тому дослідження механізмів оцінки відповідності інноваційних будівельних матеріалів в умовах відсутності hEN є надзвичайно важливим з практичної точки зору як для виробників відповідної продукції, так і для вітчизняних ООВ.

Основна частина

Регламент ЄС № 305/2011 (Construction Products Regulation, CPR), був прийнятий 9 березня 2011 року з метою забезпечити вільний обіг в межах єдиного ринку ЄС будівельної продукції — будь-якого матеріалу, виробу або комплексу, що виробляють та вводять в обіг для застосування

протягом тривалого часу в будівлях або спорудах, показники якого впливають на показники будівлі або споруди, пов'язані з основними вимогами до них. Цей регламент став ключовим нормативним актом, який встановив єдині гармонізовані умови для розміщення будівельної продукції на ринку Європейського Союзу і розповсюджується на 35 її категорій, які мають безпосередній вплив на функціональні властивості та безпеку будівель і споруд.

Основною умовою допуску будівельної продукції на ринок ЄС є оцінювання її відповідності уповноваженими європейськими органами. Так, якщо на продукцію існують hEN, то оцінювання її відповідності здійснюють так звані нотифіковані органи із застосуванням процедури, визначеної згідно вказаної у hEN системи оцінки і перевірки стабільності експлуатаційних характеристик (AVCP). У результаті на продукцію видають Європейський сертифікат відповідності (сертифікат CE), який є підставою для складання Декларації експлуатаційних характеристик продукції (DoP) та нанесення на неї CE-маркування, після чого вона може вільно реалізовуватись на ринках усіх країн ЄС [11].

Наразі регламент ЄС № 305/2011 (CPR) замінений у ЄС новою версією (Регламентом ЄС 2024/3110 [12], що вступив у дію 7 січня 2025 року з перехідним періодом 1 рік), яка має ряд відмінностей від попередньої, зокрема:

- додавання нової, 36-ї категорії будівельної продукції «Others» (інші), що зокрема включає конструкції, надруковані на 3D-принтері, збірні або модульні елементи (включаючи фасадні системи), а також будівельні вироби, що були повторно використані чи перероблені;
- впровадження цифрового паспорту продукції (Digital Product Passport, DPP);
- обов'язкове включення декларації екологічності продукції (EPDs) до декларації її експлуатаційних показників (DoP).

Слід зазначити, що сфера дії обох вказаних європейських регламентів досі не включає переважну більшість інноваційних будівельних матеріалів та виробів — тобто будівельної продукції, що характеризується якісно новими або значно поліпшеними експлуатаційними показниками, технологіями виробництва або складом, які не були раніше широко застосовані в будівельній практиці. До такої продукції можна зокрема віднести:

- «зелені» та екологічно чисті матеріали: з низьким вуглецевим слідом, використанням вторинної сировини, біорозкладні матеріали (наприклад, композити на основі льону чи конопель);
- «розумні» матеріали: ті, що змінюють свої властивості у відповідь на зовнішні впливи (наприклад, самовідновлювальні бетони, термохромні покриття, матеріали з інтегрованими сенсорами);
- нові композитні матеріали: полімери, армовані волокнами; конопляно-вапняні блоки;
- високоефективні ізоляційні матеріали: аерогелі, вакуумні панелі.

Наразі основні аспекти виведення на ринок та оцінювання відповідності інноваційних будівельних матеріалів, у разі коли вимоги до будівельної продукції не покриваються або не повністю покриваються hEN, у ЄС залишилися без змін. У цьому випадку виробник повинен застосовувати специфічну процедуру оцінювання відповідності, яка передбачає розроблення на інноваційну будівельну продукцію або її групу так званої регламентної технічної специфікації, яка засвідчує її безпечність, стабільність і експлуатаційні характеристики (якщо така специфікація не була розроблена раніше за заявкою іншого виробника аналогічної продукції). Оцінювання відповідності у цьому випадку проводять згідно із специфікацією, що отримала назву європейський документ з визначення прийнятності (EAD) [13]. За структурою та змістом він є віддаленим аналогом пострадянського ТУ (включаючи опис будівельної продукції та її передбачуваного використання; перелік її суттєвих характеристик; методи та критерії оцінки експлуатаційних показників), однак, на відміну від ТУ, EAD містить також рекомендації щодо вибору системи AVCP (хоча конкретна система AVCP у ньому не вказується). У свою чергу з точки зору порядку розроблення та застосування EAD та ТУ мають дві істотні відмінності:

1. На відміну від ТУ, які розробляють за кошти вітчизняного виробника інноваційної будівельної продукції, розроблення EAD (у разі його відсутності) фінансує Європейська організація з технічного оцінювання (EOTA), яка в свою чергу частково фінансується Європейською Комісією. Це

знижує витрати європейських виробників інноваційної будівельної продукції і дозволяє їм в умовах відсутності доходів від її реалізації безкоштовно отримати нормативний документ, згідно якого вона буде виведена на ринок.

2. ТУ в Україні розробляють на продукцію конкретного виробника і є його власністю, тому їх використання можливе тільки з його дозволу (і, як правило, на платній основі). Більш того, вітчизняний виробник будівельної продукції не зобов'язаний навіть розміщувати текст ТУ на неї у відкритому доступі, і тому розповсюджує його на власний розсуд.

Натомість EAD є публічним документом, який розповсюджують на безкоштовній основі (на відміну від hEN). Він є власністю ЕОТА і може використовуватись будь-яким європейським виробником відповідної будівельної продукції. Це також сприяє зниженню витрат нових європейських виробників інноваційної будівельної продукції, та водночас забезпечує єдність підходів до формування та визначення якості такої продукції (чого неможливо досягти за використання ТУ, оскільки їх зміст у кожного виробника може істотно відрізнятись).

На відміну від ТУ, які може розробити та затвердити сам виробник, розроблення EAD та подальше оцінювання відповідності за нею здійснюють спеціальні органи технічної оцінки (ТАВ), якими можуть бути як нотифіковані органи ЄС, так і інші організації, призначені ЕОТА (включаючи ТАВ Норвегії, Швейцарії та Туреччини, які добровільно доєдналися до європейської системи оцінювання відповідності). Наразі налічується 53 таких органи, кількість яких в країні може сягати від 1 (наприклад, у Австрії) до 6 (у Нідерландах) [14]. При цьому виробник будівельної продукції для розроблення EAD та / або оцінювання відповідності за ним може звернутись до будь-якого ТАВ, незалежно від його географічної приналежності.

Слід зазначити, що EAD розробляють тільки для тієї будівельної продукції, для якої немає відповідного мандата на розроблення hEN. ТАВ розробляє проєкт EAD у співпраці з виробником, спираючись на знання будівельної продукції та її передбачуваного використання. Проєкт EAD проходить узгодження з іншими органами ТАВ, а потім з ЕОТА, забезпечуючи консенсус щодо вимог до інноваційної будівельної продукції та методів оцінювання її відповідності.

Оцінювання відповідності будівельної продукції за EAD здійснюють шляхом видавання органом ТАВ європейської технічної оцінки (ЕТА) — документа, що підтверджує придатність певної будівельної продукції для використання у будівництві відповідно до її основних характеристик, визначених у EAD, а також визначає систему AVCP для неї (на основі рекомендацій, наданих у EAD) [15]. Отримання ЕТА від органів ТАВ, аналогічно до отримання сертифіката відповідності від нотифікованого органу, дозволяє наносити на будівельну продукцію CE-маркування, що є обов'язковим для надання такої продукції в обіг на ринку ЄС. При цьому ЕТА мають необмежений термін дії і визнаються у всіх країнах-членах ЄС та країнах, які доєдналися до європейської системи оцінювання відповідності.

Сфера розроблення EAD здебільшого включає продукцію для захисту будівельних конструкцій та / або людей від різноманітних негативних впливів, включаючи вогонь, шум, вологу, радіацію, електромагнітний вплив, механічний знос, корозію тощо. При цьому EAD може також розроблятися і на будівельну продукцію, на яку існують hEN, але не всі її властивості ними охоплюються (наприклад, на антисептичну фарбу). Потребують розроблення EAD і інноваційні будівельні матеріали та вироби, що застосовуються при нестандартних будівельних технологіях, наприклад конопляно-вапняні блоки, суміші для будівельного 3-D друку, матеріали для самовідновлюваного асфальтового покриття [16]. Також EAD розробляють для будівельної продукції, яка охоплена hEN, але її передбачуване використання виробником відрізняється від зазначеного у цьому стандарті.

В Україні ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» (що має юридичний статус техрегламента), охоплює 35 категорій будівельної продукції, але водночас сфера його застосування обмежена чітким переліком національних стандартів (ДСТУ EN), ідентичних гармонізованим європейським (hEN), які надають виробам презумпцію відповідності вимогам Закону (Наказ Мінрегіону від 18 лютого 2022 року № 54 [17]).

У той же час існує деяка кількість будівельної продукції, на яку існують hEN, але яка не увійшла до сфери дії ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» (наприклад ДСТУ EN 12004-1:2020 (EN 12004-1:2017, IDT), що встановлює вимоги до клейових сумішей для керамічних плиток [18]). Для такої продукції залишається можливість добровільної сертифікації згідно з Законом України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» [19] та ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2019 [20], яку мають право провести ООВ, акредитовані Національним агентством з акредитації України (далі — НААУ) [21].

Також необхідно звернути увагу, що залишається абсолютно невирішеним питання допуску на ринок та оцінювання відповідності інноваційної будівельної продукції, яка не увійшла до сфери дії ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» (тобто до вказаних у ньому 35 категорій), та на яку при цьому відсутні hEN. Чи зможе така продукція, у разі її розроблення, надаватись на ринок України за ТУ (як зараз), та яким чином буде оцінюватись її відповідність в умовах, коли будь-які ТУ відсутні у сфері акредитації ООВ, акредитованих НААУ — діючою нормативною базою наразі не врегульовано.

Таким чином, наразі в Україні можна виділити 4 групи будівельної продукції з точки порядку допуску на ринок та процедури оцінювання відповідності, які наведені у складеній нами матриці (рис 1):

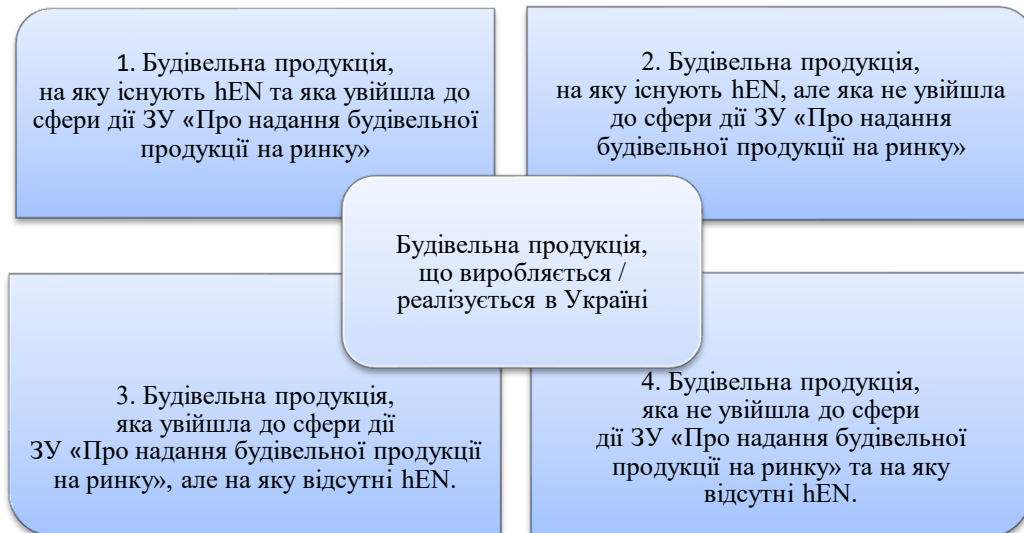


Рисунок 1 — Класифікація будівельної продукції в Україні з точки зору порядку допуску на ринок та процедури оцінювання відповідності

Для будівельної продукції, що не охоплюється або не повністю охоплюється hEN, які входять до сфери застосування ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» [22], передбачено розроблення національних стандартів [23], які аналогічно до hEN будуть містити визначення системи оцінки та перевірки стабільності показників для даної будівельної продукції (відповідно до Постанови № 596 від 09.06.2021 «Про затвердження систем оцінки та перевірки стабільності показників будівельної продукції» [3]), та після свого затвердження будуть включені до сфери застосування ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку». Таким чином, на відміну від ЄС, для такої продукції будуть розроблятися стандарти (аналоги hEN), а не регламентні технічні специфікації (аналоги EAD). Також, на відміну від європейської процедури отримання ЕТА, вітчизняна процедура оцінювання відповідності інноваційних будівельних матеріалів («визначення технічної прийнятності») не буде добровільною, а стане обов'язковою умовою допуску цієї продукції на ринок України.

Правовий нонсенс полягає також у тому, що, відповідно до статті 18 ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку», європейські документи з визначення прийнятності (EAD та ETAG (які були попередниками EAD)) в Україні також можна буде застосувати за рішенням виробника з метою подальшої видачі висновку про технічну прийнятність. Це призведе до того, що визначення технічної прийнятності для одних видів будівельної продукції буде здійснюватись за новими національними документи України з визначення прийнятності (НДУВП) (розробленими відповідно до Постанови № 1348), а для інших — за EAD.

Слід зазначити, що наразі 358 EAD та 13 ETAG вже внесено до ЄДЕССБ [24], що легітимізує їх застосування в Україні [2]. Водночас фахівцями ДП «НДІБК» станом на 2023 рік було встановлено наявність у ЄС більше 500 EAD, які були оприлюднені чи готувались до оприлюднення [10]. Ще однією проблемою застосування європейських документів з визначення технічної прийнятності в Україні є відсутність офіційних перекладів EAD та ETAG, що ускладнює їх коректне застосування вітчизняними виробниками інноваційної будівельної продукції та ОВТП.

Слід зазначити, що процедура розроблення НДУВП в Україні є тривалою та дороговартісною. Детально вона описана у Постанові КМУ від 23 грудня 2021 р. № 1458 «Деякі питання надання будівельної продукції на ринку» [4], звідки випливає, що розроблення НДУВП на будівельну продукцію буде фінансуватись виробником відповідної продукції, а здійснювати її має право лише ОВТП, що отримали відповідне призначення від Мінекономіки. Такий орган в Україні наразі тільки один (на базі ДП «НДІБК» [5]). Окрім цього зазначений ОВТП призначений усього за 12 категоріями із 35 (зокрема у сфері призначення вказаного органу немає дорожньої будівельної продукції, що безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху), і тому, хто розроблятиме НДУВП для інших категорій інноваційної будівельної продукції, наразі невідомо.

Висновки про технічну прийнятність будівельної продукції згідно із постановою № 1458 уповноважені також надавати ті ж ОВТП, які розробляли відповідний національний стандарт. Таким чином, на відміну від статусу документ НДУВП про відповідність будівельної продукції та порядку його отримання, процедура визначення технічної прийнятності будівельної продукції в цілому аналогічна європейській процедурі отримання ЕТА з трьома істотними відмінностями:

- нормативним документом, згідно якого оцінюватиметься відповідність будівельної продукції, як вже зазначалось, може бути не тільки EAD (як у ЄС), але і відповідний НДУВП, розроблений відповідно до Постанови № 1348;

- у процесі визначення технічної прийнятності будівельної продукції вітчизняний ОВТП здійснює заходи оцінювання відповідності згідно системи AVCP, вказаної у попередньо розробленому ним НДУВП, у той час як у ЄС система AVCP визначається не у EAD, а у потім у ЕТА, і використовується органом ТАВ не для оцінювання відповідності, а лише для подальшого технічного нагляду за виробництвом будівельної продукції;

- в Україні, на відміну від ЄС вартість робіт із визначення технічної прийнятності будівельної продукції регламентується законодавчо (згідно з Постановою КМУ № 89 від 26 січня 2024 року [25]); зокрема до 10 % обмежено розмір планового прибутку, який включають до калькуляції загальної вартості вказаних робіт, а також встановлено обов'язок ОВТП сплатити не менше 10 % вартості цих робіт національній організації органів з визначення технічної прийнятності. Теоретично таке регулювання має сприяти обмеженню вартості визначення технічної прийнятності будівельної продукції в умовах відсутності конкуренції, але оскільки наразі не відомо жодного практичного кейса визначення технічної прийнятності будівельної продукції в Україні, то оцінити ефект вказаних обмежень наразі неможливо.

Слід зазначити, що законодавство ЄС дозволяє виробникам будівельної продукції з інших країн пройти оцінку її відповідності у нотифікованих європейських органах або органах ТАВ із отриманням права нанесення СЕ-маркування та подальшої реалізації такої продукції на ринку ЄС. Таким чином українські виробники будівельних матеріалів та виробів можуть звертатися для оцінювання відповідності своєї продукції до будь-яких нотифікованих органів або органів ТАВ, і таким чином відкрити доступ своїй продукції на ринок ЄС. Однак отримані в результаті європейські документи

щодо оцінювання відповідності будівельної продукції (сертифікат CE або ETA) не матимуть юридичної сили на території України, оскільки між Україною та ЄС не укладено угоди про взаємне визнання результатів оцінки відповідності (Mutual Recognition Agreements, MRA). Водночас, відповідно до вимог статті 45 Закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності», застосування на території України сертифікатів відповідності, виданих ООВ інших країн, є можливим за умови їх визнання ООВ України, акредитованим НААУ, та за наявності в цього ООВ договору про визнання з іноземним ООВ, що видав сертифікат відповідності, а також акредитації іноземного ООВ установою, що входить до однієї із НААУ міжнародної або регіональної організації з акредитації.

У вказаному аспекті існує значна відмінність між сертифікатами CE та ETA. Так якщо сертифікати CE вітчизняних та іноземних виробників можуть бути без проблем визнані ООВ, які акредитовані НААУ та мають у своїй сфері акредитації відповідні ДСТУ EN (аналогічні за змістом до hEN), натомість ETA на інноваційну будівельну продукцію не можуть бути визнані в Україні, оскільки у сфері акредитації вітчизняних ООВ жодного EAD чи ETAG немає (і не може бути, оскільки з даним типом документів мають право працювати тільки ОБТП).

Аналогічну відмінність мають і вітчизняні процедури обов'язкової сертифікації будівельної продукції за ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» та процедури визначення технічної прийнятності інноваційної будівельної продукції. Так сертифікати відповідності, видані вітчизняними ООВ на підставі протоколів випробувань за європейськими методиками та створені на їх підставі DoP загалом відповідають структурі та змісту сертифікатів CE і можуть у разі укладання між Україною та ЄС угоди MRA стати підставою для CE-маркування української будівельної продукції; натомість висновок про технічну прийнятність, виданий в Україні на підставі нового НДУВП, не відповідає структурі та змісту ETA та не матиме юридичної сили в ЄС. У майбутньому це може стати серйозним бар'єром для експорту української інноваційної будівельної продукції та змусить її виробників проводити оцінку її відповідності у органах TAB.

Слід зазначити, що визначення технічної придатності інноваційної будівельної продукції вимагає також наявності сучасних випробувальних лабораторій, що здатні проводити випробування основних її експлуатаційних показників за європейськими методиками. На сьогодні немає офіційної інформації, чи всі 35 категорій будівельної продукції (наведені у ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку») охоплені акредитованими НААУ вітчизняними лабораторіями, зданими проводити випробування за європейськими методиками, і, враховуючи надвисоку вартість відповідного випробувального обладнання та значну тривалість процесу акредитації, існують об'єктивні сумніви із цього приводу.

Ускладнює процес оцінювання відповідності інноваційної будівельної продукції і відсутність у переважної більшості її українських виробників належних знань. Як показують наші дослідження, незважаючи на значне просування України у сфері впровадження Регламенту ЄС № 305/2011 (CPR), більшість українських підприємств ще не мають належного розуміння нової процедури визначення технічної прийнятності будівельних матеріалів та виробів, що вимагає від держави та європейських донорів вагомих інвестицій у підготовку персоналу у сфері оцінювання відповідності будівельної продукції та консультативної підтримки цього процесу.

Висновки

Оцінювання відповідності інноваційних будівельних матеріалів в умовах відсутності hEN є складним, але вкрай необхідним аспектом євроінтеграції України та впровадження Регламенту ЄС № 305/2011 (CPR). Нормативною базою для оцінювання відповідності такої продукції є європейські документи з визначення прийнятності (EAD) та європейські технічні оцінки (ETA), які мають прийти на зміну національним технічним умовам (ТУ), які, незважаючи на скасовану правову основу в будівельній сфері, продовжують розроблятися вітчизняними виробниками інноваційної будівельної продукції та використовуватись для її добровільної сертифікації.

Хоча процес визначення технічної прийнятності інноваційної будівельної продукції є дорогим і тривалим, він відкриває українським виробникам шлях до вільного обігу продукції на внутрішньому ринку та успішної конкуренції із європейськими виробниками. Водночас існуюча в Україні система

оцінки відповідності інноваційних будівельних матеріалів, на які відсутні hEN, наразі має суттєві недоліки порівняно з європейською моделлю, що потребують якнайшвидшого усунення для забезпечення інноваційного розвитку вітчизняної промисловості будматеріалів та її належної конкурентоспроможності на внутрішньому та зовнішніх ринках.

До основних проблем оцінювання відповідності інноваційної будівельної продукції в Україні в контексті євроінтеграції наразі належать:

- невідповідність ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» вимогам регламенту ЄС 2024/3110 9 (у тому числі відсутність нової 36-ї категорії будівельної продукції);
- неврегульованість питання оцінювання відповідності та допуску на ринок будівельної продукції, яка не увійшла до сфери дії ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» та на яку відсутні hEN;
- можливість визначення технічної прийнятності будівельної продукції за двома різними типами документів: національними стандартами (розробленими по аналогії з hEN) та регламентними технічними специфікаціями (EAD та ETAG);
- відсутність значної кількості EAD у ЄДЕССБ, внесення до якої легалізує їх застосування в Україні;
- відсутність офіційних перекладів EAD та ETAG;
- покладання фінансового тягаря розроблення нормативних документів на інноваційну будівельну продукцію, на яку відсутні hEN та EAD на виробників (що суперечить європейській практиці);
- фактична відсутність конкуренції серед ОБТП будівельної продукції та обмежена сфера діяльності вже призначених ОБТП;
- відсутність механізму визнання ЕТА в Україні;
- відсутність для деяких категорій будівельної продукції (згідно ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку») достатньої кількості випробувальних лабораторій, які акредитовані НААУ, здатні проводити випробування основних її експлуатаційних показників за європейськими методиками;
- недостатня поінформованість виробників інноваційної будівельної продукції щодо порядку її допуску на ринок України та ЄС.

Для вирішення вказаних проблем, на нашу думку, необхідно вжити деяких заходів, найважливішими з яких є такі:

- приведення ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» у відповідність до регламенту ЄС 2024/3110;
- врегулювання питання оцінювання відповідності та допуску на ринок будівельної продукції, яка не увійшла до сфери дії ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку» та на яку відсутні hEN;
- уніфікація підходів до визначення технічної прийнятності будівельної продукції відповідно до європейської практики, забезпечивши використання для її проведення тільки EAD та аналогічних за змістом і структурою національних документів;
- регулярне внесення нових EAD до ЄДЕССБ;
- офіційний переклад EAD та ETAG, внесених до ЄДЕССБ;
- забезпечення можливості державного, грантового або змішаного фінансування розроблення національних стандартів для інноваційної будівельної продукції;
- призначення додаткових ОБТП для забезпечення конкуренції та охоплення усіх категорій будівельної продукції;
- запровадження механізму визнання ЕТА в національній системі оцінки відповідності;
- забезпечення усіх 35 категорій будівельної продукції (згідно з ЗУ «Про надання будівельної продукції на ринку») випробувальними лабораторіями, що акредитовані НААУ та здатні проводити випробування основних її експлуатаційних показників за європейськими методиками;
- запровадження освітніх програм та надання консультаційних послуг вітчизняним виробникам інноваційної будівельної продукції стосовно порядку надання її на ринок та оцінювання відповідності.

Впровадження запропонованих змін потребуватиме скоординованих зусиль органів державної влади, донорів, наукових установ, виробників будівельної продукції та органів з оцінки відповідності.

Список літератури

1. Regulation (EU) No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC. *Official Journal of the European Union*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32011R0305> (дата звернення: 04.09.2025).
2. Про надання будівельної продукції на ринку: Закон України від 02.09.2020 № 850-IX (ред. від 12.05.2022 № 2254-IX). Законодавство України / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/850-20#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
3. Про затвердження систем оцінки та перевірки стабільності показників будівельної продукції: Постанова Кабінету Міністрів України від 9 червня 2021 р. № 596. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/596-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
4. Деякі питання надання будівельної продукції на ринку: Постанова Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2021 р. № 1458. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1458-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
5. Свідцтво про призначення органу з визначення технічної прийнятності від 26 березня 2024 р. № 3431-09/20. НДІБК. URL: http://www.niisk.com/images/Свідцтво_орган%20з%20ТП+++.pdf (дата звернення: 04.09.2025).
6. Про затвердження Зміни № 5 до національного стандарту України ДСТУ 1.3:2004 та скасування національного стандарту України ДСТУ 1.6:2004: Наказ Мінекономрозвитку України від 26.05.2014 № 615. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0615731-14#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
7. Про визнання таким, що втратив чинність, наказу Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики та Держбуду від 24.02.2003 № 27/12: Наказ Мінрегіонбуду України від 26.09.2016 № 262/1614. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1375-16#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
8. Про затвердження порядку видання та розповсюдження нормативних документів у галузі будівництва і промисловості будівельних матеріалів: Наказ Державного комітету України з будівництва та архітектури від 24.02.2003 № 27/12. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0185-03#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
9. Про затвердження Правил підтвердження придатності нових будівельних виробів для застосування: Постанова Кабінету Міністрів України від 1 березня 2006 р. № 240. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/240-2006-%D0%BF> (дата звернення: 04.09.2025).
10. Белоконь О., Фаренюк Г., Гах Н. Застосування європейських документів з визначення прийнятності за визначеними категоріями будівельної продукції. *Наука та будівництво*. 2023. № 3(37). DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-4>.
11. CE marking of construction products step by step. *European Commission*. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/12308/attachments/1/translations/en/renditions/native> (дата звернення: 04.09.2025).
12. Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and of the Council of 13 November 2024 on construction products. *Official Journal of the European Union*. URL: <https://www.construction-products.eu/publications/cpr-2/> (дата звернення: 04.09.2025).
13. FAQs on EADs for Ukrainian Parolees. *CLINIC Legal*. URL: https://www.cliniclegal.org/sites/default/files/2023-01/faqs_on_eads_for_ukrainian_parolees_2023_01_12_english.pdf (дата звернення: 04.09.2025).
14. Members of European Organisation for Technical Assessment (EOTA). *EOTA official website*. URL: <https://www.eota.eu/members> (дата звернення: 04.09.2025).
15. European Technical Assessments (ETA). *EOTA official website*. URL: <https://www.eota.eu/what-is-an-eta-old> (дата звернення: 04.09.2025).

16. AI-powered self-healing asphalt: a step toward sustainable, net-zero roads. *Swansea University News*. 2025. URL: <https://www.swansea.ac.uk/press-office/news-events/news/2025/02/ai-powered-self-healing-asphalt-a-step-toward-sustainable-net-zero-roads.php> (дата звернення: 04.09.2025).
17. Про затвердження переліку національних стандартів, ідентичних гармонізованим європейським: Наказ Мінрегіону від 18 лютого 2022 р. № 54. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=98459 (дата звернення: 04.09.2025).
18. ДСТУ EN 12004-1:2020. Клейові суміші для керамічних плиток. Частина 1. Вимоги, оцінювання відповідності, класифікація та маркування (EN 12004-1:2017, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
19. Про технічні регламенти та оцінку відповідності: Закон України від 15.01.2015 № 124-VIII. *Законодавство України / Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
20. ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2019. Оцінка відповідності. Вимоги до органів з сертифікації продукції, процесів та послуг (EN ISO/IEC 17065:2012, IDT; ISO/IEC 17065:2012, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
21. Каськів В. І., Скрипник А. Л., Вирожезький В. К., Ячник М. В., Зеленовський В. А. Проблемні питання забезпечення якості дорожньо-будівельних матеріалів та виробів у контексті особливостей їх сертифікації в Україні відповідно до ДСТУ EN ISO/IEC 17065:2019 та Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку». *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. С. 244–252. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.244>.
22. Про затвердження переліку категорій будівельної продукції: Постанова Кабінету Міністрів України від 28 квітня 2021 р. № 426. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/426-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 04.09.2025).
23. Про затвердження Порядку застосування національних стандартів для будівельної продукції, що надається на ринку та не охоплюється або не повністю охоплюється національними стандартами: Постанова Кабінету Міністрів України від 02 грудня 2022 р. № 1348. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1348-2022-%D0%BF> (дата звернення: 04.09.2025).
24. Про затвердження переліку європейських документів з визначення прийнятності: Наказ Міністерства інфраструктури України від 19 серпня 2024 р. № 880. URL: <https://mindev.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-pereliku-jevropeiskix-dokumentiv-z-viznacennia-priiniatnosti> (дата звернення: 04.09.2025).
25. Про затвердження Правил визначення вартості робіт з розроблення національних документів України з визначення прийнятності, видачі висновку про технічну прийнятність та порядку розподілу коштів, отриманих від замовника, між відповідним органом з визначення технічної прийнятності та національною організацією органів з визначення технічної прийнятності: Постанова Кабінету Міністрів України від 26 січня 2024 р. № 89. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/89-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 04.09.2025).

References

1. Regulation (EU) No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC. *Official Journal of the European Union*. Available at: URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32011R0305> (Accessed: 04 September 2025) [in English].
2. Verkhovna Rada of Ukraine. (2020) Zakon Ukrainy No. 850-IX «Pro nadannia budivelnoi produktsii na rynku» [Law of Ukraine No. 850-IX "On the Provision of Construction Products on the Market"] (as amended 12.05.2022 No. 2254-IX). Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/850-20#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021) Postanova No. 596 «Pro zatverdzhennia system otsinky ta perevirky stabilnosti pokaznykiv budivelnoi produktsii» [Resolution No. 596 «On Approval of Systems for Assessment and Verification of Constancy of Performance of Construction Products»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/596-2021-%D0%BF#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].

4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021) Postanova No. 1458 «Deiaki pytannia nadannia budivelnoi produktsii na rynku» [Resolution No. 1458 «Certain Issues of Provision of Construction Products on the Market»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1458-2021-%D0%BF#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
5. NIISK. (2024) Svidotstvo pro pryznachennia orhanu z vyznachennia tekhnichnoi pryiniatnosti, No. 3431-09/20 vid 26 bereznia 2024 r. [Certificate of appointment of the body for technical assessment, No. 3431-09/20 of 26 March 2024]. Available at: URL: http://www.niisk.com/images/Свідоцтво_опран%20з%20ТІІ+++pdf (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
6. Ministry for Economic Development of Ukraine. (2014) Nakaz No. 615 «Pro zatverdzhennia Zminy No. 5 do DSTU 1.3:2004 ta skasuvannia DSTU 1.6:2004» [Order No. 615 «On Approval of Amendment No. 5 to DSTU 1.3:2004 and repeal of DSTU 1.6:2004»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0615731-14#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
7. Ministry for Regional Development of Ukraine. (2016) Nakaz No. 262/1614 «Pro vyznannia takim, shcho vtratyv chynnist, nakazu Derzhspozhyvstandartu ta Derzhbudu No. 27/12 vid 24.02.2003» [Order No. 262/1614 «On recognition as invalid the Order of Derzhspozhyvstandart and Derzhbud No. 27/12 of 24.02.2003»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1375-16#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
8. State Committee of Ukraine on Construction and Architecture. (2003) Nakaz No. 27/12 «Pro zatverdzhennia poriadky vydannia ta rozpovsiudzhennia normatyvnykh dokumentiv u haluzi budivnytstva i promyslovosti budivelnykh materialiv» [Order On Approval of the Procedure for Publication and Distribution of Regulatory Documents in Construction and Building Materials Industry]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0185-03#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
9. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2006) Postanova No. 240 «Pro zatverdzhennia Pravyl pidtverdzhennia prydatnosti novykh budivel'nykh vyrobiv dlia zastosuvannia» [Resolution No. 240 «On Approval of the Rules for Confirming the Suitability of New Construction Products for Use»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/240-2006-%D0%BF> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
10. Belokon, O., Farenjuk, H. and Hakh, N. (2023) Application of European documents for assessing acceptability by defined categories of construction products, *Nauka ta budivnytstvo (Science and Construction)*. 3(37). DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2023-4> [in Ukrainian].
11. European Commission. CE marking of construction products step by step. Available at: URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/12308/attachments/1/translations/en/renditions/native> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].
12. Regulation (EU) 2024/3110 of the European Parliament and of the Council of 13 November 2024 on construction products. *Official Journal of the European Union*. Available at: URL: <https://www.construction-products.eu/publications/cpr-2/> (Accessed: 04 September 2025) [in English].
13. CLINIC Legal. FAQs on EADs for Ukrainian Parolees. Available at: URL: https://www.cliniclegal.org/sites/default/files/2023-01/faqs_on_eads_for_ukrainian_parolees_2023_01_12_english.pdf (Accessed: 04 September 2025) [in English].
14. European Organisation for Technical Assessment (EOTA). Members. Available at: URL: <https://www.eota.eu/members> (Accessed: 04 September 2025) [in English].
15. European Organisation for Technical Assessment (EOTA). European Technical Assessments (ETA). Available at: URL: <https://www.eota.eu/what-is-an-eta-old> (Accessed: 04 September 2025) [in English].
16. Swansea University. (2025) AI-powered self-healing asphalt: a step toward sustainable, net-zero roads. *Swansea University News*. Available at: URL: <https://www.swansea.ac.uk/press-office/news-events/news/2025/02/ai-powered-self-healing-asphalt-a-step-toward-sustainable-net-zero-roads.php> (Accessed: 04 September 2025) [in English].

17. Ministry for Regional Development of Ukraine. (2022) Nakaz No. 54 «Pro zatverdzhennia pereliku natsionalnykh standartiv, identychnykh harmonizovanykh yevropeiskym» [Order No. 54 «On Approval of the List of National Standards Identical to Harmonised European Standards»]. Available at: URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=98459 (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].

18. DSTU EN 12004-1:2020. (2020) Kleovi sumishi dlia keramichnykh plytok. Chastyna 1. Vymohy, otsiniuvannia vidpovidnosti, klasyfikatsiia ta markuvannia (EN 12004-1:2017, IDT) [Adhesives for ceramic tiles. Part 1. Requirements, conformity assessment, classification and marking]. Kyiv: SE «UkrNDNC» [in Ukrainian].

19. Verkhovna Rada of Ukraine. (2015) Zakon Ukrainy No. 124-VIII «Pro tekhnichni rehlymenty ta otsinku vidpovidnosti» [Law of Ukraine No. 124-VIII «On Technical Regulations and Conformity Assessment»] of 15.01.2015. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/124-19#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].

20. DSTU EN ISO/IEC 17065:2019. (2019) Otsinka vidpovidnosti. Vymohy do orhaniv z sertyfikatsii produktsii, protsesiv ta posluh (EN ISO/IEC 17065:2012, IDT; ISO/IEC 17065:2012, IDT) [Conformity assessment. Requirements for bodies certifying products, processes and services]. Kyiv: SE «UkrNDNC» [in Ukrainian].

21. Kaskiv, V. I., Skrypnyk, A. L., Vyrozhemskyi, V. K., Yachnyk, M. V. and Zelenovskyi, V. A. (2024). Problemni pytannia zabezpechennia yakosti dorozhnio-budivelnykh materialiv ta vyrobiv u konteksti osoblyvosti yikh sertyfikatsii v Ukraini vidpovidno do DSTU EN ISO/IEC 17065:2019 ta Zakonu Ukrainy «Pro nadannia budivelnoi produktsii na rynku» [Problematic issues of ensuring the quality of road construction materials and products in the context of certification in Ukraine under DSTU EN ISO/IEC 17065:2019 and the Law of Ukraine «On the Provision of Construction Products on the Market»], *Dorohy i mosty* (Roads and Bridges), 30, P. 244–252. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.244> [in Ukrainian].

22. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021) Postanova No. 426 «Pro zatverdzhennia pereliku katehorii budivel'noi produktsii» [Resolution No. 426 «On Approval of the List of Categories of Construction Products»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/426-2021-%D0%BF#Text> (Accessed: 04 September 2025). [in Ukrainian].

23. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022) Postanova No. 1348 «Pro zatverdzhennia Poriadku zastosuvannia natsional'nykh standartiv dlia budivel'noi produktsii, shcho nadaie'sia na rynku ta ne okhopeniuiet'sia abo ne povnistiu okhopeniuiet'sia natsional'nykh standartamy» [Resolution No. 1348 «On Approval of the Procedure for Application of National Standards for Construction Products Not or Not Fully Covered by National Standards»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1348-2022-%D0%BF> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].

24. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2024) Nakaz No. 880 «Pro zatverdzhennia pereliku yevropeiskykh dokumentiv z vyznachennia pryiniatnosti» [Order No. 880 «On Approval of the List of European Documents for Determining Acceptability»]. Available at: URL: <https://mindev.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-pereliku-jevropeiskix-dokumentiv-z-viznachennia-priiniatnosti> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].

25. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024) Postanova No. 89 «Pro zatverdzhennia Pravyh vyznachennia vartosti robit z rozroblennia natsional'nykh dokumentiv Ukrainy z vyznachennia pryiniatnosti, vydachi vysnovku pro tekhnichnu pryiniatnist' ta poriadku rozpodilu koshtiv, otrymanykh vid zamovnyka, mizh vidpovidnym orhanom z vyznachennia tekhnichnoi pryiniatnosti ta natsional'noiu orhanizatsiieiu orhaniv z vyznachennia tekhnichnoi pryiniatnosti» [Resolution No. 89 «On Approval of the Rules for Determining the Cost of Works for Development of National Documents of Ukraine on Acceptability, Issuance of a Conclusion on Technical Acceptability and the Procedure for Distribution of Funds Received from the Customer»]. Available at: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/89-2024-%D0%BF#Text> (Accessed: 04 September 2025) [in Ukrainian].

Andrii Skrypnyk, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-4461-9433>

Mariia Yachnyk, <https://orcid.org/0009-0006-2510-6997>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructurt» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

**ASSESSMENT OF THE COMPLIANCE OF INNOVATIVE CONSTRUCTION
MATERIALS AND PRODUCTS IN THE CONTEXT OF THE IMPLEMENTATION
OF REGULATION (EU) NO 305/2011 (CPR)**

Abstract

Introduction. In the current context of the transformation of Ukraine's construction sector, the issues of market access and conformity assessment of innovative construction materials and products are key to ensuring sustainable recovery and infrastructure development, as well as integration into the European market. At the same time, the de facto cancellation of the regulatory framework for technical specifications (TU) has created significant challenges for the conformity assessment of such products, since domestic procedures for determining the technical suitability of construction products differ from European ones.

Problem statement. This article examines the legal and procedural aspects of conformity assessment of innovative construction materials in the context of the implementation of Regulation (EU) No 305/2011 (CPR) and the new Regulation (EU) 2024/3110. Particular attention is paid to products not covered by harmonized European standards (EN) and therefore requiring the application of a European Assessment Document (EAD), a new national standard, or technical specifications (TU). The author analyzes the specific features of the procedures for developing a European Assessment Document (EAD) and obtaining a European Technical Assessment (ETA) on its basis, as well as domestic procedures for determining the technical suitability of construction products.

Objective. To explore the mechanisms of conformity assessment of innovative construction materials in Ukraine not covered by hENs, and to propose solutions to the existing problems in the context of the implementation of Regulation (EU) No. 305/2011 (CPR) and the forthcoming implementation of Regulation (EU) 2024/3110.

Materials and methods: Analysis of current Ukrainian and EU legislation, comparative analysis of Ukrainian and European systems for determining the technical suitability of construction products.

Results. Significant shortcomings in the mechanisms of conformity assessment of innovative construction products have been identified compared to European approaches (including two different mechanisms for determining the technical suitability of construction products—via EAD and via DSTU, the need for manufacturers of innovative construction products to finance the development of new DSTUs, the insufficient number and limited scope of designated Technical Assessment Bodies and testing laboratories, the lack of opportunities for recognition of EADs by Ukrainian product certification bodies, etc.).

Conclusions. Practical recommendations have been proposed to address the identified problems, requiring coordinated efforts of public authorities, donors, research institutions, construction product manufacturers, and conformity assessment bodies.

Keywords: product certification, road construction products, European Assessment Document, harmonized standards, innovative construction materials, conformity assessment, EAD, TU, Regulation (EU) 305/2011 (CPR), Regulation (EU) 2024/3110.

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., канд. хім. наук, пров. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-7584-9031>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ АНГЛОМОВНОГО ТЕРМІНА «PAVEMENT» ТА ПОХІДНИХ СЛОВОСПОЛУЧЕНЬ

Анотація

Вступ. У вступі до статті стисло зазначено проблеми створення ідентичного технічного змісту у процесі робіт з гармонізації національних стандартів України з нормативними документами інших систем у певних сферах стандартизації.

Проблематика. Тематика статті стосується питань інтерпретації англomовних термінів, що застосовують для опису конструкції та елементів конструкції у сферах проектування й будування доріг і аеродромів.

Мета. Метою статті є аналіз можливості практичного застосування окремих застандартизованих термінів для створення ідентичного технічного змісту під час виконання перекладу стандартів інших систем стандартизації.

Результати. Проаналізовано застандартизовані рішення стосовно перекладу та інтерпретації англomовного терміна *pavement* та похідних термінів-словосполучень, ключових за напрямками цивільного будівництва і будування доріг, та показано необхідність уточнення україномовних відповідників.

На підставі результатів робіт з національної стандартизації представлено рішення, застосовані для забезпечення ідентичності технічного змісту для опису конструкцій (елементів конструкцій) дорожнього та аеродромного одягу. Також запропоновано варіанти альтернативних рішень для інтерпретації ключового терміна.

Висновки. Надано висновок щодо обмеженості можливостей практичного застосування застандартизованих на національному рівні термінологічних відповідників англomовного терміна *pavement* під час виконання перекладу першоджерел.

Визначено, що для відтворення технічного змісту першоджерел інтерпретацію англomовного терміна *pavement* та похідних словосполучень потрібно виконувати суто на підставі технічного змісту об'єкту аналізування.

Окреслено доцільність пошуку рішення, яке забезпечить універсальну інтерпретацію широко застосовуваного у сфері робіт зі стандартизації в галузі цивільного будівництва англomовного терміна *pavement*.

Ключові слова: автомобільна дорога, аеродром, аеропорт, будування, дорожній одяг, покриття, термінологія.

Вступ

У процесі виконання робіт з національної стандартизації, в разі гармонізації національних стандартів України з регіональними (європейськими) нормативними документами та міжнародними стандартами різних систем шляхом виконання ідентичного перекладу, актуальними є питання забезпечення відповідності технічного змісту НД через надання релевантних термінів.

Якщо звернутися до виконаних фахівцями ДП «НІРІ» робіт, де об'єкти стандартизації визначено, зокрема, кодами ICS 93.080.10 «*Road construction*» (код НК 004:2020 – 93.080.10 «Будування доріг»), ICS 93.080.20 «*Road materials*» (код НК 004:2020 – 93.080.20 «Дорожньо-будівельні матеріали») та ICS 93.120 «*Construction of airports*» (код НК 004:2020 - 93.120 «Будування аеропортів»), у більшості охоплених цими сферами НД ужито терміни щодо конструкції та елементів конструкції в будівництві доріг та аеропортів (дорожній, аеродромний одяг) які, в англomовному варіанті, оперують терміном *pavement*. Інтерпретація цього беззаперечно ключового за напрямком будування автомобільних доріг та аеропортів терміна і похідних словосполучень часто потребує окремого опрацювання.

Ураховуючи досвід виконання робіт з національної стандартизації, доцільно розглянути варіанти інтерпретації терміна *pavement* і похідних словосполучень, які потенційно можуть слугувати підставою для уточнення положень окремих термінологічних стандартів системи національних стандартів України.

Аналіз окремих положень термінологічних стандартів системи національних стандартів України

З точки зору об'єкту аналізування цієї статті потрібно виділити два основоположні термінологічні стандарти, які охоплено класом 93 «Цивільне будівництво» за певними групами та підгрупами класифікатора НК-004:2020 — стандарти [1] та [2].¹

Якщо звернутися до положень словника термінів [1], термін *pavement* вказано як англословний відповідник терміна «дорожній покриття» для визначення дороги, злітно-посадкової смуги чи аналогічної конструкції, улаштованої по верху ґрунтової основи. Такий термін-словосполучення, за наведеного визначення поняття, потребує уточнення в обох його частинах.

Покриття загально визнано є шаром конструкції, що безпосередньо сприймає дію навантаження і передає утворене навантаження, з його розподілянням, у розташовані нижче шари.² Шар конструкції, що безпосередньо сприймає дію навантаження, влаштовують на ґрунтовій основі в обмежених випадках. Проектні розрахунки для сучасних рівнів навантаження переважно передбачають влаштування на ґрунтовій основі конструкції, що складається, залежно від особливостей об'єкту проектування, з додаткового шару основи з дисперсних матеріалів, шару основи з монолітних або дисперсних матеріалів і покриття, — такого, що здатен сприймати навантаження за згинання, за непрямого розтягнення (монолітний асфальтобетонний або бетонний (для низьких рівнів навантаження — також з матеріалів, укріплених гідравлічним в'язучим), рідко — брукотий). Такі шари, разом або вибірково, складають конструкцію дорожнього або аеродромного одягу, яку описують терміном *pavement*, часто із застосуванням додаткового визначення — *road pavement*, *airfield pavement* або інше (більш детально це питання розглянуто нижче в «Практичні питання сумісності...»). З урахуванням викладеного наведено в [1] інтерпретацію терміна *pavement* як «покриття» не можна визнати доцільною, оскільки така інтерпретація суттєво обмежує рамки застосування терміна.

Водночас потрібно зазначити, що прийняті схеми проектування конструкцій, які зазнають впливу навантаження від автомобільного транспорту та повітряних суден, передбачають розрахунки за різними параметрами навантаження. Певною мірою параметри навантаження від споряджених автотранспортних засобів для перевезення надважких вантажів (*superheavy vehicle*; *superheavy load*) наближаються до навантаження, яку може передавати повітряне судно — це залежатиме, зокрема, від підходів до створення моделі навантаження, проте для конструкцій дорожніх одягів відповідні рівні навантаження не приймають як вихідні дані для проектування. Для забезпечення проїзду таких автотранспортних засобів виконують побудову маршруту руху в існуючій мережі доріг, ґрунтовану, наприклад, у разі проїзду автомобільними дорогами з нежорстким дорожнім одягом на випробуванні конструкції дорожнього одягу на міцність методами *in situ* і аналізуванні міцності відповідно до прийнятих на національному рівні схем проектування, із обов'язковим аналізуванням міцності на зсув.³ Підкреслимо ще раз — відповідно високі рівні навантаження як правило не приймають за вихідні дані для проектного розрахунку конструкцій дорожнього одягу. Ураховуючи викладене, застосування терміна «дорожній покриття» у [1] щодо конструкції злітно-посадкової смуги у частині визначення «дорожній» також не можна визнати коректним.

В іншому термінологічному стандарті [2] у складі терміноstatей щодо елементів дорожнього одягу застандартизовано, сукупно з англословними термінами-відповідниками, терміни «дорожній одяг» (*pavement*) та «дорожній покриття» (*road pavement*).

¹ Тексти НД, наведені в системі «БУДСТАНДАРТ: ДОРОЖНЯ ГАЛУЗЬ», версія 3.20.0, база № 297.

² На відміну від країн ЄС, де верхній шар конструкції описують терміном *pavement*, у США часто застосовують термін *surface course*.

³ Відповідні питання розглянуто в серії матеріалів «Питання методологічного забезпечення відповідності дорожнього одягу критичним рівням навантажень», рукописи яких надано для розгляду до Збірника наукових праць «Дороги і мости», ДП «НІРІ».

Під час виконання робіт з гармонізації національних стандартів із міжнародними стандартами системи ASTM, що перебувають під юрисдикцією Технічного комітету E 17 «*Vehicle - Pavement Systems*», підкомітету E 17.41 «*Pavement Testing and Evaluation*», а також із європейськими стандартами, що перебувають під юрисдикцією Технічного комітету CEN/TC 227 «*Road materials*», з урахуванням технічного змісту вихідних положень регіональних та міжнародних стандартів, зазначені положення термінологічних стандартів не знайшли практичного застосування.

Нижче розглянуто впроваджені рішення.

Практичні питання сумісності застандартизованих термінів, англomовних відповідників та визначень понять

Структуру термінів, пропонувану за результатами розроблення національних стандартів, ідентичних стандартам системи ASTM⁴, наведено на **рис. 1**.

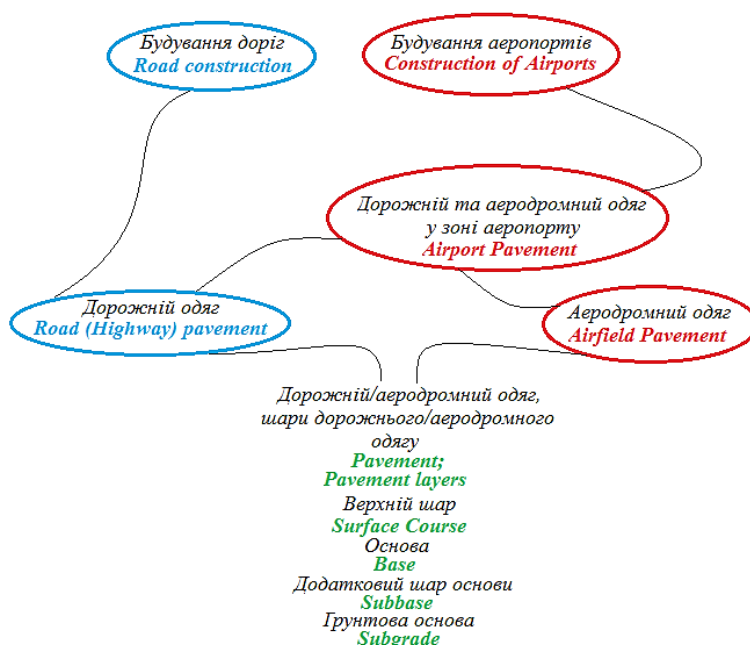


Рисунок 1 — Пропонована схема інтерпретації терміна *pavement* та похідних словосполучень за результатами опрацювання стандартів системи ASTM

Зміст елемента «Дорожній / аеродромний одяг, шари дорожнього / аеродромного одягу» (визначення є застосовним відповідно до терміна «аеродром» та визначеного поняття згідно з [1]) (**рис. 1**) може варіюватися для різних об'єктів, як це було зазначено вище. Згідно з наведеною схемою у процесі інтерпретування терміна *pavement* у разі, коли об'єкт стандартизації або аналізу стосується будівництва аеропортів, за відсутності додаткових ознак (*road pavement*, *airfield pavement*, *airport pavement* або інше) було визнано доцільним впровадити україномовний термін «дорожній / аеродромний одяг». Ураховуючи, що згідно з опрацьованими стандартами системи ASTM базові вимоги щодо геотехнічних випробувань для всіх зон аеропорту є однаковими, запропонований переклад забезпечуватиме ідентичний технічний зміст і водночас дозволяє узгоджувати застосування, для зони аеропорту в цілому, схем проектування, прийнятих для різних конструкцій, за різних параметрів навантаження.

Стисло розглянемо можливість застосування застандартизованих термінів щодо дорожнього одягу та елементів дорожнього одягу згідно з [2] за результатами розроблення національних стандартів, гармонізованих шляхом виконання ідентичного перекладу з європейськими НД відповідно до сфери стандартизації «Дорожньо-будівельні матеріали» (національні стандарти серії ДСТУ EN 13877 та ДСТУ EN 13863) та зазначеними стандартами ASTM (див. виноску 4).

⁴ Набуття чинності відповідних стандартів - згідно з Наказом ДП «УкрНДНЦ» від 27.05.2025 № 90.

У стандартах серії ДСТУ EN 13877 у термінологічному розділі терміну *concrete pavement* відповідає визначення поняття верхнього шару, який здатен витримувати безпосереднє навантаження від руху транспорту та зовнішні впливи – тобто це є шар покриття (бетонного покриття з урахуванням ознаки *concrete*). Стандарти серії ДСТУ EN 13863, на які посилаються стандарти серії ДСТУ EN 13877, відповідно установлюють методи випробувань бетонного покриття (проте окремі положення є застосовними щодо основи, що термінологічно виділено в тексті — для основи дорожнього одягу вжито ключовий англomовний термін *roadbase*). Англomовні терміни щодо дорожнього одягу й елементів дорожнього одягу, ужиті у вихідних положеннях європейських нормативних документів, не є ідентичними англomовним термінам-відповідникам у зазначених терміно статтях [2], відповідно терміни, застандартизовані в [2], практичного застосування не знайшли.

Термін *road pavement*, ужитий в окремих виділених положеннях зазначених вище стандартів ASTM, стосується конструкції, яку влаштовують на ґрунтовій основі, — тобто дорожнього одягу, що також унеможливує застосування термінів, застандартизованих у [2]: згідно з [2] *road pavement* є англomовним відповідником терміна «дорожній покрив» (див. вище).

Таким чином під час виконання зазначених робіт з національної стандартизації було виявлено невідповідність розглянутих застандартизованих термінів технічному змісту вихідних положень регіональних (EN) та міжнародних (ASTM) НД і було впроваджено інші технічно відповідні та коректні рішення.

Поряд з цим потрібно визнати, що наведені у спеціалізованих словниках варіанти перекладу терміна *pavement*, які перейшли в систему стандартів за часів Радянського Союзу і залишаються прийнятними, можуть у багатьох випадках ускладнювати відтворення технічного змісту під час виконання перекладу іноземних першоджерел.⁵ Ураховуючи визначення терміна *pavement* для цивільного будівництва як твердої (міцної) шаруватої конструкції для влаштування проїзної частини доріг, злітно-посадкових смуг аеродромів, відкритих автомобільних стоянок та інших об'єктів, де влаштовано таку конструкцію (Матеріали *ACEA (Association des Constructeurs Europeens des Automobiles)*, фр. — Асоціація європейських виробників автомобілів, [3]), найбільш технічно коректним та універсальним варіантом інтерпретації англomовного терміна *pavement* на думку автора є «настил» — пропонується інтерпретація не буде потребувати додаткових пояснень, вибору між «покривом» та «одягом», а також забезпечить застосування одного українomовного відповідника для одного англomовного терміна і дозволить урахувати певні особливості схем проєктування, прийнятих у країнах ЄС.

Висновки

За результатами аналізу термінів, застандартизованих на національному рівні як відповідники англomовного терміна *pavement*, і похідних словосполучень для опису конструкцій, елементів конструкцій у цивільному будівництві (будування доріг, будування аеропортів), та відповідних терміно статей було виявлено суттєві обмеження на можливість практичного застосування таких термінів для створення ідентичного технічного змісту першоджерел під час виконання перекладів.

За результатами робіт з гармонізації національних стандартів з міжнародними стандартами системи ASTM, а також європейськими нормативними документами відповідно до сфер стандартизації в рамках груп та підгруп класу «Цивільне будівництво» (коди ICS 93.080.10, 93.080.20, 93.120) було визначено, що інтерпретацію терміна *pavement* та похідних словосполучень потрібно виконувати суто на підставі технічного змісту об'єкта аналізування. Рішення, що забезпечують відтворення технічного змісту іноземних першоджерел (НД), переважно знаходяться за рамками застандартизованих на національному рівні термінів.

Результати виконаної роботи вказують на доцільність відмови від усталеного на національному рівні мультिवаріантного підходу до перекладу широко застосовуваного у сфері робіт зі стандартизації в галузі цивільного будівництва англomовного терміна *pavement* та пошуку рішення, яке забезпечить універсальну інтерпретацію, можливо — з урахуванням рішення, запропонованого в цій статті.

⁵ Спеціалізовані словники, як правило, пропонують переклад терміна *pavement* як «дорожній одяг; дорожній покрив».

Список літератури

1. ДСТУ ISO 6707-1:2024 (ISO 6707-1:2020, IDT) Будівництво будівель та цивільне будівництво. Словник термінів. Частина 1. Загальні терміни. Київ, 2024. 101 с. (Інформація та документація).
2. ДСТУ 9214:2023 Автомобільні дороги. Терміни та визначення понять. Київ, 2023. 51 с. (Інформація та документація).
3. Žnidarič, A. Heavy-Duty Vehicle Weight Restrictions in the EU: Enforcement and Compliance Technologies. 23th ACEA. Scientific Advisory Group Report, 2015. 28 p. URL: https://www.acea.auto/files/SAG_23_Heavy-Duty_Vehicle_Weight_Restrictions_in_the_EU.pdf (дата звернення 01.03.2021; перевірено в липні 2025).

References

1. DSTU ISO 6707-1:2024 (ISO 6707-1:2020, IDT) Budivnytstvo budivel ta tsyvilne budivnytstvo. Slovyk terminiv. Chastyna 1. Zahalni termyny (National Ukrainian Standard DSTU ISO 6707-1:2024 (ISO 6707-1:2020, IDT) Buildings and civil engineering works — Vocabulary — Part 1 : General terms). Kyiv, 2024. 101 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
2. DSTU 9214:2023 Avtomobilni dorohy. Termyny ta vyznachennia poniat (National Ukrainian Standard DSTU 9214:2023 Motor roads. Terms and definitions). Kyiv, 2023. 51 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. Žnidarič, A. Heavy-Duty Vehicle Weight Restrictions in the EU: Enforcement and Compliance Technologies. 23th ACEA. Scientific Advisory Group Report, 2015. 28 p. URL: https://www.acea.auto/files/SAG_23_Heavy-Duty_Vehicle_Weight_Restrictions_in_the_EU.pdf (Accessed 01.03.2021; checked in July, 2025) [inEnglish].

Tereshchenko T. A., Ph.D., Senior Research Officer, <https://orcid.org/0000-0001-7584-9031>
State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

INTERPRETATION OF THE ENGLISH-LANGUAGE TERM «PAVEMENT» AND DERIVED COMPLEX TERMS

Annotation

Introduction. The introduction to the paper briefly outlines the issue of creating identical technical matter in the process of harmonizing national standards of Ukraine with regulatory documents of other systems in certain areas of standardization.

Problem statement. The topic of the paper concerns the interpretation of English-language terms used to describe structures and structural elements for the design and construction of roads and airports.

Purpose. The purpose of the paper is to analyze the applicability of individual standardized terms for creating identical technical matter when translating standards of other standardization systems.

Results. The standardized solutions regarding the translation and interpretation of the English-language term pavement and derived complex terms, key in the areas of civil engineering and road construction, are analyzed, and the need to clarify the Ukrainian equivalents is shown.

Based on the results of works on national standardization, solutions are presented that were used to ensure the identity of technical matter for describing structures (structural elements) of road and airfield pavement. Alternative solutions for interpreting the key term are also proposed.

Conclusions. A conclusion is provided regarding the limited possibilities, when translating primary sources, of practical application of the terminological equivalents of the English-language term pavement which are standardized at the national level.

It is determined that in order to reproduce the technical matter of primary sources, the interpretation of the English-language term pavement and derived complex terms shall be performed purely on the basis of the technical matter of the object of analysis.

The advisability of finding a solution that will provide a universal interpretation of the English-language term pavement, which is widely used in standardization in the field of civil engineering, is outlined.

Keywords: road, airfield, airport, construction, pavement, terminology.

УДК 528.94:625.7(477.87)

Касіянчук Д. В., канд. геол. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4761-5320>Штогрин Л. В., канд. геол. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-8381-1236>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

**ОБРОБКА ГЕОВИМІРІВ У ЗАДАЧАХ ПЛАНУВАННЯ
ТА КОНТРОЛЮ БУДІВНИЦТВА, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДОРІГ
У ЗСУВНИХ РАЙОНАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС****Анотація**

Вступ. Розвиток транспортної інфраструктури у гірських регіонах України стикається з проблемою активних зсувних процесів, які суттєво впливають на стабільність дорожніх мереж.

Проблематика. Значна частина доріг у Карпатах проходить територіями з підвищеною геологічною небезпекою. При будівництві доріг порушується природна стійкість схилів (підрізка чи насипи), змінюється дренаж, може накопичуватись волога. При цьому просторовий аналіз взаємного розташування зсувів і дорожньої мережі виконується недостатньо, що ускладнює оцінку ризиків.

Мета. Дослідження просторового положення зсувів відносно доріг із використанням ГІС-методів, виділення груп зсувів за вертикальним положенням та оцінка їхнього впливу на дорожню інфраструктуру.

Матеріали й методи. Використано дані цифрової моделі рельєфу (DEM), векторні шари зсувів та автомобільних доріг для території Верховинського та Косівського районів Івано-Франківської області. Для визначення напрямку і характеру небезпеки зсувів виконано просторовий аналіз виконано в середовищі QGIS із розрахунком мінімальної відстані до дороги та різниці абсолютних висот між зсувним тілом і проїзною частиною автомобільної дороги.

Результати. Усього проаналізовано 467 зсувів. Виділено три групи: зсуви нижче дороги (202 випадки), середня відстань до дороги 206,8 м; зсуви на рівні дороги (29 випадків), середня відстань 20,1 м; зсуви вище дороги (236 випадків), середня відстань 169,5 м, середня різниця висот 34,1 м. Найбільш небезпечними є зсуви вище дороги, оскільки вони здатні блокувати транспортні шляхи. Зсуви нижче дороги можуть викликати ерозію схилів і підмиви, що зменшує стійкість схилів, а зсуви на рівні дороги відображають деформації на старих зсувних тілах, що може проявлятися у вигляді тріщин чи просідання дорожнього одягу.

Висновки. GIS-аналіз зсувів виявив три групи за відносною висотою: найнебезпечніші розташовані вище дороги (50,5 %), нижче дороги формують ерозійні ризики, а на рівні дороги свідчать про нестабільні схили. Для управління інфраструктурою рекомендовано системний моніторинг у ГІС.

Ключові слова: автомобільна дорога, ГІС, зсуви, геовимір, просторові дані.

Вступ

Будівництво та експлуатація автомобільних доріг у гірських регіонах України є стратегічним завданням державної транспортної політики, адже саме вони забезпечують доступність віддалених територій, розвиток туризму та мобільність населення. Водночас складні інженерно-геологічні умови Карпат створюють значні ризики для транспортної інфраструктури. Одним із найпоширеніших та найнебезпечніших процесів є зсуви, які призводять до руйнування ділянок автомобільних доріг, порушення транспортних зв'язків і значних економічних збитків [1].

За останні десятиліття у світі спостерігається тенденція до зростання частоти та інтенсивності зсувних процесів, що пов'язано як із природними чинниками, так і з антропогенними навантаженнями. Дослідження показують, що у гірських районах саме дороги найчастіше стають об'єктами впливу зсувів, оскільки їх будівництво передбачає втручання в геологічне середовище — зрізку схилів,

формування насипів, зміну природного водного режиму. Це робить транспортну інфраструктуру вразливою до активізації схилових процесів [2].

Методи просторового аналізу та геоінформаційні системи (ГІС) відкрили нові можливості для вивчення взаємозв'язків між зсувами та дорожньою мережею. У публікації [3] наголошують, що ймовірнісні моделі, побудовані на основі цифрових моделей рельєфу (DEM), геологічних і гідрологічних карт, дозволяють прогнозувати небезпечні ділянки та розробляти карти зсувної небезпеки. Про важливість комплексного підходу зазначено у [4], де поєднуються просторові дані, статистичні методи та результати польових досліджень.

В умовах кліматичних змін проблема загострюється. Збільшення кількості сильних опадів та інтенсивність ерозійних процесів призводять до активізації зсувів у всьому світі. Водночас зростає транспортне навантаження потребує розвитку дорожньої інфраструктури, що часто супроводжується її розташуванням на схилах із підвищеною геологічною небезпекою. Це створює конфлікт між необхідністю розвитку транспорту та потребою збереження стабільності схилів [5].

Українські Карпати є одним із найбільш зсувонебезпечних регіонів Європи. За даними [6], ключовими факторами розвитку зсувних процесів тут є геологічна будова, зволоженість гірських відкладів, значні перепади висот і фрагментація рельєфу. Попередні дослідження [7] засвідчили ефективність використання ГІС у межах Косівського району, де було виявлено закономірності розподілу зсувів і визначено найбільш небезпечні ділянки доріг.

Попри наявність багатьох досліджень, більшість робіт зосереджується на картуванні зсувонебезпечних територій загалом. Менш вивченою є проблема аналізу вертикального положення зсувів відносно дорожньої мережі. Саме цей аспект має ключове значення для оцінки рівня ризику: зсуви, що формуються вище дороги, можуть призвести до миттєвого перекриття транспортних шляхів, тоді як зсуви нижче дороги сприяють довготривалій ерозійній дестабілізації схилів.

Отже, актуальність дослідження полягає у необхідності застосування ГІС-методів для аналізу просторового та висотного положення зсувів відносно автомобільних доріг. Це дозволить підвищити ефективність моніторингу та знизити ризики для транспортної інфраструктури Карпатського регіону.

Метою роботи є застосування геоінформаційного аналізу для вивчення просторових взаємозв'язків між зсувами та дорогами у Карпатах, зокрема із врахуванням їхнього вертикального положення.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети було використано комплекс геопросторових даних та сучасні інструменти геоінформаційного аналізу.

Вихідні дані

Цифрова модель рельєфу (DEM). У дослідженні застосовано дані SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільністю 30 м, які забезпечують достатній рівень деталізації для аналізу орографії гірської місцевості. DEM дозволяє визначати абсолютні висоти об'єктів, нахили та експозицію схилів, що є ключовим для вивчення зсувних процесів.

Полігони зсувів. Використано офіційні геокадастрові дані, доповнені матеріалами регіонального моніторингу Івано-Франківської області. Полігони описують межі зсувних тіл та дозволяють визначати їх площу, контури і центроїд. Загалом проаналізовано 467 зсувів різної площі та генезису.

Дорожня мережа. Використано векторний шар автомобільних доріг, отриманий з відкритих картографічних ресурсів та уточнений за допомогою даних Державного земельного кадастру. Це дозволило забезпечити високу точність просторового співставлення зсувів і транспортної інфраструктури.

Інструментарій

Аналіз здійснено у середовищі *QGIS 3.28*, яке є відкритим програмним продуктом (GNU GPL 2). *QGIS* дозволяє виконувати багатокрокові геоінформаційні операції, інтегрувати растрові та векторні дані та застосовувати інструменти просторової статистики.

Основні модулі та інструменти, що застосовувалися:

Sample raster values — визначення висотних значень за DEM у заданих точках;

Distance to nearest hub — розрахунок мінімальної відстані від центроїда зсуву до найближчої дороги;

Field calculator — виконання обчислень і класифікацій за заданими критеріями.

Методика аналізу

Для кожного зсуву визначалося:

Мінімальна відстань (D) від центроїда зсуву до найближчої дороги.

Абсолютна висота дороги (H_d) у точці, найближчій до зсуву (визначено за DEM).

Абсолютна висота зсувного тіла (H_z) у точці центроїда зсуву.

Різниця висот (ΔH):

$$\Delta H = H_z - H_d . \quad (1)$$

На основі значення ΔH усі зсуви класифіковано на три групи:

$\Delta H < 0$ — зсув нижче дороги;

$\Delta H = 0$ — зсув на рівні дороги;

$\Delta H > 0$ — зсув вище дороги.

Схема аналізу

Умовно весь алгоритм можна подати у вигляді блок-схеми (рис. 1):

Визначення центроїда полігону зсуву.

Обчислення найкоротшої відстані до дороги.

Вибір точки перетину з DEM для дороги та зсуву.

Визначення абсолютних висот H_d та H_z .

Розрахунок ΔH та класифікація зсуву за трьома групами.

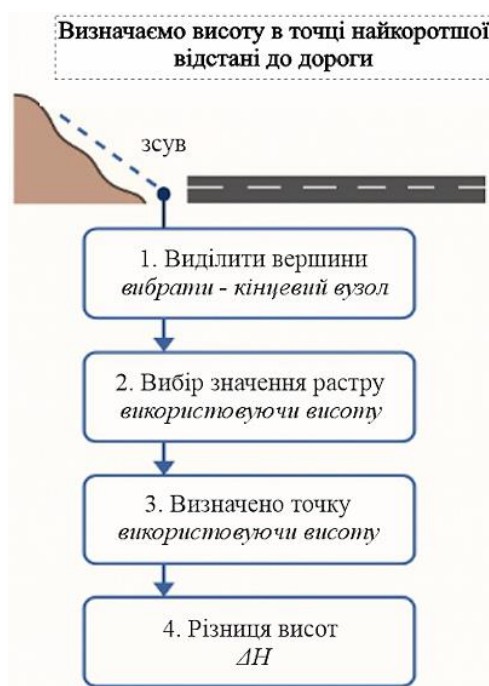


Рисунок 1 — Схема аналізу просторового розташування зсувів відносно доріг [8]

Таким чином, обрана методика дозволяє врахувати не лише відстань між зсувом та дорогою, але й вертикальне положення, що суттєво підвищує точність оцінки ризиків для дорожньої інфраструктури у гірських умовах.

Результати

Аналіз просторових даних дозволив оцінити взаємне розташування 467 зсувів та автомобільних доріг у межах Верховинського й Косівського районів Івано-Франківської області. Основна увага приділялася різниці абсолютних висот між зсувним тілом і автомобільною дорогою (ΔH).

Класифікація за групами

За значенням ΔH виділено три групи зсувів (табл. 1):

1. Група $\Delta H < 0$ — зсуви нижче дороги.

Усього — 202 випадки (43,2 %). Для цієї групи характерна найбільша варіабельність відстаней до дороги — від 2,4 м до 1 524,4 м. Середня відстань становить 206,8 м. Середня висота дороги в цій групі — 741,5 м, тоді як середня висота зсувного тіла — 705,5 м. Максимальна різниця у висоті сягає — 296 м, що вказує на значне положення зсувів унизу схилів.

2. Група $\Delta H = 0$ — зсуви на рівні дороги.

Найменш чисельна категорія — 29 випадків (6,3 %). Середня відстань до дороги — лише 20,1 м, що зумовлено безпосереднім розташуванням транспортних шляхів на схилових тілах або старих зсувних формаціях. Середні висотні значення для дороги та зсувів збігаються (647,1 м).

3. Група $\Delta H > 0$ — зсуви вище дороги.

Найбільша група — 236 випадків (50,5 %). Середня відстань до дороги — 169,5 м, середня різниця у висоті становить 34,1 м. Середня висота дороги у цій групі — 655,1 м, а зсувних тіл — 689,2 м. Ця категорія є найбільш небезпечною, оскільки активізація таких зсувів може призвести до повного перекриття дорожнього руху [8].

Таблиця 1

Середні параметри просторового положення зсувів відносно доріг

Група зсувів	Кількість випадків	Середня відстань до дороги, м	Середня висота дороги, м	Середня висота зсуву, м	Середнє ΔH , м	ΔH min, м	ΔH max, м
$\Delta H < 0$ (нижче дороги)	202 (43,2 %)	206,8	741,5	705,5	–36,0	–296	–1
$\Delta H = 0$ (на рівні)	29 (6,3 %)	20,1	647,1	647,1	0,0	0	0
$\Delta H > 0$ (вище дороги)	236 (50,5 %)	169,5	655,1	689,2	+34,1	+1	+218

Просторовий розподіл

На карті (рис. 2) показано територіальний розподіл зсувів відносно дорожньої мережі. Найбільша концентрація зсувів, розташованих вище дороги, спостерігається у межах гірських долин річок Чорний Черемош та Пістинька, де дороги проходять вздовж стрімких схилів. Зсуви нижче дороги переважають на ділянках із терасовим рельєфом.

Статистичний аналіз

Графік розподілу ΔH (рис. 3) демонструє асиметричність даних із чітким переважанням позитивних значень. Це свідчить про домінування зсувів, які потенційно загрожують транспортним шляхам зверху. Для групи $\Delta H < 0$ спостерігається значний розкид значень, що вказує на складність рельєфу та варіативність процесів.

Результати дослідження свідчать, що найбільшу небезпеку для дорожньої інфраструктури становлять зсуви, розташовані вище автомобільної дороги. Водночас наявність значної частки зсувів нижче доріг підтверджує потребу у постійному моніторингу ерозійних процесів та їхнього впливу на стабільність схилів.

Обговорення

Результати проведеного дослідження свідчать, що більшість зсувів у межах Верховинського та Косівського районів Івано-Франківської області розташовані вище автомобільної дороги (група $\Delta H > 0$). Це підтверджує висновки європейських дослідників щодо найбільшої небезпеки саме від зсувів, які формуються над транспортною інфраструктурою. У [4] наголошують, що вертикальне положення зсувів є критичним параметром під час оцінки ризиків для доріг, оскільки саме такі процеси мають найбільшу ймовірність перекриття транспортних шляхів. Аналогічні результати отримані і для гірських регіонів Азії та Південної Америки, де дорожня інфраструктура зазнає постійних загроз через активні схиліви процеси.

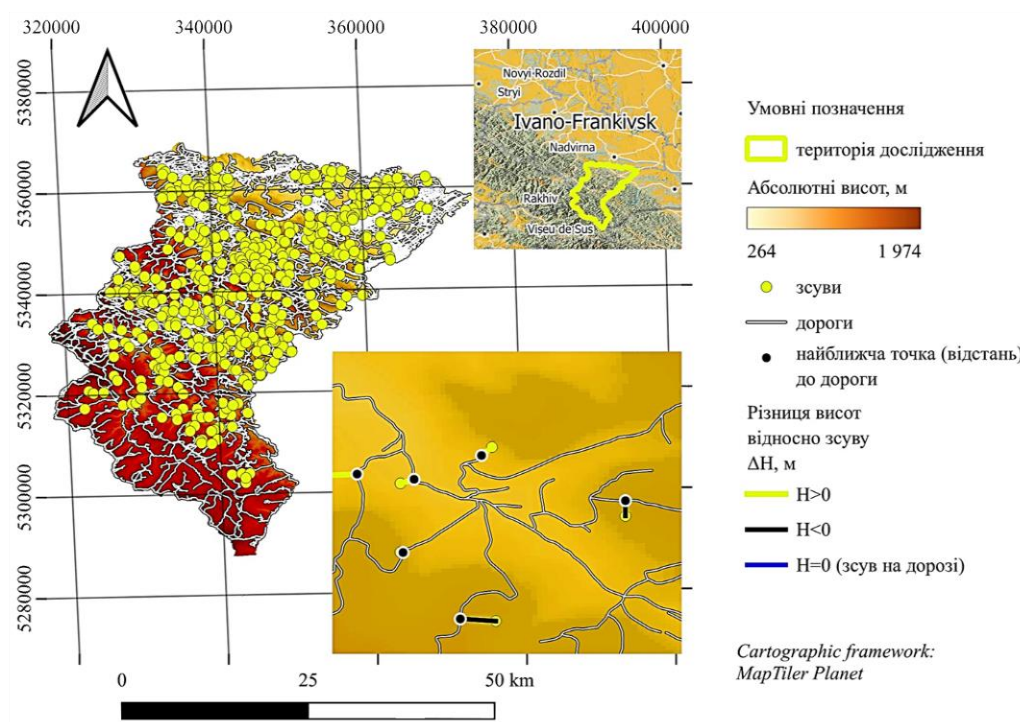


Рисунок 2 — Карта просторового розташування зсувів відносно доріг [8]

Порівняння з дослідженнями в інших гірських системах світу (Альпи, Кавказ, Гімалаї) демонструє подібність просторових закономірностей. У більшості регіонів дороги прокладаються вздовж річкових долин, де вони піддаються впливу зсувів із крутих схилів [5]. Проте Карпати мають певні відмінності: нижчі відносні висоти та значна зволоженість глинистих порід зумовлюють більш часті, але відносно менш масштабні зсувні події. У той час як в Альпах та Гімалаях характерними є катастрофічні обвали великого обсягу, у Карпатах домінують численні локальні зсуви середньої потужності, які часто повторюються на тих самих ділянках.

Методика, запропонована у цьому дослідженні, довела свою ефективність для класифікації зсувів за висотним положенням відносно доріг. Використання показника ΔH у поєднанні з відстанню до проїзної частини дозволяє швидко виокремлювати найбільш ризикові ділянки для моніторингу. Це

особливо важливо у контексті розбудови транспортної інфраструктури, коли необхідно визначати пріоритети для інженерних заходів та розробки проєктів стабілізації схилів. Такий підхід може бути інтегрований у системи управління дорожньою мережею як інструмент попереднього скринінгу небезпечних територій.

Разом з тим, результати дослідження мають певні обмеження. По-перше, точність оцінки значною мірою залежить від просторової роздільності цифрової моделі рельєфу. У даному випадку використано DEM із роздільністю 30 м, що є достатнім для регіональних оцінок, однак для локального проєктування чи прогнозування інженерної стабільності доцільно застосовувати дані високої роздільності (LiDAR, фотограмметрія з БПЛА). По-друге, проведений аналіз має статичний характер і не враховує сезонної динаміки зсувів. Активізація процесів у Карпатах тісно пов'язана з інтенсивними дощами та весняним сніготаненням, що потребує часових рядів даних дистанційного зондування для більш повної картини.

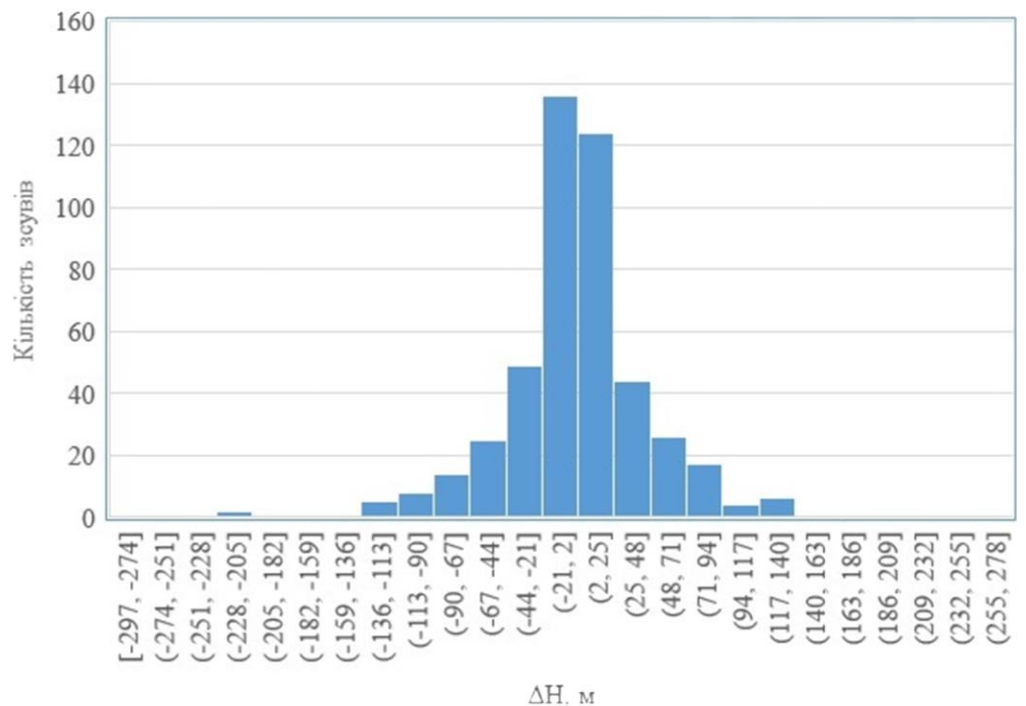


Рисунок 3 — Розподіл зсувів за різницею висот (ΔH)

По-третє, картографічна інформація щодо зсувів базується на архівних і кадастрових даних, які можуть не відображати найсвіжіші зміни. Тому результати просторового аналізу потребують обов'язкової польової верифікації.

Отже, отримані висновки є важливим кроком у напрямі інтеграції геоінформаційних технологій у практику планування дорожньої інфраструктури. Запропонований підхід не замінює класичних інженерно-геологічних досліджень, але дозволяє значно зменшити часові та фінансові витрати на початковому етапі оцінки ризиків. Його застосування в комплексі з польовими обстеженнями та сучасними методами дистанційного зондування створює перспективи для побудови інтегрованої системи моніторингу зсувонебезпечних ділянок у Карпатах.

Висновки

➤ GIS-аналіз просторового розташування зсувів дозволив виокремити три групи залежно від відносної висоти.

- Найбільш небезпечними є зсуви вище автомобільної дороги ($\Delta H > 0$), які становлять 50,5 % усіх випадків.
- Зсуви нижче дороги формують ризики ерозійних процесів та змивів.
- Зсуви на рівні дороги вказують на будівництво на нестабільних схилах.
- Запропоновано впроваджувати системний моніторинг у ГІС для управління дорожньою інфраструктурою.

Список літератури

1. Korup O. Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides*. 2005. Vol. 2(1). P. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0042-0>.
2. Pardeshi S. D., Autade S. E., Pardeshi S. S. Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*. 2013. Vol. 2(1). P. 523.
3. Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*. 2005. Vol. 72(1–4). P. 272–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>.
4. Van Westen C. J., Castellanos E., Kuriakose S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment. *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102(3–4). P. 112–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>.
5. Lacasse, S., Nadim, F. Landslide Risk Assessment and Mitigation Strategy. In: Sassa, K., Canuti, P. (eds) *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_3.
6. Ivanik O., Shevchuk V., Kravchenko D., Yanchenko V., Shpyrko S., Gadiatska K. Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. Vol. 20(4). P. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/102964>.
7. Kasiyanchuk D., Shtohryn L. Assessment of landslide hazard risks on the example of the land cadastre of the Kosiv district. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2023. No. 98. P. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.050>.
8. Kasiyanchuk D., Shtohryn L. GIS technologies in planning and controlling road construction and maintenance in areas with active landslide processes *International Conference «Synergy in Terra – 2025»* (2-13 June 2025, Lviv, Ukraine). [Synergy in Terra – 2025-019] URL: https://drive.google.com/file/d/1De3ILimXfrDjJfJvB5IL0W_cLVbqkVB/view.

References

1. Korup, O. (2005). Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides*, 2(1), 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0042-0> [in English].
2. Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 523 [in English].
3. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002> [in English].
4. Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010> [in English].
5. Lacasse, S., Nadim, F. (2009). Landslide Risk Assessment and Mitigation Strategy. In: Sassa, K., Canuti, P. (eds) *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_3 [in English].
6. Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., & Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177–186. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/102964> [in English].

7. Kasiyanchuk, D., & Shtohryn, L. (2023). Assessment of landslide hazard risks on the example of the land cadastre of the Kosiv district. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 98, 36–42. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.050> [in English].

8. Kasiyanchuk D., Shtohryn L. GIS technologies in planning and controlling road construction and maintenance in areas with active landslide processes *International Conference «Synergy in Terra – 2025»* (2-13 June 2025, Lviv, Ukraine). [Synergy in Terra – 2025-019] URL: https://drive.google.com/file/d/1De3ILimXfrDjJlFJvB5IL0W_cLVbqkVB/view [in English].

Dmytro Kasiianchuk, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4761-5320>

Liudmyla Shtohryn, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-8381-1236>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

PROCESSING OF GEOMEASUREMENT IN THE TASKS OF PLANNING AND CONTROL OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF ROADS IN LANDSCAPE AREAS USING GIS

Abstract

Introduction. The development of transport infrastructure in Ukraine's mountainous regions faces the problem of active landslide processes, which have a significant impact on the stability of road networks.

Problem statement. A significant proportion of roads in the Carpathians pass through areas of increased geological risk. Construction work on roads can disrupt the natural stability of slopes (through cutting or embankments), alter drainage systems and cause moisture to accumulate. At the same time, there is insufficient spatial analysis of the relative location of landslides and the road network, which complicates risk assessment.

Objective. The aim is to study the spatial location of landslides in relation to roads using GIS methods, to categorise landslides by their vertical position and to evaluate their impact on road infrastructure.

Materials and methods. Digital elevation model (DEM) data and vector layers of landslides and motorways were used for the Verkhovyna and Kosiv districts of the Ivano-Frankivsk region. A spatial analysis was performed in QGIS to determine the direction and nature of landslide hazards, calculating the minimum distance to the road and the difference in absolute heights between the landslide body and the road surface.

Results. A total of 467 landslides were analysed. Three groups were identified: Landslides below the road (202 cases): average distance to the road: 206.8 m. Landslides at road level (29 cases): average distance: 20.1 m. Landslides above the road (236 cases): average distance: 169.5 m; average height difference: 34.1 m. The most dangerous landslides are those above the road, as they can block transport routes. Landslides below the road can cause slope erosion and undercutting, reducing slope stability. Landslides at road level reflect deformations on old landslide bodies and can manifest as cracks or subsidence of the road surface.

Conclusions. A GIS analysis of landslides identified three groups based on their relative height. The most dangerous landslides are located above the road (50.5 %), while those below the road pose erosion risks and those at road level indicate unstable slopes. Systematic GIS monitoring is recommended for infrastructure management.

Keywords: road, landslides, GIS, geodetic data, spatial data.

УДК 624.21

Безуглий А. О., канд. екон. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-3883-7968>Каськів В. І., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>Завгородній С. С., <https://orcid.org/0000-0003-1928-4544>*Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна*

ПОТОЧНІ ВИКЛИКИ В УПРАВЛІННІ МОСТОВИМ ГОСПОДАРСТВОМ УКРАЇНИ

Анотація

Вступ. У статті розглянуто актуальні проблеми управління мостовим господарством України в умовах старіння інфраструктури та зростання транспортних навантажень. Питання оцінювання технічного стану мостів набуває особливого значення в контексті безпеки руху, економічної стабільності та обороноздатності держави.

Проблематика. Значна кількість мостів України експлуатуються понад шістдесят років, що зумовлює втрату їхньої проектної вантажопідйомності та накопичення конструктивних дефектів. Відсутність системної державної програми модернізації ускладнює ефективне планування ремонтів і реконструкцій. Подібні виклики раніше постали перед розвиненими країнами світу, які реалізували масштабні інфраструктурні програми відновлення мостів.

Мета. Метою дослідження є аналіз міжнародного досвіду управління мостовим господарством, зокрема прикладів США та Німеччини, і формування рекомендацій щодо розроблення національної стратегії оновлення мостів в Україні.

Матеріали й методи. У роботі використано статистичні дані про стан мостів на дорогах державного значення України, результати обстежень і випробувань, інформацію з офіційних звітів Федерального управління автомобільних доріг США, Міністерства транспорту Німеччини, а також аналітичні джерела та наукові публікації, присвячені питанням оцінювання технічного стану транспортних споруд.

Результати. На основі аналізу міжнародних практик визначено ключові елементи ефективної стратегії управління мостами, зокрема системне проведення технічних обстежень, формування пріоритетності робіт за технічним станом і транспортною значущістю, а також стабільне фінансування з урахуванням довгострокового планування. Показано, що підходи США та Німеччини відрізняються за масштабом і темпами реалізації, але мають спільну основу — достовірність даних і послідовність управлінських рішень.

Висновки. Поточна ситуація мостового господарства України вимагає переходу до системного підходу управління, заснованого на результатах обстежень і науково обґрунтованій пріоритезації. Впровадження програми, аналогічної до американської та німецької моделей, дозволить забезпечити підвищення безпеки руху, ефективне використання ресурсів та поступове оновлення мостів у післявоєнний період.

Ключові слова: автомобільна дорога, вантажопідйомність, відновлення, випробування, міст, пріоритезація, стратегія розвитку, обстеження, технічний стан, управління інфраструктурою.

Вступ

Проблема старіння транспортної інфраструктури набула глобального характеру і сьогодні є одним із ключових викликів для розвинених країн. Значна частина мостів і автомобільних доріг була збудована ще у першій половині XX століття тобто у 1950–1970-х роках, що зумовлює перевищення їхнього проектного строку служби. У результаті багато споруд мають вік понад 70 років, що ставить на порядок денний питання їхнього підсилення або повної заміни. Забезпечення надійності та безпеки мостів у сучасних умовах пов'язане не лише з урахуванням зростаючих транспортних навантажень, але й із запобіганням соціально-економічним наслідкам можливих обмежень руху чи аварійних ситуацій.

У випадку України ця проблема набуває ще й додаткового виміру, адже стан мостового господарства безпосередньо впливає не лише на економічний розвиток та мобільність населення, але й на обороноздатність держави, особливо в умовах воєнних дій. Саме тому питання оцінювання технічного стану мостів і формування стратегічного підходу до їх експлуатації, ремонту і заміни є надзвичайно актуальним та потребує системного розгляду.

Основна частина

Мостове господарство України є ключовою складовою транспортної інфраструктури, що забезпечує безперервність транспортних потоків та інтеграцію регіонів у єдину логістичну систему. Станом на жовтень 2025 року на підконтрольних територіях експлуатується близько **24,7 тис. мостів**, розташованих на автомобільних дорогах загального користування, у межах населених пунктів та на залізничних магістралях. Розподіл за видами доріг виглядає таким чином: на дорогах загального користування державного значення — **5 389 мостів** [1], на місцевих дорогах — **9 433 мости**, на вулицях і дорогах населених пунктів — **3 700 мостів**, а на балансі АТ «Укрзалізниця» перебуває ще **6 190 мостів**. На мережі автомобільних доріг державного значення найбільше мостів зосереджено на **територіальних дорогах** — **2 239 споруд**, тоді як на міжнародних їх налічується **1 149**, на національних — **901**, а на регіональних — **1 100** (рис. 1).

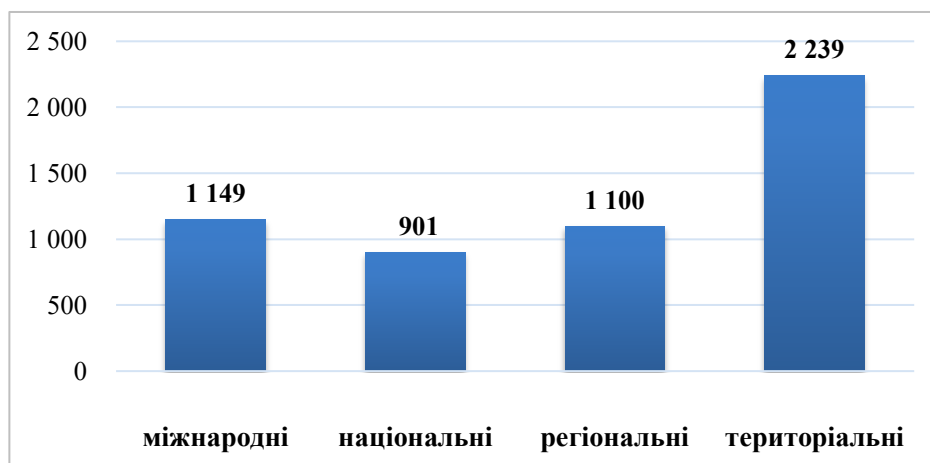


Рисунок 1 — Кількість мостів на мережі автомобільних доріг державного значення на підконтрольній території України

Одним із ключових параметрів, що безпосередньо визначає технічний стан мостів на державних дорогах України, є їхній вік, який у значній частині споруд уже перевищує проектні строки служби. Як свідчать статистичні дані, понад **80 % мостів було збудовано до 1980 року**, тобто більше ніж 45 років тому (рис. 2), що об'єктивно засвідчує масове старіння мостового фонду та зростання експлуатаційних ризиків. Це призводить до прогресуючого зношення конструктивних елементів, зниження їхньої надійності та зростання потреби у проведенні капітальних ремонтів і реконструкцій. Додатковим чинником є недостатній рівень експлуатаційного утримання, адже опираючись на результати обстежень мостів за останні 10 років можна констатувати, що у радянський період і перші десятиліття незалежності України належні заходи з підтримання працездатності виконувалися несистемно, що стало причиною розвитку дефектів і прискореної деградації споруд. Як показує практика сучасних обстежень, нерідко виявляються мости віком понад 40 років, на яких десятиліттями не проводилася заміна гідроізоляції та покритву проїзної частини, а деформаційні шви втратили свої експлуатаційні властивості багато років тому. З огляду на це, особливої ваги набуває застосування сучасної нормативної бази, що регламентує порядок обстежень, випробувань та оцінювання технічного стану мостів [3–8]. Разом із тим, самих лише регламентованих процедур недостатньо, адже наявні проблеми значно ускладнюють подальшу експлуатацію споруд і потребують реалізації комплексних програм їхнього відновлення та модернізації.

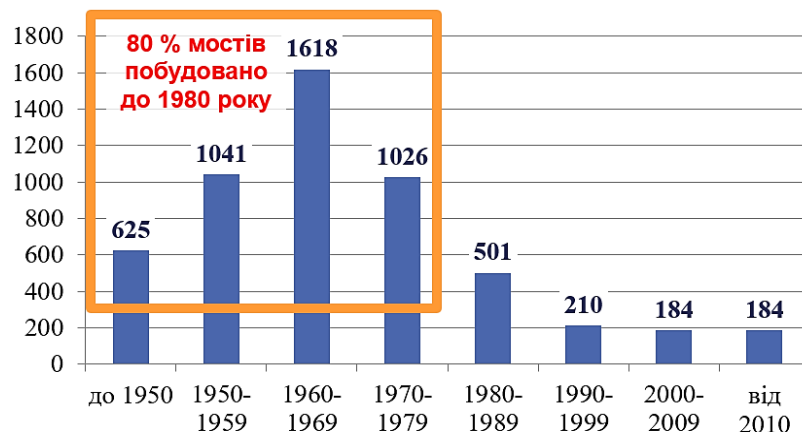


Рисунок 2 — Розподіл транспортних споруд на автомобільних дорогах загального користування державного значення на підконтрольних територіях України за роками будівництва

Похідним чинником від віку мостів є питання їхньої проектної вантажопідйомності, яка визначалась нормами, чинними на момент будівництва. Значна частина мостів на дорогах державного значення була споруджена за проектними навантаженнями, що сьогодні вже не відповідають вимогам сучасного транспортного руху та параметрам вантажного транспорту. У **табл. 1** наведено розподіл мостів за проектними навантаженнями, відповідно до положень Методичних рекомендацій з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів (МР В.2.3-37641918-921:2021) [2].

Таблиця 1

Розподіл мостів на автомобільних дорогах державного значення України за проектними навантаженнями

Проектне навантаження	Вантажопідйомність, т			Кількість мостів
	У колоні	Одиночне великовагове	На вісь	
Н-10, НГ-30	13 (15*)	30	9,5 (11*)	22
Н-10, НГ-60	15 (19*)	60	9,5 (11*)	376
Н-13, НГ-60	19 (25*)	60	12	933
Н-18, НК-80	30 (36*)	80	12	434
Н-30, НК-80	36	80	12	2 966
А11, НК-80	40	80	12	410
А15, НК-100	Більше 46	100	15	248
* – для залізобетонних мостів				

Фактично майже дві третини мостів на дорогах державного значення були запроектовані під навантаження класів Н-18 та Н-30, які вводилися понад 40 років. Ці параметри відповідали транспортним умовам свого часу, однак сьогодні вони не узгоджуються із сучасними вимогами руху. На сьогодні на дорогах загального користування державного значення передбачено перевезення вантажів із загальною масою (разом з масою транспортного засобу) — не більше ніж 40 т, навантаження на одиночну вісь — 11 т (для автобусів, тролейбусів — 11,5 т), здвоєні осі — 16 т, строєні — 22 т (для контейнеровозів навантаження на одиночну вісь — 11 т, здвоєні осі — 18 т, строєні — 24 т). Осі потрібно вважати здвоєними або строєними, якщо відстань між ними (суміжними) не перевищує 2,5 м.

У цих умовах виникає необхідність перегляду підходів до оцінювання вантажопідйомності та визначення пріоритетних об'єктів для реконструкції чи заміни, оскільки саме мости з найнижчими проєктними навантаженнями формують обмежувальні ділянки транспортної системи та створюють найбільші ризики для безпеки руху. Варто підкреслити, що проблема невідповідності проєктних параметрів мостів сучасним транспортним навантаженням не є унікальною для України. Подібні виклики постали й у країнах Європи та США [9–16], де більшість мостів була споруджена ще у першій половині XX століття або в період після Другої світової війни, коли відбувся активний розвиток дорожньо-транспортної інфраструктури. Значна кількість цих споруд сьогодні також перевищує проєктні строки служби і проєктувалася під навантаження, які не відповідають сучасним параметрам руху. У результаті країни з розвинутою економікою вимушені реалізовувати масштабні програми оцінювання фактичної вантажопідйомності, модернізації та поступової заміни старіючих мостів.

Виходячи з даних викликів постає об'єктивна потреба у формуванні спеціальної державної програми, спрямованої на поступову реконструкцію або заміну мостів на автомобільних дорогах державного значення, що не відповідають чинним вимогам щодо вантажопідйомності. Така програма має базуватися на системному підході до інвентаризації, діагностики та класифікації мостів за ступенем їхньої відповідності сучасним нормативним параметрам. Важливим завданням є визначення пріоритетності робіт з урахуванням технічного стану, транспортної значущості споруд та потенційних ризиків для безпеки руху. Водночас необхідно усвідомлювати, що можливості щодо реалізації подібної програми в умовах воєнного стану є дуже обмеженими, тому її практична імплементація має бути розгорнута у післявоєнний період. Також ключовим чинником у формуванні даної програми є оцінка наявних виробничих потужностей будівельної галузі та визначення їхнього поступового розширення з урахуванням потреб масштабної модернізації інфраструктури. Лише за умови стратегічного планування, поетапного фінансування та узгодження з державними пріоритетами відновлення буде можливість забезпечити ефективне оновлення мостового господарства відповідно до сучасних вимог транспортної системи. Реалізація такої програми матиме значний соціально-економічний ефект, що проявиться у підвищенні безпеки дорожнього руху, скороченні транспортних витрат, забезпеченні безперервності внутрішніх і міжнародних логістичних потоків, створенні додаткових робочих місць у будівельній галузі та суміжних секторах. Водночас модернізація мостового господарства сприятиме зміцненню обороноздатності країни та інтеграції транспортної системи України до європейської інфраструктурної мережі.

Досвід інших держав свідчить, що подібні виклики вирішуються виключно шляхом реалізації масштабних державних програм, орієнтованих на системне оновлення інфраструктури. Найбільш показовим прикладом є Сполучені Штати Америки, де стан мостового господарства тривалий час визначався фахівцями як критичний фактор для безпеки та економічної стабільності транспортної системи. На території США експлуатується понад 600 тисяч мостів, середній вік яких перевищує 45 років. Відповідно до даних Національної інвентаризації мостів (NBI) близько 7 % усіх споруд перебувають у аварійному технічному стані, а понад сорок відсотків оцінюються як такі, що знаходяться у посередньому стані [19, 20]. Виходячи із цього, більше ніж половини транспортних артерій вимагає постійного моніторингу та проведення ремонтних заходів для підтримання належної експлуатаційної придатності. Аналіз стану дорожньо-транспортної інфраструктури на рівні окремих штатів демонструє, що є значні відмінності у частці мостів і доріг у незадовільному стані, що наочно показано на **рис. 3**.

Визнанням цієї проблеми стало ухвалення у 2021 році Закону про інвестиції в інфраструктуру та робочі місця (Infrastructure Investment and Jobs Act, ІІА), що став найбільшою інвестиційною ініціативою федерального рівня за останні десятиліття [17, 18]. Загальний обсяг фінансування, передбачений для транспортної інфраструктури, перевищує 110 мільярдів доларів, з яких понад 27 мільярдів спрямовано безпосередньо на відновлення та заміну мостів. Показовим є те, що в даному розподілі коштів з загального розподілу фінансування відновлення мостів складає близько 25 %, тоді як в Україні під час реалізації програми «Велике будівництво» до початку повномасштабного вторгнення частка передбачених видатків на відновлення мостів складала близько 5 %.

Unit	% Roads in Poor Condition	% Bridges in Poor Condition
Rhode Island	24.6%	23.1%
Alaska	18.7%	9.7%
California	16.9%	7.0%
New Jersey	16.8%	8.1%
Hawaii	16.1%	6.9%
Massachusetts	15.4%	9.2%
New York	13.4%	10.0%
Iowa	7.5%	19.4%
Pennsylvania	7.1%	16.6%
West Virginia	4.8%	19.9%

Рисунок 3 — Частка доріг та мостів у незадовільному технічному стані в окремих штатах США, що визначає пріоритетність отримання фінансування за програмою ІІА [17]

Ключовим інструментом реалізації даної програми у США виступає програма Bridge Formula Program, яка розподіляє кошти між штатами на основі розмірів їхньої мережі, інтенсивності руху та рівня зносу споруд. Такий підхід дозволяє не лише враховувати масштаби проблеми в кожному регіоні, а й забезпечувати пропорційність і прозорість у фінансуванні. Оцінки Федерального управління автомобільних доріг свідчать, що потреби у фінансуванні значно перевищують рівні витрат попередніх років. Витрати у розмірі 17,2 млрд доларів США на рік, зафіксовані у 2016 році, дозволяли лише частково зменшувати обсяги відкладених робіт, тоді як для повної ліквідації заборгованості до 2036 року необхідно щороку інвестувати близько 28,1 млрд доларів США. На **рис. 4** наведено оцінку впливу різних рівнів щорічного фінансування на динаміку скорочення заборгованості з відновлення мостів [21].

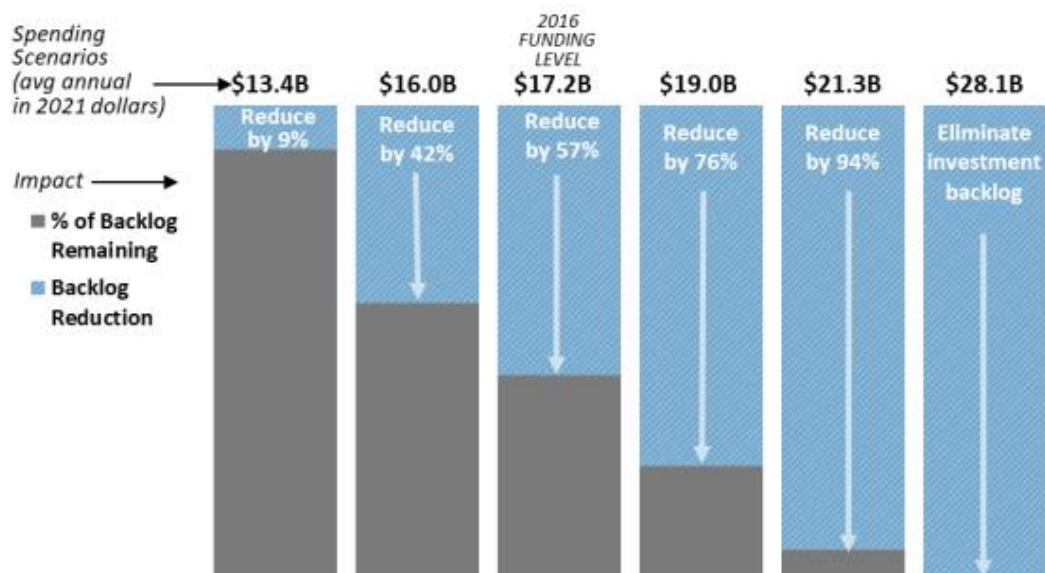


Рисунок 4 — Оцінка впливу різних рівнів щорічного фінансування на скорочення заборгованості з відновлення мостів у США протягом 2017 – 2036 рр. (у вартостях на 2021 рік) [21]

Основна увага у межах програми приділяється мостам, віднесеним до категорії «мости з конструктивними дефектами» (structurally deficient). Для таких споруд визначено першочергові заходи, що охоплюють комплексну реконструкцію або повну заміну прогонових будов та опор із урахуванням сучасних нормативних вимог до навантажень і безпеки руху. Водночас значна частина коштів

спрямовується і на модернізацію мостів, які офіційно ще не визнані аварійними, проте демонструють тенденції прискореної деградації елементів. Це дає змогу здійснювати не лише оперативне реагування на аварійний стан окремих споруд, а й виконувати превентивні заходи, що знижують ризики деградації транспортної мережі.

Структура ІІА передбачає багаторівневу систему реалізації, у якій поєднано федеральні ресурси та відповідальність штатів. Федеральний уряд формує базові фінансові інструменти та визначає вимоги до звітності, тоді як безпосереднє планування і реалізація робіт належать до компетенції місцевих департаментів транспорту. Такий підхід забезпечує баланс централізованого контролю та регіональної гнучкості, що дозволяє адаптувати програму до конкретних умов і потреб. Крім того, ІІА стимулює впровадження сучасних технологій проектування та моніторингу, включаючи використання цифрових моделей, систем довгострокового контролю та методів прискореного будівництва.

Очікуваним результатом реалізації програми є не лише усунення існуючих обмежувальних ділянок транспортної системи, але й створення основи для підвищення її надійності у довгостроковій перспективі. За оцінками Міністерства транспорту США, протягом п'ятирічного періоду реалізації планується відремонтувати або замінити значну кількість мостів, що істотно зменшить частку споруд у поганому стані та стабілізує рівень їхньої експлуатаційної придатності. Соціально-економічний ефект програми проявляється у підвищенні безпеки руху, зниженні витрат на транспортування та покращенні логістичної ефективності національної економіки. Додатковим ефектом є створення тисяч робочих місць у будівельній галузі та суміжних секторах, що безпосередньо впливає на розвиток регіонів.

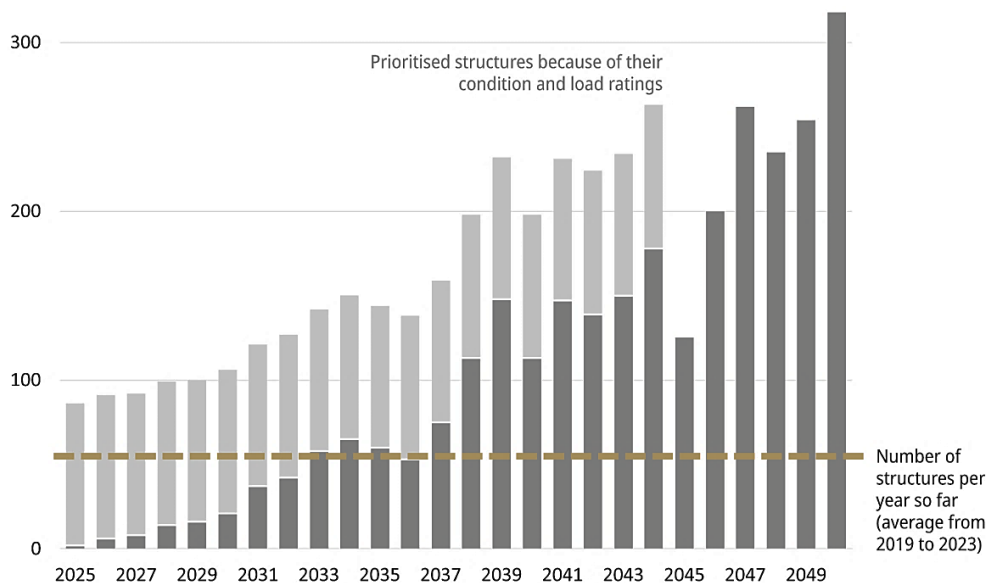
Перші результати впровадження програми вже демонструють позитивні зміни. У низці штатів розпочато системну заміну мостів, що перебували у критичному стані, зокрема на федеральних автомагістралях та важливих міжрегіональних маршрутах. В окремих випадках вдалося запобігти аварійним обмеженням руху, які могли б спричинити значні економічні збитки. Також відзначається підвищення рівня координації між федеральними та місцевими органами влади, що стало можливим завдяки чіткій системі звітності та моніторингу, закладеній у ІІА.

Приклад США свідчить про те, що стратегічно орієнтовані програми з чіткою структурою фінансування, визначеними пріоритетами та механізмами контролю можуть ефективно вирішувати проблему старіння мостового господарства. Важливим є те, що реалізація ІІА не обмежується лише ліквідацією існуючих дефектів, а формує основу для підвищення довговічності та стійкості інфраструктури до майбутніх викликів. Досвід Сполучених Штатів може бути корисним для України під час розроблення власної програми модернізації мостів, яка має враховувати національні особливості та реальні можливості будівельної галузі у післявоєнний період.

У той час як у Сполучених Штатах масштабна інвестиційна програма спрямована на вирішення проблеми старіння транспортної інфраструктури, подібні виклики постали й перед країнами Європейського Союзу. Однією з держав, що системно підійшла до розв'язання цього питання, є Федеративна Республіка Німеччина. На федеральній мережі автомобільних доріг експлуатується понад 39 тисяч мостових споруд, які забезпечують безперервність вантажних і пасажирських перевезень як у внутрішньому сполученні, так і в межах транс'європейських транспортних коридорів. Середній вік мостів сягає 40–50 років, оскільки їх масове будівництво припало на 1960–1970-ті роки в умовах динамічного розвитку економіки та зростання мобільності населення. Подібно до США, це створює суттєві ризики для безпеки руху, оскільки конструкції були запроєктовані під навантаження, що не відповідають сучасним транспортним параметрам, зокрема зростаючим обсягам вантажних перевезень і збільшеній масі транспортних засобів.

Визнанням масштабності цієї проблеми стало затвердження у 2020 році федеральної програми «Brückenmodernisierung 2020–2030», яка визначає стратегічні орієнтири для поступової модернізації та заміни мостів у Німеччині [22]. Її розроблення зумовлене результатами технічних обстежень, що виявили значний відсоток мостів у незадовільному стані, особливо на ключових автомагістралях. За оцінками Федерального міністерства транспорту близько 15 % мостових споруд федеральної мережі перебувають у такому стані, що вимагає невідкладних заходів з реконструкції або заміни [23]. За такого прогнозу, потреби у відновленні споруд суттєво перевищують середні обсяги ремонтів останніх років.

Як показано на **рис. 5**, у найближчі двадцять років щороку необхідно відновлювати щонайменше 85 часткових конструкцій, тоді як середній показник за 2019–2023 роки становив лише 53. До середини століття прогнозована потреба зростає до понад 300 конструкцій щороку, що об’єктивно вимагає системного та довгострокового підходу.



- кількість споруд, що підлягають відновленню через вік;
- споруди, які потребують пріоритетного втручання через стан та розрахункову вантажопідйомність;
- середня кількість відновлень, виконаних у 2019 – 2023 рр.

Рисунок 5 — Прогнозована потреба у щорічному відновленні мостів на федеральній мережі Німеччини порівняно з фактичними обсягами попередніх років [23]

Програма передбачає реалізацію комплексного підходу, який включає детальну інвентаризацію мостів, їх класифікацію за технічним станом та визначення пріоритетності відновлення з урахуванням транспортного значення. Основний акцент зроблено на так званих «ключових мостах» – спорудах, розташованих на міжнародних транспортних коридорах, автострадах категорії *Autobahn* та магістралях, що забезпечують стратегічне сполучення між федеральними землями. Враховуючи значне перевищення сучасними транспортними засобами проєктних навантажень, одним із пріоритетних напрямів є не лише капітальний ремонт, але й повна заміна старих мостів новими спорудами, які відповідають актуальним нормам та стандартам Європейського Союзу [24].

Структурно програма «Brückenmodernisierung» побудована як довгостроковий план із чітко визначеними етапами фінансування. Передбачено концентрацію ресурсів на модернізації близько 4 000 мостів до 2030 року, з яких частина підлягає реконструкції, а решта повній заміні. Федеральний уряд передбачає суттєве збільшення щорічних обсягів реконструкції: якщо у 2017–2020 роках виконувалося менше ніж 200 відновлень на рік, то з 2026 року планується стабільне досягнення показника у 400 реконструйованих споруд щорічно (**рис. 6**). Такий підхід дозволяє зосередити фінансування на найбільш уразливих об’єктах і поступово зменшувати відсоток споруд, що становлять підвищений ризик для безпеки руху. Важливим елементом є орієнтація на інноваційні технології будівництва та матеріали, включаючи застосування високоміцних бетонів, сталевих конструкцій з поліпшеними характеристиками корозійної стійкості та впровадження систем моніторингу технічного стану для контролю в режимі реального часу.

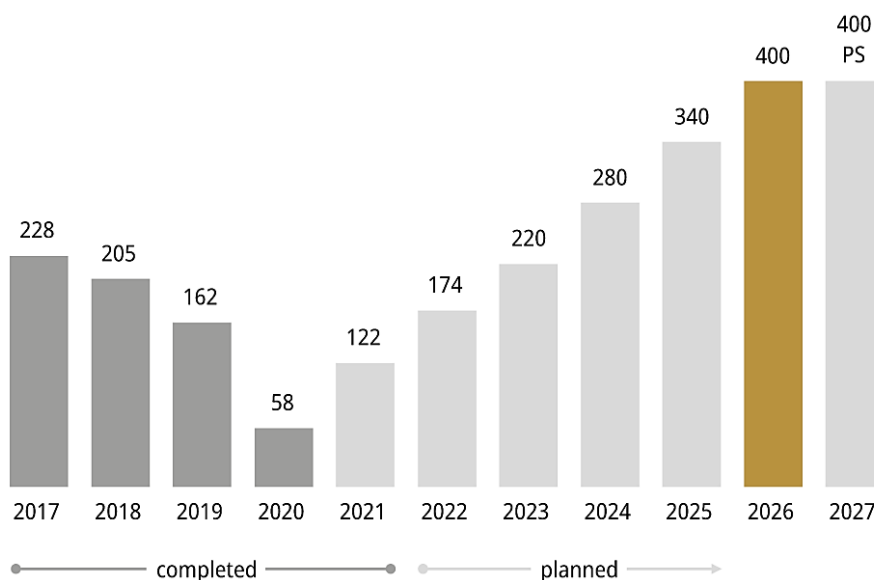


Рисунок 6 — Динаміка та заплановані обсяги щорічних реконструкцій мостів на мережі Autobahn у рамках програми «Brückenmodernisierung» (за даними Bundesrechnungshof, 2022) [23]

Окремої уваги заслуговує механізм фінансування, що передбачає залучення значних коштів федерального бюджету та тісну взаємодію з урядами федеральних земель. Пропорційний розподіл фінансування здійснюється на основі довжини мережі доріг у кожній землі, інтенсивності руху та стану мостів, що забезпечує об'єктивність та прозорість у використанні ресурсів. Порівняно з американською програмою ІІА, яка робить акцент на масштабності одночасних інвестицій, німецький підхід вирізняється поступовістю та акцентом на довготривалий та стабільний процес модернізації.

Особливістю німецької моделі є інтеграція програми «Brückenmodernisierung» до ширшої стратегії розвитку транспортної інфраструктури, що передбачає узгодження із завданнями екологічної політики та декарбонізації. Модернізація мостів розглядається не лише як технічний процес, а й як частина загальної стратегії сталого розвитку, яка забезпечує зниження викидів за рахунок оптимізації транспортних потоків, зменшення заторів та покращення логістики. Реалізація програми має не лише інженерно-технічний, але й значний соціально-економічний ефект, спрямований на підвищення конкурентоспроможності економіки Німеччини та її інтеграцію до європейської транспортної мережі TEN-T.

Досвід Німеччини демонструє, що довгострокові програми модернізації мостів можуть бути ефективними лише за умови їхньої інтеграції до загальної стратегії розвитку транспортної інфраструктури та забезпечення стабільного фінансування. На відміну від Сполучених Штатів, де ключовим чинником виступає масштабність і швидкість реалізації інвестиційних заходів, німецька модель базується на поступовості та системності. Поєднання цих двох підходів формує цінний міжнародний досвід, який може бути адаптований для українських умов. Україна, перебуваючи у складній фазі воєнного та за умови потенційного післявоєнного відновлення, матиме можливість використати напрацювання США та Німеччини як основу для формування власної стратегії оновлення мостового господарства, орієнтованої на поетапну реалізацію та ефективне використання ресурсів.

Формування стратегії оновлення мостового господарства в Україні має ґрунтуватися на чітко структурованих етапах, що узгоджуються з міжнародною практикою та враховують поточний стан галузі у нашій країні. В основу цієї стратегії необхідно закласти принцип технічної достовірності даних, які отримуються виключно на основі обстежень та випробувань споруд. Лише такий підхід здатний забезпечити об'єктивне визначення фактичного стану мостів, формування оптимальної пріоритезації та обґрунтування необхідності проведення капітального ремонту або заміни.

Першочерговим завданням є системне виконання технічних обстежень та, за потреби, випробувань мостів для отримання актуальної інформації про рівень їхньої працездатності та фактичну

вантажопідйомність. Результати мають узагальнюватися у програмному комплексі «Аналітична експертна система управління мостами» (ПК «АЕСУМ») [25], який слугує основою для прийняття управлінських рішень. Слід наголосити, що обсяг мостів на дорогах державного значення України робить цей процес тривалим, однак існує можливість його прискорення за рахунок використання вже наявних результатів актуальних обстежень, проведених на міжнародних та національних маршрутах. Це дозволяє певною мірою поєднувати перший і другий етапи стратегії, тобто розпочати роботу з формування пріоритетності об'єктів паралельно з проведенням нових обстежень на інших ділянках мережі. На підтвердження цього свідчать статистичні дані щодо мостів, які вже були обстежені та внесені до ПК «АЕСУМ» (табл. 2), що демонструє поступове накопичення інформаційної бази та створює передумови для подальшої систематизації управлінських рішень.

Таблиця 2

Розподіл мостів на автомобільних дорогах державного значення України за областями та стан обстеження

Область	Всього, шт.	Обстежено та внесено в ПК «АЕСУМ»
Вінницька область	215	215
Волинська область	178	178
Дніпропетровська область	373	373
Донецька область	42	42
Житомирська область	180	149
Закарпатська область	429	257
Запорізька область	53	47
Івано-Франківська область	456	401
Київська область	227	219
Кіровоградська область	171	103
Львівська область	528	305
Миколаївська область	100	96
Одеська область	387	181
Полтавська область	157	139
Рівненська область	305	155
Сумська область	210	210
Тернопільська область	254	173
Харківська область	243	243
Херсонська область	16	16
Хмельницька область	228	216
Черкаська область	181	180
Чернівецька область	202	165
Чернігівська область	254	251
Всього:	5 389	4 314

Другим фундаментальним етапом має стати побудова системи пріоритезації, яка дозволить визначити послідовність проведення капітальних ремонтів та реконструкцій. Така система повинна інтегрувати два основних блоки критеріїв. Перший блок становить технічний стан мостів, що відображає рівень їхньої надійності, наявність пошкоджень та ступінь зносу. Другий блок — це транспортна значущість споруди, що визначається інтенсивністю руху, категорією дороги, функціональною роллю мосту в регіональній і національній мережі, а також важливістю його для

міжнародних логістичних маршрутів. Співвідношення між цими двома групами критеріїв має бути чітко врегульоване, оскільки саме воно визначатиме баланс між безпекою руху та економічною доцільністю.

Використання такого підходу підтверджено прикладами Сполучених Штатів Америки і Німеччини та має позитивні результати за реалізованими обсягами. У США реалізація програми федерального рівня дозволила сформувати масштабну систему оцінювання мостів, яка забезпечує пріоритизацію робіт із урахуванням як технічного стану, так і транспортної ролі споруди. У Німеччині подібна логіка була закладена у план модернізації мостів, де пріоритетність визначається не лише за рівнем зношення, а й за значенням об'єкта у структурі національної транспортної мережі. Для України адаптація таких підходів означатиме можливість оптимізувати обмежені фінансові та виробничі ресурси, концентруючи їх на тих мостах, які формують критичні вузли транспортної системи та створюють найбільші ризики для безпеки руху.

Окремої уваги потребує питання синхронізації пріоритетизації з реальними можливостями будівельної галузі. Масштабна програма реконструкції та заміни мостів вимагатиме поступового розширення виробничих потужностей та кадрового потенціалу, тому стратегія має включати заходи з підготовки спеціалізованих підрядних організацій, підвищення кваліфікації інженерних кадрів та впровадження сучасних технологій. Формування системи пріоритетизації не можна розглядати ізольовано – вона повинна стати складовою комплексного підходу до модернізації всієї галузі.

Реалізація описаної стратегії дозволить сформувати в Україні раціональну модель управління мостовим господарством, що базується на результатах обстежень та випробувань і забезпечує науково обґрунтоване визначення пріоритетності заходів. Поєднання цих етапів створить умови для ефективного використання ресурсів, зниження аварійних ризиків та поступового приведення мостів на дорогах державного значення у відповідність до сучасних вимог транспортної системи.

Висновок

Поточний стан мостового господарства України потребує реалізації системних заходів із технічного обстеження, оцінювання вантажопідйомності та модернізації споруд. Значна частина мостів експлуатується понад п'ятдесят років, що супроводжується накопиченням конструктивних дефектів, зниженням надійності й невідповідністю проєктних параметрів сучасним навантаженням. Така ситуація створює ризики для безпеки руху, обмежує пропускну спроможність і гальмує економічний розвиток. Подібні проблеми раніше постали перед багатьма розвиненими країнами, які вирішували їх шляхом комплексного оновлення мостового фонду.

Досвід Сполучених Штатів та Німеччини демонструє ефективність поєднання масштабного інвестування з чіткою системою пріоритетизації. Американська модель передбачає одночасну реалізацію великої кількості проєктів із залученням федеральних і регіональних ресурсів, тоді як німецький підхід базується на довгостроковому плануванні та стабільному фінансуванні. В обох країнах ключовими є достовірні дані технічних обстежень, стандартизовані методики оцінювання й тісна координація між рівнями управління. Це дозволяє забезпечити прозорість рішень, поступове оновлення мостів та підвищення стійкості транспортних систем.

Для України вкрай важливо вже сьогодні розпочати підготовку до впровадження аналогічної програми. Її основою мають стати достовірні результати технічних обстежень і випробувань, централізоване управління даними в межах програмного комплексу управління мостами, розроблення прозорої системи пріоритетності та визначення сталих джерел фінансування. Реалізація такої стратегії забезпечить підвищення безпеки руху, раціональне використання ресурсів і створить умови для відновлення мостового господарства у післявоєнний період.

Список літератури

1. Каськів В. І., Панібратець Л. Г., Степанов С. М., Грінів В. С., Чайковська Л. І. Стан мостового господарства України на дорогах загального користування державного значення на підконтрольних

територіях за 2023 рік. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. С. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.280>.

2. МР В.2.3-37641918-921:2021 Методичні рекомендації з визначення вантажопідйомності автодорожніх мостів. Київ, 2021. 48 с. (Інформація та документація).

3. ДБН В.2.3-6:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Обстеження і випробування. Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).

4. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2009. 40 с. (Інформація та документація).

5. ДСТУ 9181:2022. Настанова з оцінювання та прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ, 2022. 32 с. (Інформація та документація).

6. ДСТУ 8748:2017. Настанова щодо проведення динамічних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2018. 22 с. (Інформація та документація).

7. ДСТУ 9123:2021 Настанова з обстеження та випробування мостів і труб. Київ, 2022. 43 с. (Інформація та документація).

8. ДСТУ 9280:2024 Настанова щодо проведення статичних випробувань автодорожніх мостів. Київ, 2024. 23 с. (Інформація та документація).

9. Matos J. C., Nicoletti V., Casas J. R., Adey B. T. Comparison of condition rating systems for bridges in three European countries. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(22). Article 12343. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212343> (дата звернення: 02.10.2025).

10. Lamei A., Hasan M. M., Shaaban S., El-Badawy S., Mostafa T. Development of performance-based deterioration models for bridge components. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2025. Vol. 10. Article 25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02025-7> (дата звернення: 02.10.2025).

11. de Vries R., Li Y., Casas J. R. Proof load testing method by the American Association of State Highway Officials (AASHTO). *Transportation Research Record*. 2023. Vol. 2677(5). P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231165026> (дата звернення: 02.10.2025).

12. de Vries R., Yang S., Liu H., Casas J. R. Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2023. Vol. 19(11). P. 1451–1465. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2280712> (дата звернення: 02.10.2025).

13. Gocál J., Odrobiňák J. On the influence of corrosion on the load-carrying capacity of old riveted bridges. *Materials*. 2020. Vol. 13(3). P. 717. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13030717> (дата звернення: 02.10.2025).

14. Dvořák L., Králík J., Vican J. Determination of road bridge load-carrying capacity. *Civil and Environmental Engineering*. 2021. Vol. 17(1). P. 368–377. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0030> (дата звернення: 02.10.2025).

15. Faber M. H., Sørensen J. D., Bucher C. Proof load testing for bridge assessment and upgrading. *Engineering Structures*. 2000. Vol. 22(10). P. 1421–1430. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00111-X) (дата звернення: 02.10.2025).

16. Cai Y., Yang W., Liu H., Yang S., Li Y. Comprehensive durability assessment of in-service concrete bridges. *SN Applied Sciences*. 2024. Vol. 6(5). Article 250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06250-0> (дата звернення: 02.10.2025).

17. Infrastructure Investment and Jobs Act: Roads and Bridges. Council of State Governments, 2021. URL: https://web.csg.org/recovery/wp-content/uploads/sites/24/2021/11/Analysis-for-States-Roads-and-Bridges_web.pdf (дата звернення: 02.10.2025).

18. Public Law 117-58. Infrastructure Investment and Jobs Act. 117th Congress of the United States of America. Washington, D. C., 2021. URL: <https://www.congress.gov/117/plaws/publ58/PLAW-117publ58.pdf> (дата звернення: 02.10.2025).

19. Bureau of Transportation Statistics. Condition of U.S. Highway Bridges. U.S. Department of Transportation, 2024. URL: <https://www.bts.gov/content/condition-us-highway-bridges> (дата звернення: 02.10.2025).

20. American Society of Civil Engineers. Structurally Deficient Bridges — 2021 Infrastructure Report Card. Washington, D.C., 2021. URL: <https://2021.infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges-infrastructure> (дата звернення: 02.10.2025).
21. Highways Bridges: Conditions, Funding Programs, and Issues. Congressional Research Service Report R47194. Washington, D. C., 2022. URL: <https://www.congress.gov/crs-product/R47194> (дата звернення: 02.10.2025).
22. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Brückenmodernisierung. Berlin, 2020. URL: <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/brueckenmodernisierung.html> (дата звернення: 02.10.2025).
23. Bundesrechnungshof. Langsame Sanierung maroder Bundesfernstraßenbrücken. Bonn, 2021. URL: <https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/EN/Berichte/brueckenmodernisierung-volltext.pdf> (дата звернення: 02.10.2025).
24. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Brückenmodernisierungs programm 2020 – 2030. Berlin, 2020.
25. URL: <https://www.bmv.de/SharedDocs/Downloads/DE/brueckenmodernisierung-programm-2020-2030.pdf> (дата звернення: 02.10.2025).
26. Безуглий А. О., Касків В. І., Панібратець Л. Г., Степанов С. М., Грінів В. С., Чайковська Л. І. Визначення пріоритетності обстеження та першочерговості ремонтів транспортних споруд за допомогою програмного комплексу «Аналітична експертна система управління мостами». *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 31. С. 171–179. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.171>.

References

1. Volodymyr Kaskiv, Liudmyla Panibratets, Serhii Stepanov, Vladyslava Hriniv, Leonida Chaikovska. State of bridge facilities of ukraine on public roads of national importance in the controlled territories in 2023. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2024. Issue 29. P. 280–292 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.280> [in Ukrainian].
2. MR V.2.3-37641918-921:2021 Metodichni rekomendatsii z vyznachennia vantazhopididomnosti avtodorozhnykh mostiv [Methodical Recommendations (MR V.2.3-37641918-921:2021) Guidelines for determining the load-carrying capacity of highway bridges]. Kyiv, 2021. 48 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
3. DBN V.2.3-6:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia i vyprobuвання [State Building Norms (DBN V.2.3-6:2009) Transport facilities. Bridges and pipes. Inspection and testing]. Kyiv, 2009. 73 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
4. DBN V.2.3-22:2009 Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia [State Building Code of Ukraine (DBN V.2.3-22:2009) Transport facilities. Bridges and culverts. Basic design requirements]. Kyiv, 2009. 40 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
5. DSTU 9181:2022 Sporudy transportu. Nastanova z otsiniuvannia i prohnozuvannia tekhnichnoho stanu avtodorozhnykh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 9181:2022) Transport buildings. Instructions for assessing and forecasting the technical condition of road bridges]. Kyiv. 2022. 121 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
6. DSTU 8748:2017 Nastanova shchodo provedennia dynamichnykh vyprobuvan avtodorozhnykh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 8748:2017) Guidelines for dynamic testing of road bridges]. Kyiv, 2018. 22 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. DSTU 9123:2021 Nastanova z obstezhennia ta vyprobuвання mostiv i trub [State Standard of Ukraine (DSTU 9123:2021) Guidelines for the inspection and testing of bridges and pipes]. Kyiv, 2022. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
8. DSTU 9280:2024 Nastanova shchodo provedennia statychnykh vyprobuvan avtodorozhnykh mostiv [State Standard of Ukraine (DSTU 9280:2024) Guidelines for the static testing of highway bridges]. Kyiv, 2024. 23 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

9. Matos, J.C., Nicoletti, V., Casas, J. R., & Adey, B. T. (2023). Comparison of condition rating systems for bridges in three European countries. *Applied Sciences*, 13(22), 12343. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212343> [in English].
10. Lamei, A., Hasan, M.M., Shaaban, S., El-Badawy, S., & Mostafa, T. (2025). Development of performance-based deterioration models for bridge components. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10, 25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-025-02025-7> [in English].
11. de Vries, R., Li, Y., & Casas, J. R. (2023). Proof load testing method by the American Association of State Highway Officials (AASHTO). *Transportation Research Record*, 2677(5), 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231165026> [in English].
12. de Vries, R., Yang, S., Liu, H., & Casas, J. R. (2023). Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 19(11), 1451–1465. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2280712> [in English].
13. Gocál, J., Odrobiňák, J. (2020). On the influence of corrosion on the load-carrying capacity of old riveted bridges. *Materials*, 13(3), 717. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13030717> [in English].
14. Dvořák, L., Králík, J., Vican, J. (2021). Determination of road bridge load-carrying capacity. *Civil and Environmental Engineering*, 17(1), 368–377. DOI: <https://doi.org/10.2478/cee-2021-0030> [in English].
15. Faber, M.H., Sørensen, J.D., Bucher, C. (2000). Proof load testing for bridge assessment and upgrading. *Engineering Structures*, 22(10), 1421–1430. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00111-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00111-X) [in English].
16. Cai, Y., Yang, W., Liu, H., Yang, S., Li, Y. (2024). Comprehensive durability assessment of in-service concrete bridges. *SN Applied Sciences*, 6(5), 250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06250-0> [in English].
17. Council of State Governments. (2021). *Infrastructure Investment and Jobs Act: Roads and Bridges*. Retrieved from URL: https://web.csg.org/recovery/wp-content/uploads/sites/24/2021/11/Analysis-for-States-Roads-and-Bridges_web.pdf (Accessed: 02.10.2025) [in English].
18. Public Law 117-58. (2021). *Infrastructure Investment and Jobs Act*. 117th Congress of the United States. Washington, D.C. Retrieved from URL: <https://www.congress.gov/117/plaws/publ58/PLAW-117publ58.pdf> (Accessed: 02.10.2025) [in English].
19. Bureau of Transportation Statistics. (2024). *Condition of U.S. Highway Bridges*. U.S. Department of Transportation. Retrieved from URL: <https://www.bts.gov/content/condition-us-highway-bridges> (Accessed: 02.10.2025) [in English].
20. American Society of Civil Engineers. (2021). *Structurally Deficient Bridges — 2021 Infrastructure Report Card*. Washington, D.C. Retrieved from URL: <https://2021.infrastructurereportcard.org/cat-item/bridges-infrastructure> (Accessed: 02.10.2025) [in English].
21. Congressional Research Service. (2022). *Highway Bridges: Conditions, Funding Programs, and Issues (Report R47194)*. Washington, D.C. Retrieved from. URL: <https://www.congress.gov/crs-product/R47194> (Accessed: 02.10.2025) [in English].
22. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2020). *Brückenmodernisierung*. Berlin. URL: <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/brueckenmodernisierung.html> (Last accessed: 02.10.2025) [in German].
23. Bundesrechnungshof. (2021). *Langsame Sanierung maroder Bundesfernstraßenbrücken* (Slow refurbishment of dilapidated federal trunk road bridges). Bonn. URL: <https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/EN/Berichte/brueckenmodernisierung-volltext.pdf> (Last accessed: 02.10.2025) [in German] [in English].
24. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2020). *Brückenmodernisierungsprogramm 2020–2030* (Bridge Modernisation Programme 2020–2030). Berlin. URL: <https://www.bmv.de/SharedDocs/Downloads/DE/brueckenmodernisierung-programm-2020-2030.pdf> (Last accessed: 02.10.2025) [in German].
25. Artem Bezugliy, Volodymyr Kaskiv, Liudmyla Panibratets, Sergii Stepanov, Vladyslava Hriniv, Leonida Chaikovska. Determination of priority inspection and repair urgency of transport structures using the

software complex «Analytical expert system for bridge management». *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2025. Issue 31. P. 171–179 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.171> [in Ukrainian].

Artem Bezugliy, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-3883-7968>

Volodymyr Kaskiv, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8074-6798>

Serhii Zavgorodnyi, <https://orcid.org/0000-0003-1928-4544>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

CURRENT CHALLENGES IN THE MANAGEMENT OF UKRAINE'S BRIDGE INFRASTRUCTURE

Abstract

Introduction. The article examines the current challenges of bridge management in Ukraine under the conditions of infrastructure aging and increasing traffic loads. The assessment of the technical condition of bridges is becoming especially important in the context of road safety, economic stability, and national defense.

Problem Statement. Most bridges in Ukraine have been in service for more than fifty years, which has led to a decrease in their designed load capacity and the accumulation of structural defects. The lack of a systematic national modernization program complicates the effective planning of repairs and reconstructions. Similar challenges have previously arisen in developed countries that implemented large-scale infrastructure programs for bridge rehabilitation.

Purpose. The purpose of this study is to analyze international experience in bridge management, particularly the examples of the United States and Germany, and to develop recommendations for creating a national strategy for bridge renewal in Ukraine.

Materials and Methods. The study uses statistical data on the condition of bridges on national highways of Ukraine, the results of inspections and testing, information from official reports of the U.S. Federal Highway Administration and the German Ministry of Transport, as well as analytical sources and scientific publications devoted to the assessment of transport structures.

Results. Based on the analysis of international practices, the key elements of an effective bridge management strategy have been identified, including systematic technical inspections, prioritization of works according to technical condition and transport importance, and stable funding based on long-term planning. It has been shown that the approaches of the United States and Germany differ in scale and implementation pace but share a common foundation — reliability of data and consistency in management decisions.

Conclusion. The current state of Ukraine's bridge infrastructure requires the introduction of a systematic management approach based on inspection results and scientifically grounded prioritization. The implementation of a program similar to the American and German models will help improve traffic safety, ensure efficient use of resources, and support the gradual renewal of bridges in the post-war period.

Keywords: road, bridge, load capacity, restoration, testing, prioritization, development strategy, inspection, technical condition, infrastructure management.

УДК 628.1

Vladyslav Havryshchuk, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-3164-4426>Bohdan Sossa, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>*State University of Trade and Economics (SUTE), Kyiv, Ukraine*

**MAIN FACTORS IN THE FORMATION OF SURFACE RUNOFF FROM
THE DECK OF ARTIFICIAL STRUCTURES*****Abstract***

Introduction. Effective management of surface runoff from urbanized areas is a key task in modern construction, directly impacting the safety, functionality, and longevity of structures. Traditional solutions and calculations that permit the flooding of a catchment area up to the height of a curbstone are unacceptable for use on bridges. Incorrect calculation of drainage parameters can lead to aquaplaning, saturation of structural elements, and their subsequent destruction, which necessitates the improvement of existing methodologies. The primary method used in Ukraine for calculating stormwater runoff from a catchment basin is the limiting intensities method, described in [4]. Globally, Manning's formula [1-3, 11] is widely used and applied.

A separate, yet critically important, and often-ignored aspect is the relationship between theoretically justified minimum slopes and the accuracy of their practical implementation. When designing and constructing bridge structures, the determination and provision of minimum longitudinal slopes required for effective drainage depend directly on the accuracy of measuring equipment (levels, total stations) and the qualifications of the workers. Small slopes can turn out to be less than the permissible measurement error, making their practical realization impossible and leading to the formation of stagnant zones. Thus, the analysis of the influence of slopes must be integrated with an assessment of the practical feasibility of the specified parameters.

Additionally, the probability of errors in theoretical calculations must be considered, and a significant challenge is the correct practical implementation of design solutions. In this context, the construction camber, which is a pre-calculated imitation of reverse curvature, is a mandatory design element for span structures to compensate for their deflection under permanent and temporary loads. Inaccuracies in the determination or implementation of these elevations directly affect the actual longitudinal and transverse slopes on the road surface. Even minor deviations in the construction camber elevations can nullify the design slopes needed for effective drainage, leading to the formation of local areas of water stagnation and impaired drainage functionality.

This study simulates the formation of surface runoff using Manning's formula [1-3, 11] and the limiting intensities method [4]. During the simulation of surface runoff movement, the main task was to determine the maximum depth of the surface runoff layer, followed by identifying the key factors influencing its magnitude. The simulation of surface runoff formation was performed considering variable longitudinal and transverse pavement slopes, the geometric parameters of the catchment area, the distance between water intake elements, and their width.

Problem Statement. One of the prerequisites for the effective functioning of a bridge's drainage system and the protection of its structures is the rate at which surface runoff is received by water intake elements. The primary indicator that determines the speed of runoff movement is the surface slope. Errors and inaccuracies can lead to a decrease in slope and a reduction in the effectiveness of the drainage system.

Objective. To simulate the process of surface runoff formation using the Manning and limiting intensities methods. To determine the volume of runoff that forms from a local catchment area in front of a drainage element. To determine the minimum permissible longitudinal slopes for bridges, taking into account the need to ensure the functionality of the drainage system.

Materials and Methods. This study employs a comprehensive approach based on the analysis of scientific and technical developments in the field of surface drainage and stormwater sewerage design, as well as practical experience in their installation. The methodological basis of the work is an analysis of current building codes and a comparison with relevant foreign regulatory documents and technical literature. To ensure the comprehensiveness of the study, domestic and international experience gained during the design, installation, and operation of drainage systems has been taken into account. Mathematical modeling methods were used to determine the optimal key factors that govern the magnitude of surface runoff formation and the minimum permissible longitudinal slopes of the bridge deck that ensure the effective functioning of the drainage system.

Results. The key factors influencing the formation of surface runoff have been identified. The magnitude of the longitudinal slope that ensures the effectiveness of the drainage system has been substantiated.

Conclusions. The research demonstrates that to ensure effective drainage and prevent the destruction of bridge structures, it is necessary to consider not only theoretical calculations but also the practical implementation of design solutions. Achieving a minimum permissible longitudinal slope of no less than 0.2 % is a key condition for ensuring the reliable functioning of the drainage system.

Keywords: bridge, surface runoff, longitudinal and transverse slope, runoff volume, water intake element.

Introduction

The design of road transport infrastructure, particularly bridges, aims to solve technical, economic, and environmental challenges. Design solutions for ensuring the reliable operation of structures are based not only on quality and strength but also on protection from the effects of the natural environment [5-7]. The existing requirements for bridge drainage design negatively impact the provision of inter-repair periods [8]. The requirement to place the drainage axis at a distance of 200-500 mm from the curbstone is a regulatory deficiency that creates significant technological difficulties. This distance is too small for effective compaction of the asphalt concrete pavement, which is critically important for its durability. The use of the necessary compaction equipment is impossible, and the use of manual tools does not guarantee the required compaction coefficient. As a result, this area remains uncompacted, making it vulnerable to deformation under load, water penetration into the roadbed, and rapid deterioration. The conditions for installing a drainage axis set back from the curbstone are also complicated by a reverse slope, which leads to an increased concentration of moisture directly along the axis of the vehicle's wheel track.

The spacing between drainage inlets is not an arbitrary value but an important design parameter determined during the design phase. It depends on a number of factors, including:

- Rainfall intensity: Higher intensity requires closer spacing.
- Hydraulic characteristics: The design of the drainage system must account for water flow rates.
- Bridge geometric parameters: The length and width of the carriageway, as well as the magnitude of the longitudinal and transverse slopes, influence the speed and volume of runoff, which in turn determines the required spacing.
- Permissible runoff depth: The design must ensure that the depth of the water layer does not exceed permissible limits, which prevent aquaplaning and ensure traffic safety.

Analysis of Recent Research and Publications. The study of bridge drainage issues dates back to 1982. Marsalek was one of the first to present hydraulic performance curves and new design procedures, emphasizing the need to account for susceptibility to clogging. In 2005, Mohamed M. Mekawy, D. White, M. Suleiman, and S. Sreekanthan proposed constructing a drainage layer from porous backfill. Amin Akhnouk and Rudolf Seracino argued for the installation of a closed drainage network on bridges. In general, research into drainage issues has been ongoing for less than 50 years [1-3, 5-7, 9-11].

Objective. The aim of this work is to analyze the feasibility of designing surface drainage systems as part of a complex of treatment facilities on public roads. It seeks to determine the impact on cost minimization when calculating the road right-of-way and to analyze existing methods for treating surface runoff.

Materials and Methods

The paper presents modelling of surface runoff formation, which is an example of hydraulic analysis of surface runoff on sloped surfaces. It is based on the empirical and theoretical principles of hydraulics, in particular the Manning formula, which describes turbulent flow in thin layers of water. Such models are used in engineering practice to assess the risk of aquaplaning, excessive wetting of pavements and design drainage systems, ensuring that the maximum runoff depth does not exceed critical values (2-5 mm for traffic safety). The modelling takes into account the surface geometry and climatic parameters (using Kyiv as an example).

The modelling is carried out iteratively, with a set of combinations of parameters, in order to calculate the maximum runoff depth ($y_{\max}$) at the end point of the catchment, per catchment end point. The process is based on a kinematic wave for surface runoff, where the Manning formula is applied to estimate depth as a function of discharge, roughness and slope. Calculation algorithm [12]:

$$T_{ti} = \frac{K_u}{I^{0.4}} \left(\frac{nL}{\sqrt{S}} \right)^{0.6}, \quad (1)$$

where T_{ti} — duration of surface runoff concentration,
 n = roughness coefficient (see Table 3-2) [12],
 L = length of the drain, m,
 I = rainfall intensity, $\frac{mm}{hr}$,
 S = surface slope, $\frac{m}{m}$,
 K_u = empirical coefficient equal to 6.9.

$$V = K_c k S_p^{0.5}, \quad (2)$$

where V — average velocity (m/s),
 K_c = 1.0,
 V = velocity, m/s (ft/s),
 k = cross-sectional coefficient (Table 3-3),
 S_p = slope, %.

$$V = (K_c/n) R^{2/3} S^{1/2}, \quad (3)$$

where n = roughness coefficient (see Table 3-2) [12],
 R = hydraulic radius (defined as the flow area divided by the wetted perimeter), m.

Collection and determination of input parameters

Longitudinal slope (S_{long} , in %) is the slope in the direction of the main water flow, along the length of the runoff (L). Values range from 0.0 % to 4.0 %, reflecting flat (horizontal) to steep surfaces.

Transverse slope (S_{cross} , in %) is the slope perpendicular to the longitudinal slope, typical for roadways on straight and curved sections (2.5 – 5.0 %). It affects the direction of flow, but in this model, as can be seen from the data, it does not directly change $y_{\max}$, indicating a simplification.

Catchment width (B , in m) is the size of the plane from which runoff accumulates (4.5 – 17.5 m), equivalent to the width of a road or lane. It determines the area of the basin.

Runoff length (L , in m) – the distance in the direction of flow (4.0 – 12.0 m), which represents the path of runoff accumulation to the collection point (e.g., storm drain). This is a key parameter, as the flow rate is proportional to L .

Additional constants: Manning's roughness coefficient (n , typically 0.011 – 0.016 for asphalt), fall intensity (i , mm/hour, often 40 – 100 mm/hour for design rain), runoff coefficient ($\psi \approx 0.9$ for impervious surfaces). These values are not specified in the table, but are derived by reverse engineering (e.g., $i \approx 40$ mm/hour to match $y = 1.3$ mm at $S_{\text{long}} = 0.1$ %).

Rainwater runoff on a flat asphalt concrete road surface is modelled as surface runoff. This is a thin layer of water flowing under the action of gravity on an inclined surface. Manning's formula is used for calculations, since the surface is conditionally impermeable and runoff occurs quickly without significant seepage (Fig. 1), Table 1.

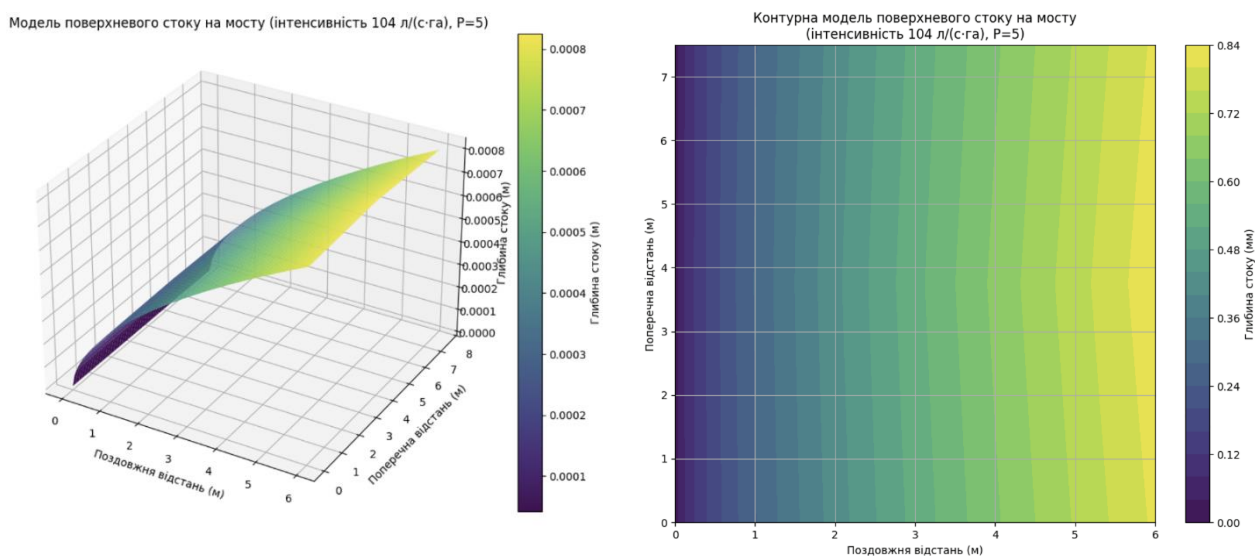


Figure 1 — Model of surface runoff from the bridge pavement at $q_{20} = 104 \text{ l}/(\text{sec} \cdot \text{ha})$ and $P = 5$ years

Table 1

Results of modelling the formation of runoff

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width of the catchment area (m)	Length (m)	Max. drain depth (mm)
0	2.5	4.5	6	3.30
0.1	2.5	4.5	6	1.65
0.2	2.5	4.5	6	1.34
0.3	2.5	4.5	6	1.19
0.4	2.5	4.5	6	1.09
0.5	2.5	4.5	6	1.02
0.6	2.5	4.5	6	0.97
0.7	2.5	4.5	6	0.92
0.8	2.5	4.5	6	0.89
0.9	2.5	4.5	6	0.85
1.0	2.5	4.5	6	0.83
1.1	2.5	4.5	6	0.80
1.2	2.5	4.5	6	0.78
1.3	2.5	4.5	6	0.77
1.4	2.5	4.5	6	0.75
1.5	2.5	4.5	6	0.73
1.6	2.5	4.5	6	0.72
1.7	2.5	4.5	6	0.71

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width of the catchment area (m)	Length (m)	Max. drain depth (mm)
1.8	2.5	4.5	6	0.69
1.9	2.5	4.5	6	0.68
2.0	2.5	4.5	6	0.67
2.1	2.5	4.5	6	0.66
2.2	2.5	4.5	6	0.65
2.3	2.5	4.5	6	0.64
2.4	2.5	4.5	6	0.64
2.5	2.5	4.5	6	0.63
2.6	2.5	4.5	6	0.62
2.7	2.5	4.5	6	0.61
2.8	2.5	4.5	6	0.61
2.9	2.5	4.5	6	0.60
3.0	2.5	4.5	6	0.60
3.1	2.5	4.5	6	0.59
3.2	2.5	4.5	6	0.58
3.3	2.5	4.5	6	0.58
3.4	2.5	4.5	6	0.57
3.5	2.5	4.5	6	0.57
3.6	2.5	4.5	6	0.56
3.7	2.5	4.5	6	0.56
3.8	2.5	4.5	6	0.55
3.9	2.5	4.5	6	0.55
4.0	2.5	4.5	6	0.55

According to [4], the modelling of the second option was performed taking into account formulas (4, 5):

$$Q_r = \frac{z_{mid} A^{1.2} F}{t_r^{1.2n-0.1}} \eta \cdot m, \quad (4)$$

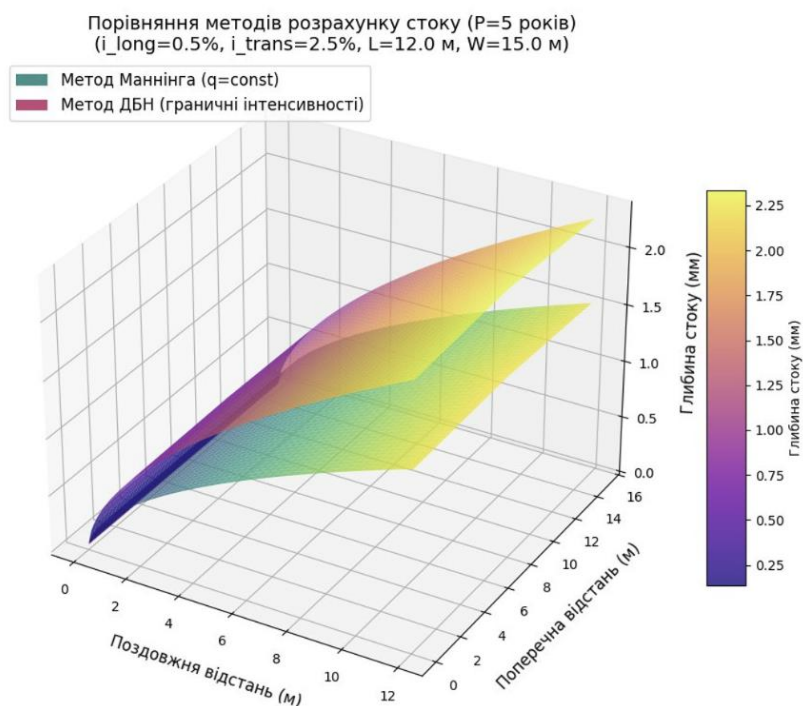
where z_{mid} — is the average value of the coefficient characterising the surface area of the catchment basin;
 F — is the total area of the catchment basin, ha;
 t_r — is the calculated duration of rainfall, equal to the time concentration of surface runoff for a given cross-section, min/

A and n are parameters that depend on the climatic characteristics of the region for a period of single exceedance P :

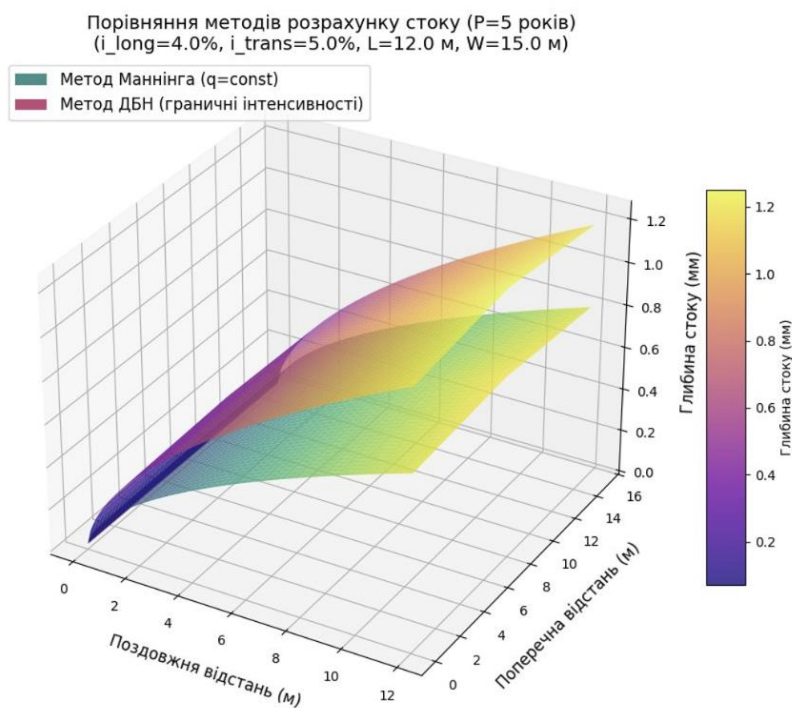
$$A = q_{20} \cdot 20^n \left(1 + \frac{\lg P}{\lg m_r}\right)^r, \quad (5)$$

where q_{20} — is the rainfall intensity, l/(s·ha), for a specific area with a duration of 20 minutes at $P = 1$ year.

The simulation results are shown in **Figure 2** and presented in **Table 2** with a sample size of 0.5 %.



a)



b)

- a) under the conditions of longitudinal slope — 0.5 %, transverse slope — 2.5 %, length of runoff movement — 15 m, catchment width — 12 m;
b) under the conditions of longitudinal slope — 4 %, transverse slope — 5 %, length of runoff movement — 15 m, catchment width — 12 m.

Figure 2 — Comparison of modelling results using the Manning formula and the limiting intensities method

Partial results of modelling using two methods are presented in **Table 2**.

Table 2

Results of modelling runoff formation using Manning's formula and the limiting intensities method

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width (m)	Length (m)	Max. depth (Manning, mm)	Max. depth (DBN, mm)
0	2.5	4.5	6	3.40	5.19
0.5	2.5	4.5	6	1.05	1.61
1.0	2.5	4.5	6	0.86	1.30
1.5	2.5	4.5	6	0.76	1.15
2.0	2.5	4.5	6	0.69	1.06
2.5	2.5	4.5	6	0.65	0.99
3.0	2.5	4.5	6	0.62	0.94
3.5	2.5	4.5	6	0.59	0.90
4.0	2.5	4.5	6	0.56	0.86
0	3.0	4.5	6	3.40	5.19
0.5	3.0	4.5	6	1.05	1.61
1.0	3.0	4.5	6	0.86	1.30
1.5	3.0	4.5	6	0.76	1.15
2.0	3.0	4.5	6	0.69	1.06
2.5	3.0	4.5	6	0.65	0.99
3.0	3.0	4.5	6	0.62	0.94
3.5	3.0	4.5	6	0.59	0.90
4.0	3.0	4.5	6	0.56	0.86
0	3.5	4.5	6	3.40	5.19
0.5	3.5	4.5	6	1.05	1.61
1.0	3.5	4.5	6	0.86	1.30
1.5	3.5	4.5	6	0.76	1.15
2.0	3.5	4.5	6	0.69	1.06
2.5	3.5	4.5	6	0.65	0.99
3.0	3.5	4.5	6	0.62	0.94
3.5	3.5	4.5	6	0.59	0.90
4.0	3.5	4.5	6	0.56	0.86
0	4.0	4.5	6	3.40	5.19
0.5	4.0	4.5	6	1.05	1.61
1.0	4.0	4.5	6	0.86	1.30
1.5	4.0	4.5	6	0.76	1.15
2.0	4.0	4.5	6	0.69	1.06
2.5	4.0	4.5	6	0.65	0.99
3.0	4.0	4.5	6	0.62	0.94
3.5	4.0	4.5	6	0.59	0.90
4.0	4.0	4.5	6	0.56	0.86
0	4.5	4.5	6	3.40	5.19
0.5	4.5	4.5	6	1.05	1.61
1.0	4.5	4.5	6	0.86	1.30

Longitudinal slope (%)	Transverse slope (%)	Width (m)	Length (m)	Max. depth (Manning, mm)	Max. depth (DBN, mm)
1.5	4.5	4.5	6	0.76	1.15
2.0	4.5	4.5	6	0.69	1.06
2.5	4.5	4.5	6	0.65	0.99
3.0	4.5	4.5	6	0.62	0.94
3.5	4.5	4.5	6	0.59	0.90
4.0	4.5	4.5	6	0.56	0.86
0	5.0	4.5	6	3.40	5.19
0.5	5.0	4.5	6	1.05	1.61
1.0	5.0	4.5	6	0.86	1.30
1.5	5.0	4.5	6	0.76	1.15
2.0	5.0	4.5	6	0.69	1.06
2.5	5.0	4.5	6	0.65	0.99
3.0	5.0	4.5	6	0.62	0.94
3.5	5.0	4.5	6	0.59	0.90
4.0	5.0	4.5	6	0.56	0.86

As a result of modelling, it was determined that in order to ensure surface runoff from the bridge deck, a minimum longitudinal slope of at least 0.2 % to the water intake element should be provided. At the same time, the theoretical accuracy of the slope is influenced by factors such as deviations in the calculations of the 'construction camber' and the tolerances provided for in [15]. In the practical implementation of design slopes, a significant part is made up of errors in geodetic measurements during stakeout work [14]. The authors see the prospect of further research in the systematisation and consideration of these errors, which will make it possible to refine the regulatory and technical documentation related to the design and implementation of drainage systems.

Conclusions

The study identified several key issues related to drainage:

Inaccuracies in design and construction: Determining and ensuring minimum longitudinal slopes depends on the accuracy of measuring equipment and the qualifications of workers. Even minor deviations in 'construction camber' marks can negate design slopes, leading to the formation of stagnant areas. Small slopes may be less than the acceptable measurement error, making their implementation virtually impossible.

Shortcomings in regulatory documentation: Existing requirements for drainage from bridges have a harmful impact on the time between repairs. In particular, the requirement to locate the drainage axis at a distance of 200–500 mm from the kerb creates technological difficulties, as this distance is too small for effective compaction of the asphalt concrete pavement. This leads to uncompacted areas that are prone to rapid deterioration and water penetration.

Modelling has shown that to ensure effective surface runoff from the bridge deck, the minimum longitudinal slope to the water intake element should be at least 0.2 %. This result does not take into account possible deviations in construction elevation calculations and geodetic measurement errors.

References

1. Barnes, H. H. (1989). Roughness Characteristics of Natural Channels (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1849). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office [in English].
2. US Army Corps of Engineers. (2020). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center [in English].

3. Sturm, T. W. (2010). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Education [in English].
4. DBN V.2.5-75:2013 Sewerage. External networks and structures. Basic design provisions. with amendment No. 1 [Effective from 01.02.2019] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2019. 219 p. [Ukrainian].
5. Jong-min Kim, Hyunglak Lee, Yong Rak Kim, H. B. Kim (2009). A Drainage System for Mitigating Moisture Damage to Bridge Deck Pavements [in English].
6. S. Pearson, J. Cuninghame (1998). Water Management for Durable Bridges [in English].
7. Mohamed M. Mekkawy, D. White, M. Suleiman, S. Sritharan (2005). Simple Design Alternatives to Improve Drainage and Reduce Erosion at Bridge Abutments [in English].
8. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and pipes. Basic design requirements. [Effective from 01.03.2010] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 46 p. [Ukrainian].
9. Amin Akhnoukh, Rudolf Seracino Design and Construction Practices for Efficient Bridge Deck Drainage. EPiC Series in Built Environment [in English].
10. Bani-Hani, A. Baral, M. Shahandashti (2023). Synthesis of State of Practice on Bridge Deck Drains. International Conference on Transportation and Development 2023 [in English].
11. ASCE Manual of Practice. No. 77 (1992). Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems [in English].
12. Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22, Third Edition, 2009 [in English].
13. Kaskiv V. I., Havryshchuk V. V. Linear surface drainage from road coverage, technical and economic indicators. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2020. Вип. 108. Р. 39–45 [Ukrainian].
14. Sossa, B. & Havryshchuk, V. (2025). Vykorystannia metodu Monte-Karlo pry doslidzhenni pokhybok heodezychnykh prykladiv [Application of the Monte Carlo method in the study of errors of geodetic instruments]. *Technical sciences and technologies*. 2(40). P. 472–484 DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484) [Ukrainian].
15. DSTU-N B V.1.3-1:2009 System for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction. Measurement, calculation, and control of the accuracy of geometric parameters. Guideline [Effective from 01.10.2010] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 75 p. [Ukrainian].

Список літератури

1. Barnes, H. H. (1989). Roughness Characteristics of Natural Channels (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1849). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
2. US Army Corps of Engineers. (2020). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center.
3. Sturm, T. W. (2010). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Education.
4. ДБН В.2.5-75:2013 Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. із міною № 1. Київ, 2019, 219 с. (Інформація та документація).
5. Jong-min Kim, Hyunglak Lee, Yong Rak Kim, H. B. Kim (2009). A Drainage System for Mitigating Moisture Damage to Bridge Deck Pavements.
6. S. Pearson, J. Cuninghame (1998). Water Management for Durable Bridges.
7. Mohamed M. Mekkawy, D. White, M. Suleiman, S. Sritharan (2005). Simple Design Alternatives to Improve Drainage and Reduce Erosion at Bridge Abutments.
8. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2010, 46 с. (Інформація та документація).
9. Amin Akhnoukh, Rudolf Seracino Design and Construction Practices for Efficient Bridge Deck Drainage. EPiC Series in Built Environment.
10. Bani-Hani, A. Baral, M. Shahandashti (2023). Synthesis of State of Practice on Bridge Deck Drains. International Conference on Transportation and Development 2023.

11. ASCE Manual of Practice No. 77 (1992). Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems.
 12. Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22, Third Edition, 2009.
 13. Kaskiv V. I., Havryshchuk V. V. Linear surface drainage from road coverage, technical and economic indicators. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2020. Вип. 108. С. 39–45.
 14. Сосса Б., Гавришук В. (2025). Використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів. *Технічні науки та технології*. Чернігів. 2025. 2(40), С. 472–484. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484).
 15. ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009 Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Виконання вимірювань, розрахунків та контроль точності геометричних параметрів. Київ: Мінрегіон України, 2010, 75 с. (Інформація та документація).
-

Гавришук В. В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-3164-4426>

Сосса Б. Р., д-р філос. з геодезії та землеустрою, <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>

Державний торговельно-економічний університет (ДТЕУ), м. Київ, Україна

ОСНОВНІ ЧИННИКИ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ З ПОКРИТТЯ ШТУЧНИХ СПОРУД

Анотація

Вступ. Ефективне управління поверхневими стоками з урбанізованих територій є ключовим завданням сучасного будівництва, що безпосередньо впливає на безпеку, функціональність та довговічність об'єктів. Традиційні рішення та розрахунки, які дозволяють підтоплення водозбірної ділянки на висоту бордюрного каменю не допускається застосовувати на мостах. Некоректний розрахунок параметрів водовідведення може призвести до аквапланування, замокання конструктивних елементів та їх руйнування, що зумовлює необхідність вдосконалення існуючих методик. Основним способом, який застосовується в Україні для розрахунку витрати дощового стоку з водозбірного басейну є метод граничних інтенсивностей, описаний в [4]. У світовій практиці широко поширена та застосовується формула Маннінга [1-3, 11].

Окремим, але критично важливим аспектом, що часто ігнорується, є зв'язок між теоретично обґрунтованими мінімальними похибами та точністю їх практичного втілення. При проектуванні та будівництві мостових конструкцій, визначення та забезпечення мінімальних поздовжніх ухилів, необхідних для ефективного водовідведення, безпосередньо залежить від точності вимірювального обладнання (нівелірів, тахеометрів) та кваліфікації виконавців. Малі похиби можуть виявитися меншими за допустиму похибку вимірювань, що робить їх практичну реалізацію неможливою та призводить до утворення застійних зон. Таким чином, аналіз впливу похилів має бути інтегрований з оцінкою практичної досяжності заданих параметрів.

Додатково, слід враховувати імовірність похибок при теоретичних розрахунках, важливим викликом є коректне втілення проектних рішень на практиці. При цьому будівельний підйом, що являє собою заздалегідь розраховане імітування зворотної кривини, є обов'язковим елементом проектування прогонових конструкцій для компенсації їхнього прогину під постійним і тимчасовим навантаженнями. Неточності у визначенні або реалізації цих відміток безпосередньо впливають на фактичні поздовжні та поперечні ухили на поверхні проїжджої частини. Навіть незначні відхилення у відмітках будівельного підйому можуть нівелювати проектні похиби, необхідні для ефективного водовідведення, що призводить до утворення локальних зон застою води та порушення функціонування водовідведення.

В роботі проведено моделювання формування поверхневого стоку за формулою Маннінга [1-3, 11] та методом граничних інтенсивностей [4]. При моделюванні руху поверхневого

стоку основною задачею було визначення максимальної величини шару поверхневого стоку, з подальшим визначенням основних факторів впливу на величину шару стоку. Моделювання формування поверхневого стоку виконано з урахуванням змінних поздовжніх та поперечних похилів покриття, геометричних параметрів водозбірної ділянки відстані між водоприймальними елементами та ширини.

Проблематика. Однією з передумов ефективного функціонування системи водовідведення з покриття мосту та захисту конструкцій є швидкість прийому поверхневого стоку водоприймальними елементами, основним показником, який визначає швидкість руху стоку є похил поверхні. Похибки та неточності, можуть впливати на зменшення похилу та на ефективність функціонування системи водовідводу.

Мета. Провести моделювання процесу формування поверхневого стоку методом Маннінга та граничних інтенсивностей. Визначити кількість стоків, які формуються з локальної водозбірної ділянки перед елементом водозбору. Визначити мінімально-допустимі поздовжні похили для мостів з урахуванням забезпечення функціонування системи водовідведення.

Матеріали та методи. Під час дослідження використано комплексний підхід, що базується на аналізі науково-технічних напрацювань у сфері проектування поверхневого водовідведення та дощової каналізації, а також практичний досвід їх улаштування. Методологічною основою роботи є аналіз чинних будівельних норм та порівняння їх із відповідними закордонними нормативними документами та технічною літературою. Для забезпечення комплексності дослідження ураховано вітчизняний і світовий досвід, здобутий під час виконання робіт із проектування, улаштування та експлуатації водовідвідних систем. Застосовано методи математичного моделювання для визначення оптимальних ключових чинників, які визначають величину формування поверхневого стоку та мінімально-допустимі поздовжні похили покриття мосту, які забезпечують ефективне функціонування системи водовідведення.

Результати. Визначено основні чинники, які впливають на формування поверхневого стоку. Обґрунтовано величину поздовжнього похилу, яка забезпечує ефективність роботи системи водовідведення.

Висновки. Дослідження показує, що для забезпечення ефективного водовідведення та запобігання руйнуванню мостових конструкцій необхідно враховувати не лише теоретичні розрахунки, але й практичну реалізацію проектних рішень. Досягнення мінімально допустимого поздовжнього похилу, що становить не менше 0,2 %, є ключовою умовою для забезпечення надійного функціонування системи водовідведення.

Ключові слова: міст, поверхневі стоки, поздовжній та поперечний похил, величина стоку, водоприймальний елемент.

UDK 528.48

Vladyslav Havryshchuk, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-3164-4426>Bohdan Sossa, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>*State University of Trade and Economics (SUTE), Kyiv, Ukraine*

SPECIFICS OF GEODETIC WORKS AS PART OF ACCEPTANCE TESTS OF WATER DRAINAGE SYSTEMS ON BRIDGES

Abstract

Introduction. Testing drainage systems on bridges is a critically important step in ensuring their durability, safety, and reliability. These tests are necessary to prevent damage to the bridge structure that can be caused by excessive moisture, corrosion, and freezing water. The bridge deck is constantly exposed to atmospheric precipitation in the form of rain and snow. If the drainage system does not function properly, water will accumulate on the roadway, creating additional stress on the pavement and waterproofing layer. This can lead to rapid deterioration, cracks, and potholes. Tests ensure that all water is effectively collected and drained.

Metal bridge elements, such as reinforcement, beams, and support structures, are susceptible to corrosion, which is exacerbated by water, salt, and chemical reagents used in winter to avoid ice. Proper drainage minimizes metal contact with aggressive environments, significantly extending the life of the structure. Water that is not drained from the bridge surface contributes to increased aquaplaning, especially during heavy rain. This significantly increases the risk of road accidents. Testing helps to identify and eliminate areas where water stagnates, ensuring safe conditions for traffic.

Tests, including downpour tests or leak tests, can reveal defects that cannot be seen visually: clogged drain pipes, cracks in the waterproofing, or incorrect road surface slope. This allows problems to be quickly eliminated before they cause serious damage. Regular testing and timely repair of the drainage system is significantly cheaper than major bridge repairs, which may be caused by structural damage due to atmospheric precipitation. These measures are part of scheduled maintenance, which helps to avoid unforeseen costs in the future.

Testing drainage systems on bridges is not just a formal procedure, but an integral part of responsible infrastructure management that ensures the long-term sustainability, cost-effectiveness, and safety of bridge structures.

Problem Statement. Despite the overall importance of testing, there are no unified standards and methodologies that would allow for a complete and comprehensive analysis. Each bridge has unique characteristics (length, width, slopes, type of construction), which requires an individual approach to each test. This complicates the comparison of results and the development of universal recommendations.

Objective. The main purpose of hydraulic testing on bridges is to ensure the reliability, durability, and safety of the bridge structure through effective water drainage. These tests confirm that the drainage system is functioning properly, preventing the destructive effects of excessive moisture. Hydraulic testing is preceded by surveying work, which involves checking and recording the actual characteristics of the drainage system. This includes checking the design slopes of the road surface and drainage channels, as well as the location of catch basins and drain pipes. The accuracy of this data is critical to ensuring effective collection and drainage of water from the bridge surface, preventing stagnation and further destruction. Geodetic work on bridges has its own specific features and challenges:

- The work is often carried out in conditions of active traffic, which requires the use of modern high-precision equipment and compliance with increased safety measures.
- A bridge is a dynamic structure that is constantly exposed to temperature fluctuations. This can cause materials to expand or contract, affecting the accuracy of measurements.
- Access to some elements of the drainage system, such as internal drainage pipes or drains, may be limited, requiring the use of special methods and tools.

Thus, high-quality surveying as part of acceptance testing is an integral part of ensuring the durability, safety, and functionality of a bridge, helping to avoid hidden defects and costly repairs in the future.

Materials and methods. In studying the errors of geodetic instruments and the resulting coordinates, the method of a priori simulation modeling was used. In assessing the accuracy of geodetic work, the method of statistical analysis was used.

Results. The paper describes in detail the stages, means, and work of geodetic measurements as part of the work to verify the effective operation of the drainage system. Based on the analysis of the accuracy of geodetic work, recommendations are given on the methodology for performing observations.

Conclusions. The integration of geodetic measurements into hydraulic testing of bridges is critically important because it provides objective and documented evidence of the drainage system's compliance with design requirements. Comprehensive analysis ensures long-term reliability, cost-effectiveness, and increased traffic safety on the bridge, transforming acceptance testing into a scientifically sound process.

Keywords: errors, geodetic measurements, leveling, construction and operation of bridges, drainage, slopes.

Introduction

When performing survey and engineering-geodetic work on bridges, the work is divided into three main stages:

preparatory — obtaining the customer's technical specifications and developing contractual documentation, collecting and analyzing survey materials from previous years, conducting a reconnaissance survey of the territory, and developing a working survey project;

field stage — performing a set of field measurements and preliminary data processing to ensure their quality, completeness, and accuracy (field materials and preliminary processing materials are not included in the report and are not transferred to the customer, but are stored with the main copy of the report in the contractor's archive);

office — final processing of field measurement data with an assessment of the accuracy of the results obtained, creation of digital vector plans and drawings, study and analysis of materials from previous years' measurement work, compilation and transfer of the report to the customer [3].

This study examines in detail the field stage of work as the one that most affects the accuracy of drainage system installation and check.

Analysis of Recent Research and Publications. To carry out engineering and geodetic survey work, a number of interrelated technological processes are performed to create the specified final cartographic and geodetic information. Drawing up a work program. Surveying reference geodetic and leveling networks. Creating a planimetric and elevation geodetic network. Aerial photography of the territory. Field decoding. Stereotopographic surveying. Formatting of engineering and topographic information into digital vector and graphic form. Preparation of a technical report [3].

The procedure for creating engineering and topographic plans in terms of their content and accuracy is determined by the Technical Specifications, Procedure, DBN A.2.1-1-2008 "Engineering surveys for construction" with the application of the current "Conventional signs for topographic plans of scales 1:5000, 1:2000, 1:1000, and 1:500," taking into account the additions and explanations of Ukrgeodesykartografiya and the Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine regarding the specifics of their application [3 – 11].

The technology for creating and technical requirements for topographic plans at scales of 1:500 — 1:5000 are mandatory for all entities operating in this field, regardless of their departmental affiliation. Various methods are used to create a basis for high-precision work [13, 15]. At the same time, the issue of monitoring the geometry of structures has been fairly well researched, but drainage structures are not taken into account in such work [14].

Objective. To justify the feasibility of using engineering and geodetic measurements as part of hydraulic testing of drainage systems on bridges.

Materials and Methods

In order to conduct a more accurate survey than a topographic one, namely a 2-20 mm planimetric and height survey of structural elements, it is necessary to create a planimetric and elevation geodetic network. Such networks are created using a combined method of GNSS observations, linear-angular measurements, and levelling.

First, a special-purpose planimetric and altimetric network is created. The points of the planimetric and elevation network (bridge triangulation) are fixed with forced centring points or metal dowels drilled into concrete monolithic slabs on both sides of the bridge crossing. The type of fixing of the points is selected so as to ensure their stability and preservation. For planimetric surveys, the number of such points must be at least four, and for elevation surveys, at least two.

If necessary, combined marks mounted on bridge pillars or other stable structures can be used. These marks are used when measuring structures that are not accessible from the bridge deck. They are designed to improve the accuracy of determining the plan and elevation coordinates of structures by means of coordinate intersections, trigonometric levelling, or terrestrial laser scanning (registration and georeferencing of scans from a scanner). Steps are compiled for all points of the planimetric and elevation geodetic network. GNSS observations of points of the planimetric and elevation network are performed in static mode with a data collection frequency of 0.5-1 seconds from the NAVSTAR, GALILEO, BEIDOU, and GLONASS satellite systems. The observation session at each point must last at least 1 hour. At the same time, measurements are carried out not by a ray method, but by a network method in order to obtain all network vectors and, accordingly, sufficient reliability of the criteria for assessing the accuracy of the obtained coordinates of the network points.

Linear-angular measurements are performed by at least two full circular receptions at points and one circular reception at combined marks. The RCS of angle measurements with an electronic total station should be no more than 2 angular seconds. Linear measurements at bridge triangulation points are performed on a reflector, and at combined marks — on retro sheets. In the absence of forced centering points, reflective systems are fixed on wooden tripods located at the points throughout the entire measurement cycle.

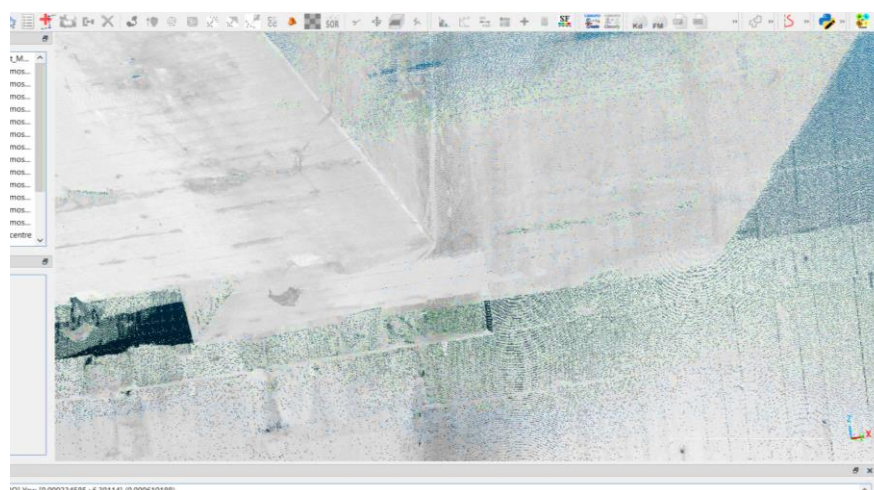
Levelling between points is performed according to a class 3 level program. It is permissible to use digital levels with an accuracy of no worse than 1.5 mm per km of double run. The use of aluminium telescopic staves is not permitted, only wooden, fibreglass and invar staves. When working on an operational bridge, it is recommended to stop traffic for the duration of the levelling or to perform the leveling during the least busy time with temporary closures at the time of measurement.

Terrestrial laser scanning can be used to obtain planimetric and elevation information about building structures and individual elements. This technology allows a large number of points to be obtained in a short time (**fig. 1**). The accuracy of coordinate determination in this way is from 5 to 20 mm, depending on the length and configuration. The biggest advantage of using ground-based laser scanning is that it provides information about all visible structures, not just individual points. The result of scanning is a point cloud, which can consist of millions or hundreds of millions of points, each of which has three-dimensional coordinates in the state coordinate system or the object coordinate system (construction grid).

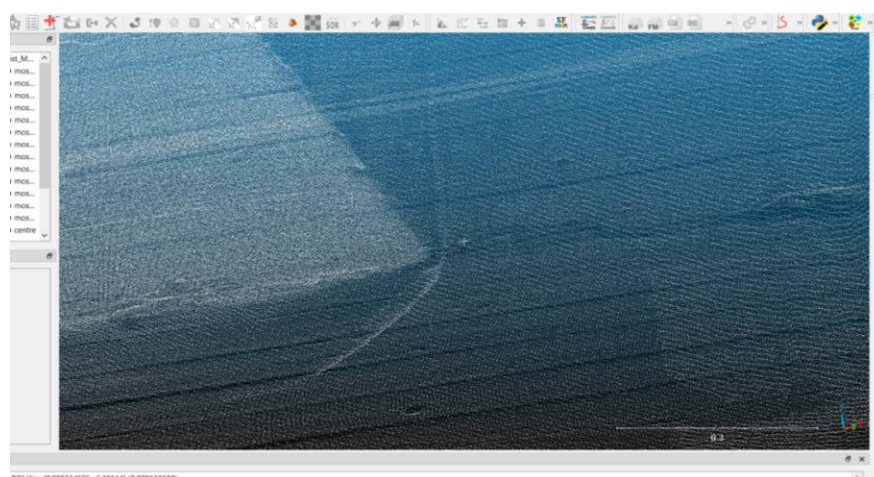


Figure 1 — Sample cloud of bridge transition points (approx. 420 million points)

The resulting point cloud can serve as a basis for further virtual surveying and determining the coordinates of individual points on structural elements of the structure. It can also be used for further wireframe or solid modelling.



a)



b)

- a) fragment approx. 10 m wide
- b) on the right — approx. 1 m.

Figure 2 — Zoom in on the point cloud

Geometric levelling is used to obtain accurate (2-3 mm) elevation coordinates of objects that require such accuracy (e.g., drainage systems). It is also optimal to use geometric levelling to determine the marks of structures located on the lower side and which are not accessible from the upper side. These can be suspended collectors, elements of arch spans, and other utilities. However, the possibility of such work is limited to viaducts with a small height (up to 5 m). If it is necessary to perform such work on aqueducts or high viaducts, trigonometric levelling is used with an electronic total station for non-reflective distance measurement. The accuracy of the points obtained in this way is about 5 mm, but may vary upwards due to long distances and a decrease in the angle of reflection of the laser beam and an increase in the inclination of the telescope. If access to such an element is possible from service channels or by other means (for example, from the platform of a hydraulic lift), mini-prisms or specially designed retro sheets are used to increase the accuracy of determining

the marks coordinates. In this case, observations are made using the full reception method (both faces measurement).

To perform trigonometric levelling, it is necessary to have combined marks on the pillars of the bridge crossing, the coordinates of which are determined from a special-purpose planimetric and elevation network. This allows you to increase the accuracy of height measurements in conditions of strong vertical refraction present on water obstacles.

Drawing up planimetric and elevation surveys of bridge structure elements. Given the specific nature of the information obtained as a result of surveying elements, it is drawn up in the form of as-build surveys. For structures where elevation coordinates are more important, the executive survey is drawn up in the form of transverse and/or longitudinal profiles. The scale of such a profile is selected depending on the length of the element and ranges from 1:2000 (H) — 1:200 (V) to 1:100 (H) — 1:10 (V). It is also permissible to perform profiles at an arbitrary scale while maintaining a horizontal to vertical scale ratio of 1:10 or 1:5 to fit the paper format. The scale, ratio, or paper format is selected by the customer and specified in the Technical Specification.

In addition, combined planimetric and elevation surveys are performed to obtain information about slopes. They are drawn up either in the form of plans or in the form of plans and sections indicating the design and/or actual slopes. On such drawings, distances and marks are given in meters to two decimal places, slopes are given to one part per thousand, unless otherwise specified in the Technical Specification. At the same time, when calculating slopes, plan and elevation coordinates are used to three decimal places.

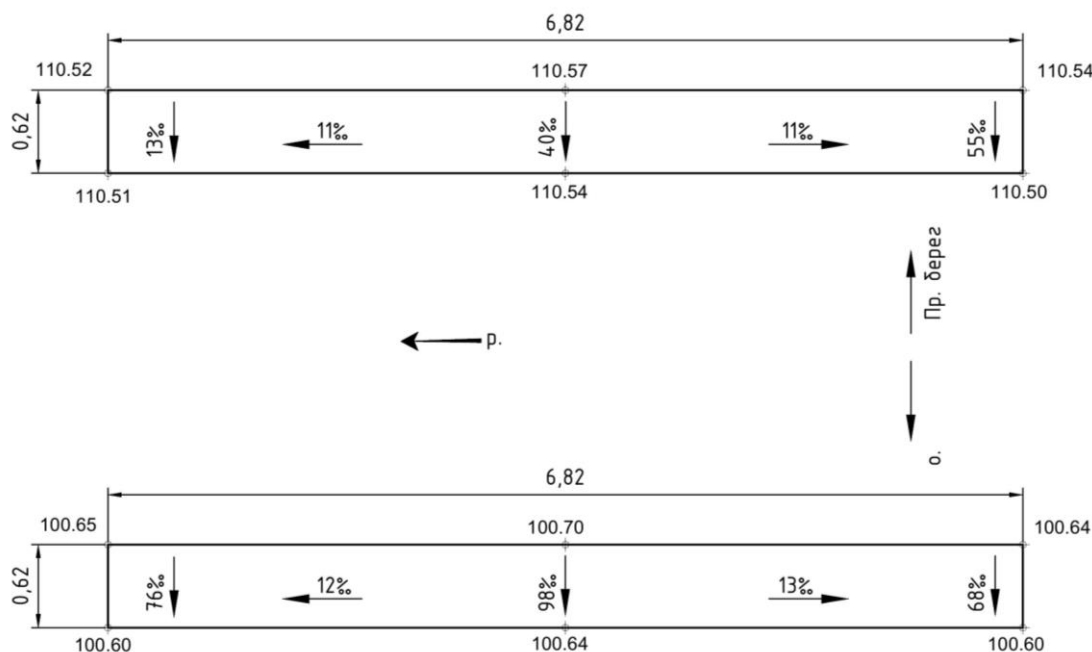


Figure 3 — Sample of combined planimetric and elevation surveying

Planimetric as-built drawings are prepared in accordance with the Technical Specification and contain planned displacements of structural elements from their design position or from construction axes, indicating the design and actual dimensions. Distances are given in millimetres or meters to three decimal places. In the case of several structures of the same type, it is permissible to indicate deviations in pairs of arrows along the axes with the values of deviations in millimetres for planned displacements and the amount of displacement with the corresponding sign in a circle for height displacements.

When installing or inspecting drainage systems, segments with a length of 6 or 12 meters are usually used. At the same time, depending on the diameter of the pipe, the slopes can be small (1 ‰, 3 ‰) and large (20 ‰). Therefore, the difference in height between the edges of the section will be from 6 mm to 240 mm. These values are ideal elevations that must be maintained. The accuracy of geodetic work determines how close we can get to these ideal values in practice. The slope installation error m_i is determined by formula 1:

$$m_i(\text{‰}) = \frac{m_h}{L} 1000, \quad (1)$$

where m_h is the error in determining the elevation in meters, and L is the length of the section in meters.

Now let's look at the two main methods for determining elevations: geometric and trigonometric levelling.

Geometric levelling is a classic method based on sighting with a horizontal sight line using a level and reading from levelling staves. This is the most accurate method for determining elevations over short distances. Accuracy depends on the class of the level and the measurement conditions. For such short distances, the accuracy of a typical device used in construction is about 0.5 – 1.0 mm.

Trigonometric levelling determines elevation by measuring the inclined distance and vertical angle using an electronic total station. The total station measures the angle of inclination to the reflector installed at the point and the distance to it. The elevation is calculated using the formula:

$$h = S \cdot \sin(\alpha), \quad (2)$$

where S is the inclined distance and α is the angle of inclination.

The accuracy depends on the accuracy of the angle and distance measurements by the total station, as well as on the accuracy of the installation of the device and the reflector. In addition, the accuracy of trigonometric levelling deteriorates when the telescope is tilted relative to the horizontal direction. In this case, we can talk about an accuracy of within 5 mm.

Table 1

Let's summarise the values of the elevations between the edges of the pipe segment and the values of the slope accuracy in a table

Segment length	Theoretical slope	Required elevation	Geometric levelling		Trigonometric levelling	
			m_i	Actual slope, ‰	m_i	Actual slope, ‰
6 m	1 ‰	6 mm	0,17	0,83 – 1,17	0,83	0,17 – 11,83
6 m	3 ‰	18 mm	0,06	2,94 – 3,06	0,28	2,72 – 13,28
6 m	20 ‰	120 mm	0,01	19,99 – 20,01	0,04	19,96 – 120,04
12 m	1 ‰	12 mm	0,08	0,92 – 1,08	0,42	0,58 – 11,42
12 m	3 ‰	36 mm	0,03	2,97 – 3,03	0,14	2,86 – 13,14
12 m	20 ‰	240 mm	0,00	20	0,02	19,98 – 120,02

Based on a comparison of the accuracy of the methods and calculation results, the following recommendations can be made.

1. For small slopes (1 ‰ – 3 ‰)

To ensure the stability and reliability of the slope, especially at 1 ‰, geometric levelling with a precision or technical level is recommended. It is easier to perform over such short distances and guarantees an error within 0.03 ‰ – 0.17 ‰.

Therefore, for reliable small slopes where every millimetre counts, geometric levelling is the preferred method due to its high accuracy and ease of use over short distances.

2. For large slopes (20 ‰)

In this case, the accuracy requirements are significantly lower. The elevations are large, and an error of a few millimetres will not have a critical impact on the final result. Trigonometric levelling using an electronic total station is perfectly acceptable and even more convenient here. An error of 3-5 mm is perfectly acceptable. Geometric levelling can of course also be used, and it will give a more accurate result.

General conclusion:

For high accuracy (slopes up to 3 – 5 ‰): priority should be given to geometric levelling. For standard accuracy (slopes over 10 ‰): Trigonometric levelling can be used effectively, as it is often more versatile and faster in construction site conditions.

Conclusions

Geodetic measurements are not just an additional, but a critically important component of acceptance hydraulic tests. In addition, the types and methods of performing such work already allow achieving the accuracy required for the correct installation of drainage systems. Together, they provide quantitative confirmation of design decisions, helping to identify hidden defects that cannot be detected by hydraulic tests alone. Thus, the integration of geodetic measurements into the hydraulic testing process allows for a new level of accuracy and reliability in quality control, transforming the bridge acceptance procedure from a visual inspection to a scientifically based analysis.

Unlike subjective assessments, geodetic data is irrefutable proof that all geometric parameters of the drainage system comply with the design documentation. This ensures the legal and technical transparency of the process. In the case of visual confirmation of the system's functioning, measurements allow the identification of minor but potentially dangerous deviations (e.g., local depressions) that could lead to water stagnation, pavement damage, and, as a result, costly repairs in the future. Early detection and correction of defects, made possible by geodetic control, is significantly cheaper than eliminating the consequences of ignoring them, such as cracks, potholes, and corrosion. Accurate measurements ensure proper road slopes and effective water collection, minimising the risk of hydroplaning and increasing overall traffic safety on the bridge.

Thus, the integration of geodetic control into hydraulic testing transforms it into a comprehensive tool for ensuring the long-term reliability, economic efficiency, and safety of bridge structures.

References

1. DBN V.2.3-22:2009 Bridges and pipes. Basic design requirements. [Effective from 01.03.2010] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 46 p. [Ukrainian].
2. DBN V.2.5-75:2013 Sewerage. External networks and structures. Basic design provisions. with amendment No. 1 [Effective from 01.02.2019] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2019. 219 p. [Ukrainian].
3. DBN A.2.1-1-2008 Research, design, and territorial activities. Research. Engineering research for construction [Effective from 07/01/2008] Official publication. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2008. 74 p. [Ukrainian].
4. Order No. 1675 of 17 April 2025 On Approval of the Procedure for Topographic Surveying at Scales of 1:5000, 1:2000, 1:1000, and 1:500 [Effective as of 17 April 2025] Official publication. Kyiv: Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine, 2025. 59 p. [Ukrainian].
5. Basic provisions for creating topographic maps at scales of 1:5,000, 1:2,000, 1:1,000, and 1:500. Ukrgeodesykartografiya, dated January 24, 1994, No. 3. 6 p. [Ukrainian].
6. Classifier of information displayed on digital topographic maps with scales of 1:5,000–1:500. Ukrgeodesykartografiya No. 25 dated March 9, 2000. 35 p. [Ukrainian].
7. Instructions on the procedure for control and acceptance of topographic, geodetic, and cartographic works. Ukrgeodesykartografiya, No. 19 dated February 17, 2000 [Ukrainian].
8. Instructions for surveying and updating points of the State Geodetic Network of Ukraine. Ukrgeodesykartografiya No. 23 dated February 29, 2000. 28 p. [Ukrainian].

9. Conventional signs for topographic plans on a scale of 1:5,000 – 1:500. Ministry of Ecology. No. 295, 2001. 208 p. [Ukrainian].
10. Instructions on the terms and conditions for performing aerial photography, topographic and geodetic, cartographic works, cadastral surveys by business entities, the procedure for issuing licenses and monitoring their compliance (DKNT-2.07.01-93). 92 p. [Ukrainian].
11. Regulations on the procedure for organizing control in the production of digital maps, Ukrgeodesykartografiya. 1997 [Ukrainian].
12. Sossa, B. & Havryshchuk, V. Vykorystannia metodu Monte-Karlo pry doslidzhenni pokhybok heodezychnykh pryladiv [Application of the Monte Carlo method in the study of errors of geodetic instruments]. *Technical sciences and technologies. Scientific journal*. 2025. 2(40). P. 472–484 DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484) [Ukrainian].
13. Maciejewska, A., Brusak, I. and Maciuk, K. «Accuracy of bridge span measurements using classical and GNSS methods», *Budownictwo i Architektura*. 2025. 24(1). P. 163–174. DOI: <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6321> [in English].
14. Beshr, A. Structural Deformation Monitoring and Analysis of Highway Bridge Using Accurate Geodetic Techniques. *Engineering*. 2015. 7. P. 488–498. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2015.78045>
15. Erol, S., Erol, B., & Ayan, T. A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228977633> [in English].

Список літератури

1. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2010. 46 с. (Інформація та документація).
2. ДБН В.2.5-75:2013 Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. із міною № 1. Київ. Україна, 2019. 219 с. (Інформація та документація).
3. ДБН А.2.1-1-2008 Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва. Київ, 2008. 74 с. (Інформація та документація).
4. Наказ від 17.04.2025 № 1675 Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. Київ. 2025. 59 с. (Інформація та документація).
5. Основні положення створення топографічних планів масштабів 1: 5 000, 1:2 000 1:1000, 1: 500. Укргеодезкартографія, від 24.01.94, № 3. 6 с. (Інформація та документація).
6. Класифікатор інформації, яка відображається на цифрових топографічних планах масштабів 1:5 000 – 1:500. Укргеодезкартографія № 25 від 9.03.2000 р. 35 с. (Інформація та документація).
7. Інструкція про порядок контролю і приймання топографо-геодезичних та картографічних робіт. Укргеодезкартографія, № 19 від 17.02.2000 р. (Інформація та документація).
8. Інструкція з обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі України. Укргеодезкартографія № 23 від 29.02.2000 р. 28 с. (Інформація та документація).
9. Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5 000 – 1:500. Міністерство екології. № 295, 2001. 208 с. (Інформація та документація).
10. Інструкція про умови і правила виконання аерофотознімальних, топографо-геодезичних, картографічних робіт, кадастрових знімань суб'єктами підприємницької діяльності, порядок видачі ліцензій та контроль за їх дотриманням (ДКНТА-2.07.01-93). 92 с. (Інформація та документація).
11. Положення про порядок організації контролю при виготовленні цифрових карт, Укргеодезкартографія, 1997 р. (Інформація та документація).
12. Сосса Б., Гавришук В. Використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів. *Технічні науки та технології. Науковий журнал*. 2025. Чернівці. 2(40). P. 472–484. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-472-484](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-472-484).
13. Maciejewska, A., Brusak, I. and Maciuk, K. () “Accuracy of bridge span measurements using classical and GNSS methods”, *Budownictwo i Architektura*. 2025. 24(1). P. 163–174. DOI: <https://doi.org/10.35784/bud-arch.6321>.

14. Beshr, A. Structural Deformation Monitoring and Analysis of Highway Bridge Using Accurate Geodetic Techniques. Engineering. 2015. 7. P. 488–498. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2015.78045>.

15. Erol, S., Erol, B., & Ayan, T. A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228977633>.

Гавришук В. В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-3164-44266>

Сосса Б. Р., д-р філос. з геодезії та землеустрою, <https://orcid.org/0000-0003-4484-4865>

Державний торговельно-економічний університет (ДТЕУ), Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ У СКЛАДІ ПРИЙМАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМИ ВОДОВІДВЕДЕННЯ НА МОСТАХ

Анотація

Вступ. Проведення випробувань системи водовідведення на мостах є критично важливим етапом, що забезпечує їхню довговічність, безпеку та надійність. Ці випробування необхідні для запобігання пошкодженню конструкції мосту, яке може бути спричинене надмірною вологістю, корозією та замерзанням води.

Основні причини та завдання випробувань

Покриття мосту постійно піддається впливу атмосферних опадів у вигляді дощу, снігу. Якщо система водовідведення не працює належним чином, вода накопичуватиметься на проїзній частині, що створює додаткове навантаження на дорожнє покриття та гідроізоляційний шар. Це може призвести до їхнього швидкого руйнування, появи тріщин та вибоїн. Випробування дозволяють переконатися, що вся вода ефективно збирається та відводиться.

Металеві елементи мосту, такі як арматура, балки та опорні конструкції, чутливі до корозії, яка посилюється під впливом води, солі та хімічних реагентів, що використовуються взимку для боротьби з ожеледицею. Належна робота системи водовідведення мінімізує контакт металу з агресивним середовищем, значно збільшуючи термін експлуатації споруди.

Вода, що не відводиться з поверхні мосту, сприяє підвищенню проявів аквапланування, особливо під час сильного дощу. Це значно підвищує ризик дорожньо-транспортних пригод. Випробування допомагають ідентифікувати та усунути зони, де вода застоюється, забезпечуючи безпечні умови для руху транспорту.

Випробування, що включають проливні тести або тести на герметичність, дозволяють виявити дефекти, які неможливо побачити візуально: засмічення дренажних труб, тріщини в гідроізоляції або неправильний похил дорожнього покриття. Це дає змогу оперативно усунути проблеми, перш ніж вони спричинять серйозні пошкодження.

Регулярні випробування та своєчасний ремонт системи водовідведення є значно дешевшими, ніж капітальний ремонт мосту, який може бути спричинений руйнуванням конструкцій через дію атмосферних опадів. Ці заходи є частиною планового технічного обслуговування, яке допомагає уникнути непередбачених витрат у майбутньому.

Випробування системи водовідведення на мостах є не просто формальною процедурою, а невід'ємним елементом відповідального управління інфраструктурою, що забезпечує довгострокову стійкість, економічну ефективність та безпеку мостових споруд.

Проблематика. Незважаючи на загальну важливість випробувань, відсутні уніфіковані стандарти та методики, що дозволяли б проводити повний та всебічний аналіз. Кожен міст має унікальні характеристики (довжина, ширина, похили, тип конструкції), що вимагає індивідуального підходу до кожного випробування. Це ускладнює порівняння результатів та розробку універсальних рекомендацій.

Мета. Основною метою гідравлічних випробувань на мостах є забезпечення надійності, довговічності та безпеки мостової споруди через ефективне відведення води. Ці випробування дозволяють підтвердити, що система водовідведення працює належним чином, запобігаючи руйнівним наслідкам, спричиненим надмірною вологістю. Виконанню гідравлічних випробувань передують геодезичні роботи — це контроль і фіксація фактичних характеристик системи водовідведення. Це включає перевірку проєктних похилів дорожнього покриття та дренажних лотків, розташування водоприймальних воронок та зливних трубопроводів. Точність цих даних критично важлива для забезпечення ефективного збору та відведення води з поверхні моста, що запобігає її застою та подальшому руйнуванню.

Проведення геодезичних робіт на мостах має свої специфічні особливості та виклики:

Роботи часто проводяться в умовах активного транспортного руху, що вимагає використання сучасного високоточного обладнання та дотримання підвищених заходів безпеки.

Міст — це динамічна споруда, яка постійно зазнає впливу температурних коливань. Це може призводити до розширення або стискання матеріалів, що впливає на точність вимірювань.

Доступ до деяких елементів системи водовідведення, наприклад, внутрішніх дренажних труб або зливів, може бути обмежений, що вимагає використання спеціальних методів та інструментів.

Таким чином, якісне проведення геодезичних робіт у складі приймальних випробувань є невід’ємним елементом забезпечення довговічності, безпеки та функціональності мосту, допомагаючи уникнути прихованих дефектів та дороговартісних ремонтів у майбутньому.

Матеріали та методи. При дослідженні похибок геодезичних приладів і результуючих координат застосовано спосіб апіорного симуляційного моделювання. При оцінці точності геодезичних робіт використано метод статистичного аналізу.

Результати. В роботі детально описано етапи, засоби та роботи геодезичних вимірювань, як складової частини виконання робіт з перевірки ефективної роботи системи водовідведення. На основі аналізу точності виконання геодезичних робіт надано рекомендації щодо методики виконання спостережень.

Висновки. Інтеграція геодезичних вимірювань у гідравлічні випробування мостів є критично важливою, оскільки вона надає об’єктивні та документальні докази відповідності системи водовідведення проєктним вимогам. Комплексний аналіз забезпечує довгострокову надійність, економічну ефективність та підвищує безпеку руху на мосту, перетворюючи приймальні випробування на науково обґрунтований процес.

Ключові слова: будівництво та експлуатація мостів, водовідведення, похили, геодезичні вимірювання, похибки, нівелювання.

УДК 625.7/.8

Лісневський Р. С.¹, <https://orcid.org/0000-0003-1128-913X>Онищенко А. М.², д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>¹Комунальне підприємство «Дирекція будівництва шляхово-транспортних споруд м. Києва»²Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕРМОНАПРУЖЕНЬ В ДОРОЖНЬОМУ ПОКРИВІ НА МЕТАЛЕВІЙ ПЛИТІ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

Анотація

Вступ. У статті наведено методику розрахунку термонапружень в дорожньому асфальтобетонному покритті на металевих ортотропних автодорожніх мостах на довговічність. Дана методика враховує матеріалознавчі та конструктивні підходи, що дозволяє проектувати дорожній покриття на металевих автодорожніх мостах підвищеної тріщиностійкості від дії річних і добових температур.

Проблематика. Автодорожні мости є важливою складовою транспортної мережі не тільки міст, але й цілої держави. Щорічно в Україні з'являються тисячі нових транспортних засобів, що призводить до зміни складу руху автомобільних потоків, збільшення вантажопідйомності та швидкості руху. В більшості Європейських країн введені обмеження щодо руху великовагових транспортних засобів по конструкції мостового полотна з метою забезпечення більшого терміну служби покриття і конструктивних елементів мостів, адже дорожній покриття на металевих автодорожніх мостах працює в більш несприятливих умовах і відповідно до нього висувуються більші вимоги, ніж до нежорсткого дорожнього одягу автомобільних доріг. Дорожній покриття на металевих автодорожніх мостах повинен бути стійкими до тріщиноутворення від дії коливання температури. У зв'язку з переліченими умовами виникає нагальна потреба в розробленні удосконаленої методики розрахунку, яка б відповідала сучасними вимогам дорожнього будівництва, сприяла підвищенню довговічності дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах та забезпечувала доцільне використання економічних ресурсів.

Мета роботи. Сучасний розвиток дорожнього будівництва вимагає постійного вдосконалення підходів до проектування та розрахунку дорожніх покриттів на металевих автодорожніх мостах, зокрема визначати більш оптимальні раціональні конструктивні рішення для мостового полотна. Урахуванням новітніх досліджень, сучасних матеріалів та інноваційних технологій дозволяє підвищити довговічність дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах, зменшити ризик утворення температурних тріщин та оптимізувати витрати на їх ремонткування та експлуатаційне утримання.

Метою роботи є інформування фахівців дорожнього господарства про новітні тенденції, методики та розробки у сфері проектування дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих плитах автодорожніх мостах. Запропонована методика спрямовані на підвищення ефективності проектних рішень, адаптацію існуючих методик до сучасних умов експлуатування та забезпечення економічно обгрунтованого використання матеріально-технічних ресурсів.

Матеріали і методи. Під час дослідження використано комплексний підхід, що базується на аналізі науково-технічних напрацювань у сфері проектування дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах, а також практичного досвіду його улаштування. Зокрема ураховано результати досліджень, проведених Національним транспортним університетом та Харківським автомобільно-дорожнім університетом та, які ґрунтуються на багаторічному досвіді надання послуг у галузі дорожнього будівництва.

Методологічною основою роботи є аналіз чинних будівельних норм і національних стандартів України, а також порівняння їх із відповідними закордонними нормативними документами та

технічною літературою. Для забезпечення комплексності дослідження ураховано вітчизняний і світовий досвід, здобутий під час виконання робіт із проєктування та улаштування дорожнього асфальтобетонного покриття на ортотропних автодорожніх мостах.

Застосовано методи аналітично-експериментальні з використанням положень теорії пружності, теорії в'язко-пружності, кінетичної теорії міцності твердих тіл, стандартизовані та спеціальні методики дослідження властивостей асфальтобетону. Аналіз результатів дозволяє обґрунтувати удосконалені підходи до проєктування та впровадження ефективних конструктивних рішень на мостовому полотні автодорожніх мостів.

Результати. У межах дослідження дана методика розроблена на підставі наукових досліджень, проведеного аналізу технічної літератури та чинних нормативних документів із застосування асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах. В основі методики знаходяться експериментально встановлені розрахункові параметри водонепроникних матеріалів, а саме: мастикасфальту, гусасфальту, епоксiasфальту, литого асфальту, дослідження на термостійкість, а також розроблені аналітичні залежності для розрахунку асфальтобетонного покриття на довговічність з позиції температурної тріщиностійкості.

Оновлені підходи до розрахунку термopужності дорожнього покриття на металевій ортотропній плиті автодорожніх мостів базуються на сучасних наукових дослідженнях, міжнародному досвіді та практичних даних, що дозволяє підвищити довговічність асфальтобетонного покриття, зменшити ризик утворення неконтрольованих тріщин і покращити експлуатаційні характеристики конструкцій мостового полотна.

Висновки. Запропонована методика термонапружень в дорожньому асфальтобетонному покритті на металевій ортотропній плиті автодорожніх мостів удосконалює існуючі підходи з проєктування конструкції мостового полотна підвищеної довговічності являє собою суцільний процес розрахунку покриття на міцність та морозостійкість з техніко-економічним обґрунтуванням варіантів. Вона базується на сучасних дослідженнях, ураховує матеріалознавчі та конструктивні особливості дорожнього асфальтобетонного покриття, експлуатаційні умови і передовий світовий досвід, що дозволяє підвищити ефективність проєктних рішень. Застосування цієї методики сприятиме покращенню експлуатаційних характеристик конструкцій дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах, підвищенню їхньої тріщиностійкості, стійкості до навантажень та довговічності. Це, у свою чергу, дасть змогу зменшити ризик передчасного утворення тріщин, скоротити витрати на ремонткування та експлуатаційне утримування дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах, а також забезпечити більш раціональне використання матеріально-технічних ресурсів у сфері дорожнього будівництва.

Впровадження методики розрахунку термонапружень конструкції дорожнього мостового полотна сприятиме підвищенню якості та довговічності асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах автомобільних доріг в Україні, що відповідає сучасним вимогам розвитку дорожньої інфраструктури та міжнародним стандартам.

Ключові слова: автодорожній міст, асфальтобетон, довговічність, дорожній покрив, конструкція мостового полотна, металева ортотропна плита мосту, температура, термopужні деформації, термов'язко-пружні властивості.

Вступ

Проєктування та будівництво дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах є складним інженерним процесом, що вимагає урахування багатьох чинників, зокрема механічних властивостей матеріалів, кліматичних умов, транспортного навантаження та довговічності конструкції мостового полотна [1 – 19].

Згідно вимог ДБН В.2.3-22 [8] — покриття проїзду на сталевій плиті не дозволяється виконувати із застосуванням звичайного асфальтобетону. Для покриття завтовшки від 4 см слід застосовувати водонепроникні конструкції з мастикасфальту, гусасфальту, епоксiasфальту або інші з проєктним

строком служби 15 років і більше, рекомендовано надати перевагу асфальтобетону дорожньому водонепроникному на основі бітуму, модифікованому комплексними добавками з водонасиченням до 1,0 % [13 – 16]. Одним із ключових аспектів у цьому процесі є правильне підбирання асфальтобетонного покриття зі значенням коефіцієнта теплового розширення, що наближається до його значення для ортотропної металевої плити, адже вони відіграють важливу роль у запобіганні утворенню неконтрольованих температурних тріщин і забезпеченні рівномірного розподілу напружень у асфальтобетонному покритті. Тут корисний досвід регулювання різниці в значеннях теплового розширення, що використовується в механіці композитів [1 – 4].

У цій статті розглянуто актуальні питання, пов'язані з методики розрахунку термонапружень в асфальтобетонному покритті на металевих автодорожніх мостах від зміни добової та річної температури. Дана методика дозволить розраховувати оптимальні конструктивні рішення на мостовому полотні, проаналізовано чинні нормативні документи, світовий і вітчизняний досвід проектування дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах. Запропонований підхід базується на математичних розрахунках, експериментальних дослідженнях та результатах практичного застосування новітніх технологій у будівництві дорожніх покриттів на мостах.

Результати досліджень дозволяють сформулювати рекомендації щодо оптимізації розрахунків термонапружень дорожнього покриття, що сприятиме підвищенню довговічності асфальтобетонного покриття, зниженню витрат на його експлуатаційне утримування та забезпеченню високої тріщиностійкості.

Виклад основного матеріалу.

Проектування асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності на металевих автодорожніх мостах, являє собою суцільний процес розрахунку покриття на міцність та морозостійкість з техніко-економічним обґрунтуванням варіантів та необхідно дотримуватись вимог і правил будівельних норм та стандартів [8, 13 – 16]. Покриття підвищеної довговічності на металевих мостах складається з одного, двох шарів асфальтобетону міцно зчепленого з гідроізоляційним матеріалом та металевою плитою проїзної частини мосту [8, 13 – 16]. Даний покриття розраховують на тріщиностійкість від зміни температури річної добової.

Дорожній покриття на металевих автодорожніх мостах повинен забезпечувати необхідну рівність та шорсткість згідно з нормованими показниками, та протистояти накопиченню залишкових деформацій зсуву влітку й зберігати суцільність при розтягу від охолодження в річному і добовому періодах [13 – 16].

Для тривалого збереження шорсткості матеріал покриття повинен бути стійким до стирання. Розрахунок термонапружень в асфальтобетонному покритті на металевій плиті автодорожніх мостів приймається за двома розрахунковими схемами (рис. 1, рис. 2):

$T_{аб}$ та $T_{орт.пл.}$ — середні температури асфальтобетонного покриття та металевої плити,

$h_{аб}$ — товщина шару асфальтобетонного покриття,

$R_{аб}(t, T)$ — функція релаксації асфальтобетонного покриття,

$E_{орт.пл.}$ — модуль пружності металевої плити,

$\alpha_{аб}$ — коефіцієнт лінійного температурного розширення асфальтобетонного покриття,

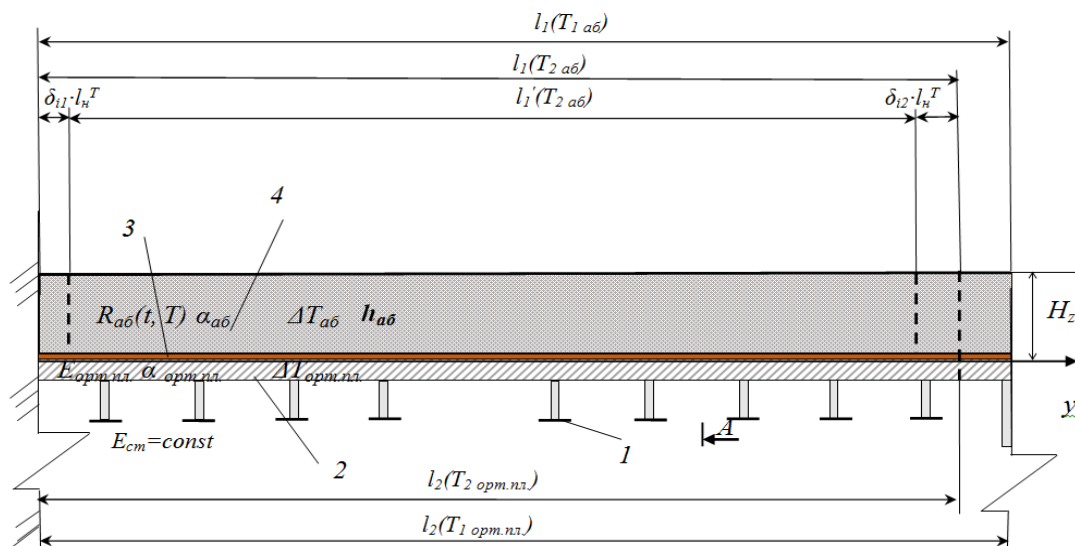
$\alpha_{орт.пл.}$ — коефіцієнт лінійного температурного розширення металевої плити,

$l_1(T_{1аб}), l_2(T_{1орт.пл.})$ — довжина відповідно асфальтобетонного покриття та металевої плити до початку температурного скорочення,

$(l_1(T_{1аб})=l_2(T_{1орт.пл.})), l_1(T_{2аб}), l_2(T_{2орт.пл.})$ — довжина відповідно асфальтобетонного покриття та металевої плити, після температурного скорочення

$(l_1(T_{2аб})=l_2(T_{2орт.пл.})), l_1'(T_{2аб})$ — довжина асфальтобетонного покриття, яка була б при вільному температурному скороченні,

$\delta_{i1} \cdot l_n^T, \delta_{i2} \cdot l_n^T$ — довжина на яку скорочується асфальтобетонне покриття, де $\delta_{i1} + \delta_{i2} = l$.



- 1 — металева конструкція металевих мостів;
 2 — ортотропна плита;
 3 — гідроізоляційний матеріал;
 4 — покриття (шар товщиною від 40 до 120 мм).

Рисунок 1 — Розрахункова схема роботи одношарового асфальтобетонного покриття на металевих мостах, з урахуванням спільного впливу зміни температури

На температурну тріщиностійкість двошарового покриття (**рис. 2**) впливають:

$T_{a\delta i=1}$, $T_{a\delta i=2}$ — середні температури верхнього та нижнього асфальтобетонних шарів покриття;

$h_{a\delta i=1}$ та $h_{a\delta i=2}$ — товщина верхнього та нижнього шарів покриття відповідно;

$R_{a\delta i=1}(t, T)$ та $R_{a\delta i=2}(t, T)$ — функція релаксації відповідно верхнього та нижнього шарів асфальтобетону;

$\alpha_{a\delta i=1}$ та $\alpha_{a\delta i=2}$ — коефіцієнти лінійного температурного розширення відповідно верхнього та нижнього шарів. Температурні напруження в асфальтобетонному покритті визначають з урахуванням його температурного режиму. У загальному випадку температурний режим асфальтобетонного покриття обчислюються за формулою полігармонійного закону:

$$\bar{T}(t) = T_{cp} + \sum \bar{A}_i(h) \cos \omega_i t, \quad (1)$$

де T_{cp} — середня температура покриття, °C;

$\bar{A}_i(h)$ — середня по товщині амплітуда коливань температури покриття;

ω — кругова частота;

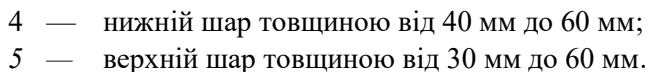
t — період часу, с.

На температурне розтріскування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах суттєво впливає дві гармоніки (річна та добова):

$$\bar{T}(t) = T_{cp} + \bar{A}_p(h) \cdot \cos \omega_p t + \bar{A}_d(h) \cdot \cos \omega_d t, \quad (2)$$

де $\bar{A}_p(h)$ — середня по товщині амплітуда коливань температури дорожнього покриття в річному циклі;

$\bar{A}_d(h)$ — середня по товщині амплітуда коливань температури дорожнього покриття в добовому циклі.



Такий бігармонійний характер зміни температури покриття викликає циклічну зміну температурних напружень в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Асфальтобетон проявляє явно виражені термо-в'язко-пружні властивості. Для їх визначення застосовуються основні положення теорії термов'язкопружності у вигляді лінійного рівняння Больцмана-Вольтерра:

де $R(t-\tau)$ — функція релаксації асфальтобетону;
 τ — час, який передує моменту спостереження.

Проектування асфальтобетонного покриття на термонапруженість виконують при мінімальній температурі, яка виникає протягом доби в найхолодніший період року. Необхідно оцінити міцність на розтяг при згині, яка залежить від зміни температур, та температурні напруження (3), які змінюються впродовж доби залежно від температури, швидкості охолодження і товщини покриття (h). Ця схема показана на (рис. 3) і дозволяє визначити критичну температуру тріщиноутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах.

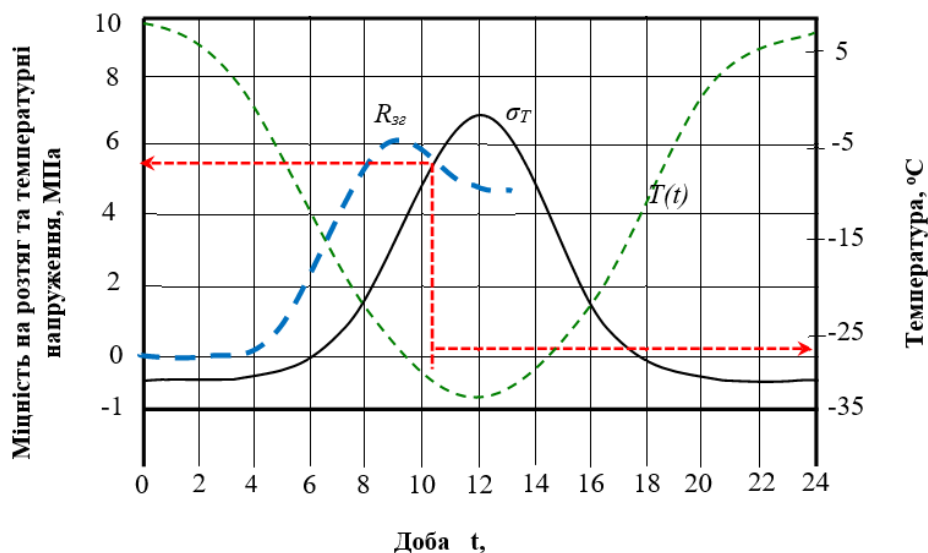


Рисунок 3 — Зміна температурних напружень та розрахункової температури на протязі доби

Строк служби дорожнього асфальтобетонного покриття на температурну тріщиностійкість оцінюють за граничним станом згідно кінетичної теорії міцності твердих тіл. Розрахунок базується на отриманні аналітичних залежностей, що дозволяють прогнозувати температурних напруження від спільної дії річних та добових температур. Розрахунок покриття виконують за двома критеріями граничного стану:

— міцність температурної тріщиностійкості асфальтобетонного покриття $\frac{R_{32}}{\sigma_T^0(t)}$, яку визначають як відношення зміни міцності на розтяг при згині R_{32} в залежності від зниження температури до його температурних напружень $\sigma_T(t)$;

— строк служби ($T_{роз}$) покриття, який визначається як співвідношення гранично допустимого значення показника міри пошкодженості $C_{тр}$ до міри пошкодженості від температурних напружень при коливанні температури (M_T), що в свою чергу більше або рівне нормативному строку служби дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах (T_H). Граничний стан визначається температурними напруженнями від спільної дії річних та добових температур. Дорожній покриття на металевій ортотропній плиті автодорожніх мостів вважається температурно тріщиностійке, якщо коефіцієнт температурної міцності за критерієм більший чи дорівнює граничному значенню $K_{мц}^T$ для заданого рівня надійності покриття, що проектується. Конструкції дорожнього покриття потрібно вибирати на основі економічних порівнянь декількох варіантів конструкцій, що відповідають умові температурної тріщиностійкості, при цьому може виявитися, що коефіцієнт міцності за будь-яким із критеріїв значно перевищує $K_{мц}^T$ [8, 13-16].

Оцінку довговічності дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах з позиції термопружності перевіряють за умовою $T_{роз} > T_H$. Якщо результати розрахунку задовольняють умові, то можна вважати, що дорожній покриття відповідає критерію граничного стану за строком служби з позиції термопружності.

Якщо умови не виконуються $K_{мц}^T > \frac{R_{32}}{\sigma_T^0(t)}$ та $T_{роз} < T_H$, то потрібно застосувати один або кілька

наступних заходів:

— збільшити товщину дорожнього покриття;

— призначити інший вид асфальтобетону (доцільно використовувати асфальтобетон литий «Гусасфальт»; епоксифасфальт; литий асфальтобетон; литий асфальтобетон з відкритою пористістю поверхні, із застосуванням бітуму, модифікованого полімерами; дисперсно-армовані асфальтобетони тощо);

— розрахунки проводять до тих пір, поки не буде виконуватися нерівність $K_{мц}^T < \frac{R_{32}}{\sigma_T(t)}$

та $T_{роз} > T_H$.

Основним завданням розрахунку є визначення товщини шарів покриття для вибору варіантів конструкцій, які прийняті при розрахунку або вибір матеріалів з відповідними деформаційними та міцністними характеристиками при заданих товщинах шарів. Рекомендовані конструкції покриття наведені в АД 2.4-37641918-003 [16]. міцність зчеплення при зсуві між асфальтобетонним покритвом з гідроізоляційним матеріалом та металевою плитою проїзної частини мосту перевіряють за методикою [13]. Кліматичні дані — географічні межі дорожньо-кліматичних зон України і дорожнє районування України за умовами роботи асфальтобетону визначають згідно з [8, 13 – 16]. Середньомісячні, середні максимальні і мінімальні місячні температури повітря призначають згідно з [8, 13 – 16]. Особливості конструювання дорожнього асфальтобетонного покриття на металевих ортотропних плитах автодорожніх мостів наведено в [13].

Розрахунок термодружності дорожнього покриття на металевих ортотропній плиті автодорожніх мостах від зміни річної та добової температури

Суть розрахунку полягає у визначенні граничної температури, що призводить до утворення тріщин в дорожньому покритті на металевих автодорожніх мостах відповідно до (рис. 3). При проектуванні дорожнього асфальтобетонного покриття в залежності від категорії дороги розрахункові значення коефіцієнту надійності та коефіцієнту запасу міцності за критерієм температурної тріщиностійкості покриття повинні відповідати вимогам (табл. 1). Розрахункові значення міцністних характеристик (міцність на розтяг при згині) конструктивних шарів визначають через нормативні значення цих характеристик, використовуючи залежність:

$$M_p = \overline{M_p} \cdot (1 - \nu_t \cdot t), \quad (4)$$

де M_p — розрахункове значення міцнісної характеристики;

$\overline{M_p}$ — нормативне значення даної характеристики;

t — коефіцієнт нормованого відхилення M_p при допустимому рівні надійності згідно з (табл. 1);

ν_t — коефіцієнт варіативного відхилення.

Таблиця 1

Розрахункові значення коефіцієнту надійності та коефіцієнту запасу міцності за критерієм термодружності дорожнього покриття

Категорія дороги	Тип дорожнього одягу	Коефіцієнт надійності, K_n	Коефіцієнт запасу міцності, $K_{мц}$, за критерієм граничного стану міцність при згині асфальтобетону	Коефіцієнт варіативного відхилення, t
I-a	Капітальний	0,97	1,45	2,19
I-б - II	Капітальний	0,95	1,35	1,71
III - V	Капітальний	0,90	1,30	1,32

Розрахункові значення міцності на розтяг при згині в залежності від температури наведено в (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристики асфальтобетонів при розрахунку на розтяг при згині

Вид асфальтобетону	Марка бітуму	Нормативні значення при згині R_T^i , МПа, за температури T , °С						
		10	0	-5	-10	-15	-25	-35
АЛГ-10	БМПА 40/60-57	4,23	6,16	6,68	7,20	7,56	6,99	6,85
	БМПА 60/90-53	3,68	5,63	5,93	6,80	7,14	6,60	6,47
АЛГ-15	БМПА 40/60-57	3,93	5,96	6,45	6,93	7,28	6,73	6,60
	БМПА 60/90-53	3,44	5,01	5,76	6,67	7,00	6,48	6,35
РМА-10	БМПА 40/60-57	5,54	8,66	10,18	11,03	11,58	10,71	10,50
	БМПА 60/90-53	5,10	8,22	9,68	10,17	10,68	9,87	9,81
РМА-15	БМПА 40/60-57	5,33	8,39	9,86	10,45	10,97	10,15	9,95
	БМПА 60/90-53	4,88	8,01	9,27	9,45	9,92	9,35	9,37
РМА-20	БМПА 40/60-57	4,75	8,13	9,38	9,68	10,16	9,51	9,46
	БМПА 60/90-53	4,15	7,48	9,02	9,23	9,69	9,16	9,08
ЕПА-10		6,15	8,10	10,05	11,57	12,09	12,7	13,95

Примітка. Нормативні значення для епоксiasфальту при згині R_t , МПа, за температури T , °С встановлювались на основі даних [13].

Визначення мінімальної температури асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах даного регіону згідно з ДБН В.2.3-4 розраховується за залежністю «Superpave» [13] :

$$T_n^{\min} = 0,859 \cdot T_{\min} + 1,7, \quad (5)$$

де $T_n^{\min}$ — мінімальна добова температура асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту, °С;

$T_{\min}$ — середня мінімальна температура повітря в році установлена на основі метеорологічних даних і приймається згідно з діючими нормативами документами, °С.

Визначається значення міцності на розтяг при згині R_T^i , що відповідає температурі $T_n^{\min}$ (табл. 2).

Міцність асфальтобетону на розтяг при згині при конкретній температурі визначають за формулою:

$$R_{ze} = R_T^i \cdot k_{mp} \cdot k_T (1 - \nu_R \cdot t), \quad (6)$$

де R_T^i — нормативне значення міцності на розтяг при згині при розрахунковій температурі, МПа, приймають за даними (табл. 2);

k_{mp} — коефіцієнт, який враховує температурну тріщиностійкість матеріалу згідно з (табл. 3);

k_T — коефіцієнт, який враховує зниження міцності матеріалу покриття в результаті температурно-усадкових впливів ($k_T = 0,90$);

ν_R — коефіцієнт варіативного відхилення міцності на розтяг при згині, приймають згідно з (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахункові значення коефіцієнта варіації міцності на розтяг при згині і коефіцієнта, який враховує температурну тріщиностійкість матеріалу

Вид асфальтобетону	Коефіцієнт варіативного відхилення, ν_R	Коефіцієнт температурної тріщиностійкості, k_{mp}
АЛГ-10	0,10	0,90
АЛГ-15	0,13	0,95

Вид асфальтобетону	Коефіцієнт варіативного відхилення, V_R	Коефіцієнт температурної тріщиностійкості, k_{mp}
PMA-10	0,10	0,85
PMA-15	0,10	0,89
PMA-20	0,11	0,92
ЕПА-10	0,10	0,88

Якщо дорожній покриття складається з двох шарів асфальтобетону (рис. 2), що відрізняються за крупністю щебеню, міцність на розтяг R_T^i при згині покриття за розрахункової температури визначають як середнє арифметичне значення міцності на розтяг при згині верхнього та нижнього шару (табл. 2). У дорожньому покритті на металевих автодорожніх мостах термонапруження, що виникають при охолодженні покриття, не повинні викликати пошкодження структури матеріалу й призводити до утворення тріщин, тобто повинна бути забезпечена умова:

$$K_{mc}^T \leq \frac{R_{32}}{\sigma_T^\partial(t)}, \quad (7)$$

де K_{mc}^T — необхідний коефіцієнт запасу міцності з урахуванням нормативного коефіцієнта надійності, (табл. 1);

R_{32} — розрахункова міцність матеріалу шару на розтяг при згині, МПа, визначають за формулою (6);

$\sigma_T^\partial(t)$ — найбільше розтягуюче температурне напруження в асфальтобетонному шарі при зміні температури впродовж доби самого холодного місяця та часу дії навантаження s МПа, обчислюють формулою (8, 9).

Розрахункові розтягуючі термонапруження визначають, за формулою:

— у випадку, коли дорожній покриття складається з одного шару:

$$\sigma_T^\partial(t) = (\alpha_{ab} \cdot k_{ab}^\partial - \alpha_{opt.nl} \cdot k_{opt.nl}^\partial) \cdot R_{ab}(t) \cdot k_{II}, \quad (8)$$

— у випадку, коли дорожній покриття складається з двох шарів:

$$\sigma_T^\partial(t) = \left(\frac{\alpha_{ab1} + \alpha_{ab2}}{2} \cdot k_{ab}^\partial - \alpha_{opt.nl} \cdot k_{opt.nl}^\partial \right) \cdot \overline{R_{ab}}(t) \cdot k_{II}, \quad (9)$$

де $\alpha_{ab}, \alpha_{ab1}, \alpha_{ab2}, \alpha_{opt.nl}$ — коефіцієнти лінійного температурного розширення одношарового дорожнього покриття, верхнього і нижнього шару та металевої плити (табл. 4);

$k_{ab}^\partial, k_{opt.nl}^\partial$ — коефіцієнт добової швидкості охолодження дорожнього покриття та металевої плити, град, С/год;

$R_{ab}(t)$ — функція релаксації асфальтобетону залежить від часу дії навантаження і температури, МПа обчислюється за формулою (10);

$\overline{R_{ab}}(t)$ — середньо-інтегральне значення функції релаксації, визначають за формулою (11);

k_{II} — коефіцієнт, який враховує зміну температурних напружень залежно від товщини покриття, обчислюють за формулою (12).

Таблиця 4

Значення температурного коефіцієнту лінійного розширення ($\alpha_t \cdot 10^{-5}$)
для асфальтобетону

Тип	Коефіцієнт лінійного розширення ($\alpha_t \cdot 10^{-5}$) в інтервалі температур, $^{\circ}\text{C}^{-1}$				
	+20	+10	0	-10	-20 (-30)
АЛГ-10	3,46	3,54	3,59	3,68	3,43
АЛГ-15	3,26	3,34	3,38	3,47	3,24
РМА-10	3,21	3,28	3,33	3,41	3,18
РМА-15	3,09	3,13	3,16	3,25	3,04
РМА-20	3,03	3,10	3,14	3,22	3,00
ЕПА-10	3,69	3,77	3,82	3,92	3,66

$$R_{a\bar{o}}(t) = E_{\bar{o}_z} + (E_{mm} - E_{\bar{o}_z}) \cdot \left(1 + \frac{p \cdot k_{a\bar{o}}^{\bar{o}}}{\eta} \left(e^{-p \cdot k_{a\bar{o}}^{\bar{o}} (t_{\bar{o}} - \tau)} - 1 \right) \right)^{-\lambda}, \quad (10)$$

де $E_{\bar{o}_z}, E_{mm}$ — відповідно довготривалий і миттєвий модуль пружності асфальтобетонного покритву, МПа, приймають за додатком Б;
 λ, η, p — постійні, що приймають за додатком Б;
 T_0, Q — температура відповідно поточна та приведена, згідно таблиці Б.1 додатку Б;
 $t_{\bar{o}}$ — час, рівний 24 год;
 τ — приведений час.

$$\overline{R_{a\bar{o}}}(t) = \left(\sum_{i=1}^n R_{a\bar{o}i}(t) \cdot h_{a\bar{o}i} \right) \div \sum_{i=1}^n h_{a\bar{o}i}, \quad (11)$$

де $R_{a\bar{o}i}(t)$ — функція релаксації i -го шару дорожнього покритву;
 n — кількість шарів асфальтобетону;
 $h_{a\bar{o}i}$ — товщина i -го шару дорожнього покритву ($i = 2$).

$$k_{II} = 8,3 \cdot e^{-0,02 \cdot H}, \quad (12)$$

де H — товщина дорожнього покритву, мм.

Розрахунок строку служби дорожнього асфальтобетонного покритву на металевих автодорожніх мостах

Розрахунок проводять на строк служби не менший ніж строк експлуатації дорожнього покритву на металевих ортотропній плиті автодорожніх мостів з позиції термопружності між капітальними ремонтами згідно з [8, 13]. При розрахунку необхідно забезпечити виконання умови термопружності дорожнього асфальтобетонного покритву на автодорожніх мостах за показником пошкодженості:

$$M_T \leq C_{TP}, \quad (13)$$

де C_{TP} — гранично допустиме значення міри пошкодженості асфальтобетонного покритву, приймають рівним 1,0 [13];

M_T — міра пошкодженості від температурних напружень при коливанні температури (M_T).

Якщо виконана умова (13), проводять перевірку на відповідність розрахункового строку служби дорожнього покриття, що визначений за критерієм термопружності, нормативному строку служби:

$$T_{роз} > T_H, \quad (14)$$

де $T_{роз}$ — розрахунковий строк служби асфальтобетонного покриття, роки визначають за формулою (14);

T_H — нормативний строк служби асфальтобетонного покриття на металевих автодорожніх мостах, становить 15 років згідно з ДБН В.2.3-22 [8, 13].

$$T_{роз} = \frac{C_{TP}}{M_T} \cdot T_{ут}, \quad (15)$$

де $T_{ут}$ — уточнюючий строк служби асфальтобетонного покриття, для розрахунків приймають один рік.

Визначають міру пошкодженості від температурних напружень за коливання температури:

$$M_T = \int_0^{t_{ca}} \frac{(\sigma_T^p(t) + \sigma_T^d(t))^{-b(T)}}{B(T)} dt, \quad (16)$$

де B, b — параметри функції довговічності, наведені в табл. 5.

Визначають розрахункові розтягуючі температурні напруження протягом року за формулою:

$$\sigma_T^p(t) = (\alpha_{аб} \cdot k_{аб}^p - \alpha_{орт.пл} \cdot k_{орт.пл}^p) \cdot [E_{дз} + (E_{мт} - E_{дз})] \cdot \int_0^{t_p} \left(1 + \frac{1}{p \cdot k_{аб}^p \cdot \eta} \cdot e^{p(T_0 - Q + k_{аб}^p \cdot t_p)} - \frac{1}{p \cdot k_{аб}^p \cdot \eta} \cdot e^{p(T_0 - Q + k_{аб}^p \cdot \tau)}\right) \cdot k_{II} dt, \quad (17)$$

де $k_{аб}^p, k_{орт.пл}^p$ — коефіцієнт річної швидкості охолодження дорожнього покриття та металевої ортотропної плити, град, с/год;

Таблиця 5

Значення параметрів функції довговічності асфальтобетонів

Вид асфальтобетону	Марка бітуму	Нормативні значення параметрів функції довговічності, отриманих при температурі 0, °C	
		b	B
АЛГ-10	БМПА 40/60-57	7,15	12,91
	БМПА 60/90-53	6,71	11,89
АЛГ-15	БМПА 40/60-57	7,43	13,49
	БМПА 60/90-53	6,97	12,37
РМА-10	БМПА 40/60-57	6,91	11,07
	БМПА 60/90-53	6,40	10,08
РМА-15	БМПА 40/60-57	6,82	10,89
	БМПА 60/90-53	6,35	10,03
РМА-20	БМПА 40/60-57	6,65	10,70
	БМПА 60/90-53	6,25	9,92
ЕПА-10	БМПА 60/90-53	7,31	13,15

Для розрахунку термонапружень визначають параметри температурного режиму асфальтобетонного покриття наступним чином. Амплітуду річних коливань описують за формулою:

$$A_{np} = 0,5(T_{n,\max} + T_{n,\min}), \quad (18)$$

де $T_{n,\max}, T_{n,\min}$ — середньомісячна температура поверхні дорожнього покриття відповідно самого теплого і самого холодного місяців.

Швидкість охолодження визначають за залежностями:

— при добових коливаннях температури:

$$k_o = \frac{4A_o}{t_o}, \quad (19)$$

де t_o — період добових коливань температури ($t_o = 24$ год).

— при річних коливаннях температури:

$$k_p = \frac{4A_p}{t_p}, \quad (20)$$

де t_p — період річних коливань температури ($t_p = 8\,760$ год).

Середню температуру дорожнього покриття визначають за емпіричною залежністю:

$$T_c = -0,56\varphi + 41,91, \quad (21)$$

де φ — географічна широта місцевості.

Амплітуду добових коливань визначають за емпіричною залежністю:

$$A_o(z=0) = -0,47\varphi + 32,43, \quad (22)$$

де φ — географічна широта місцевості.

У випадку не виконання умови (13), необхідно замінити матеріал покриття і знову виконати розрахунок у наведеній послідовності.

Приклад розрахунку термопружності дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах наведено в методиці [13].

Висновки

Запропонована методика дозволяє розраховувати дорожнього покриття на металевих отротропних плитах автодорожніх мостів України з урахуванням кліматичних умов підвищеної довговічності з позиції термопружності.

Вона базується на сучасних дослідженнях, ураховує матеріалознавчі та конструктивні особливості дорожнього асфальтобетонного покриття, експлуатаційні умови і передовий світовий досвід, що дозволяє підвищити ефективність проектних рішень. Застосування цієї методики сприятиме покращенню експлуатаційних характеристик конструкцій дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах, підвищенню їхньої тріщиностійкості, стійкості до навантажень та довговічності. Це, у свою чергу, дасть змогу зменшити ризик передчасного утворення тріщин, скоротити витрати на ремонткування та експлуатаційне утримування дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах, а також забезпечити більш раціональне використання матеріально-технічних ресурсів у сфері дорожнього будівництва.

Впровадження методики розрахунку термонапружень конструкції дорожнього одягу мостового полотна сприятиме підвищенню його якості та довговічності на металевих автодорожніх мостах автомобільних доріг в Україні, що відповідає сучасним вимогам розвитку дорожньої інфраструктури та міжнародним стандартам.

Таким чином, впровадження вдосконаленого методу розрахунку термопружності дорожнього покриття на металевих автодорожніх мостах, використання новітніх матеріалів і технологій дозволить підвищити ефективність проектування, будівництва та експлуатаційного утримування дорожнього покриття на мостах а і суттєво покращити його довговічність.

Список літератури

1. Богомолів В. О., Жданюк В. К., Разніцин І. Л., Богомолів С. В., Цинка А. О. Критерій довговічності асфальтобетонних шарів дорожніх одягів, *Вісник ХНАДУ*. 2017. Вип. 76. С. 74–79. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2017_76_14.
2. Гуляєв В. І., Шлюнь Н. В. Математичне моделювання внутрішньоструктурних термонапружень, що викликаються полями змінної температури в композитах зі стрижневою арматурою. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.068>.
3. Гайдайчук В. В., Мозговий В. В., Густелєв О. О., Шевчук Л. В. Аналіз деформування дорожнього покриття на металевій плиті південного моста. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2019. № 1. С. 31–39.
4. Густелєв О. О., Гуляєв В. І., Гайдачук В. В., Мозговий В. В., Заєць Ю. О., Шевчук Л. В., Шлюнь Н. В. Термопружний стан багатошарових дорожніх покриттів. Монографія/ Київ, 2018. 252 с.
5. Джигіт С. Г., Родін Ю. Л., Гнатюк Е. М., Кузьміна Н. А. Застосування нових технологій і матеріалів з метою забезпечення довговічності мостових споруд. *Автошляховик України*. № 3, Київ. 2000. С. 76–77.
6. Коваль П. М. Характеристика технічного стану існуючих мостів України. *Дороги і мости*. Вип. 1. Київ, 2003. С. 15–22.
7. Батракова А. Г., Урзик С. М. Методи оцінювання впливу тріщин на показники міцності та деформативності дорожнього одягу нежорсткого типу. *Науковий вісник будівництва*. № 1(103). Харків, 2021. С. 213–221.
8. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ. 2009, 52 с. (Інформація та документація).
9. Mozgoviy V., Onishchenko A., Nevinglovsky V. Investigation of Modified with a Polumer Latex Butonal NS 104 the Bitumen Preparation Parameters Influence on the Paving Bitumen Properties. *Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies*. 2010. P. 1–9.
10. Онищенко А.М. Теоретичні та практичні методи оцінювання надійності і довговічності транспортних споруд: монографія, Київ, 2024, 164 с. (ISBN 978-617-555-233-9)
11. A. M. Onyshchenko, I. O. Mirchuk. Ensuring increased durability of pavement on reinforced concrete road bridges. *World Science* 2024. 1(83). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8126
12. Онищенко А. М. Метод розрахунку міцності зчеплення асфальтобетонного покриття з проїзною частиною мосту при зсуві від дії екстреного гальмування транспортного засобу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2016. С. 12–19.
13. М 42.1-37641918-767:2017 Методика розрахунку асфальтобетонного покриття металевих автодорожніх мостів на довговічність. Київ, 2017, 34 С. (Інформація та документація).
14. М 02071168-708:2012 Методика розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі з урахуванням термопластичних властивостей асфальтобетону. Київ, 2012. 65 с. (Інформація та документація).
15. М 02070915-750:2016 Методика проектування асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів. Київ, 2016. 23 С. (Інформація та документація).
16. А Д 2.4-37641918-003:2015 Альбом типових конструкцій дорожнього одягу мостового полотна. Київ, 2015. 45 с. (Інформація та документація).
17. Довідник № 2 розрахункових характеристик асфальтобетонів. Київ. 2018 43 с. (Інформація та документація).
18. Marchuk A. V., Onyshchenko A. M., Plazii I. P. (2021) Stability analysis of functionally graded plates based on the three-dimensional theory of elasticity. *Composites Part C: Open Access*. 2021. Issue 6. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100200>.
19. Onyshchenko, A., Gibalenko, O., Klymenko, N., Plazii, I., Semko, O. Evaluation Criteria the Corrosion Protection of Structures by Actual Condition. *Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 299. Springer, Cham. 2022. P. 243–252. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_20.

References

1. Bohomolov V. O., Zhdaniuk V. K., Raznitsyn I. L., Bohomolov S. V., Tsynka A. O. Kryterii dovhovichnosti asfaltobetonnykh shariv dorozhnikh odiahiv (Durability criterion of asphalt concrete layers of road surfaces), *Visnyk KhNADU*. 2017. Issue 76. P. 74–79. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2017_76_14 [in Ukrainian].
2. Huliaiev V. I., Shliun N. V. Matematychnе modeliuвання vnutrishnostrukturnykh termonapruzhen, shcho vyklykaiutsia poliamy zminnoi temperatury v kompozytakh zi stryzhnevoiі armaturoiu (Mathematical modeling of intrastructural thermal stresses caused by variable temperature fields in composites with rod reinforcement). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2023. Issue 28. P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.068> [in Ukrainian].
3. Haidaichuk V. V., Mozghovyi V. V., Hustieliev O. O., Shevchuk L. V. Analiz deformuvannia dorozhnogo pokryttia na metalevii plyti pivdennoho mosta. Promyslove budivnytstvo ta inzhenerni sporudy (Analysis of deformation of the road surface on the metal slab of the southern bridge). 2019. No. 1. P. 31–39 [in Ukrainian].
4. Hustieliev O. O., Huliaiev V. I., Haidachuk V. V., Mozghovyi V. V., Zaiets Yu. O., Shevchuk L. V., Shliun N. V. Termopruznyiі stan bahatosharovykh dorozhnikh pokryttiv (Thermoelastic state of multilayer road surfaces). Monohrafiia Kyiv, 2018. 252 p. [in Ukrainian].
5. Dzhyhit S. H. Rodin Yu. L., Hnatiuk E. M., Kuzmina N. A. Zastosuvannia novykh tekhnolohii i materialiv z metoiu zabezpechennia dovhovichnosti mostovykh sporud (Application of new technologies and materials to ensure the durability of bridge structures). *Avtoshliakhovyk Ukrainy*. No. 3, Kyiv. 2000. P. 76–77 [in Ukrainian].
6. Koval P. M. Kharakterystyka tekhnichnoho stanu isnuuiuchykh mostiv Ukrainy (Characteristics of the technical condition of existing bridges of Ukraine). *Dorohy i mosty*. Issue 1. Kyiv, 2003. P. 15–22 [in Ukrainian].
7. Batrakova A. H., Urzyk S. M. Metody otsiniuvannia vplyvu trishchyn na pokaznyky mitsnosti ta deformatyvnosti dorozhnogo odiahu nezhorstkoho typu (Methods for assessing the impact of cracks on the strength and deformability of non-rigid road surfaces). *Naukovyi visnyk budivnytstva*. No. 1(103). Kharkiv 2021. P. 213–221 [in Ukrainian].
8. DBN V.2.3-22:2009 Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (DBN V.2.3-22:2009 Bridges and pipes. Basic design requirements). Kyiv. 2009. 52 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
9. Mozgoviy V., Onishchenko A., Nevinglovsky V. Investigation of Modified with a Polumer Latex Butonal NS 104 the Bitumen Preparation Parameters Influence on the Paving Bitumen Properties/ Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies. 2010. P. 1–9 [in English].
10. Onyshchenko A. M. Teoretychni ta praktychni metody otsiniuvannia nadiinosti i dovhovichnosti transportnykh sporud: monohrafiia (Theoretical and practical methods for assessing the reliability and durability of transport structures: monograph), Kyiv. 2024. 164 p. (ISBN 978-617-555-233-9) [in Ukrainian].
11. A. M. Onyshchenko, I. O. Mirchuk. Ensuring increased durability of pavement on reinforced concrete road bridges (Ensuring increased durability of pavement on reinforced concrete road bridges). *World Science* 2024. 1(83). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8126 [in English].
12. Onyshchenko A. M. Metod rozrakhunku mitsnosti zcheplennia asfaltobetonnoho pokryttia z proiznoiі chastynoiі mostu pry zsuvi vid dii ekstrenoho halmuvannia transportnoho zasobu (Method for calculating the adhesion strength of asphalt concrete pavement to the roadway of a bridge during displacement from the action of emergency braking of a vehicle). *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. Vinnytsia, 2016. P. 12–19 [in Ukrainian].
13. M 42.1-37641918-767:2017 Metodyka rozrakhunku asfaltobetonnoho pokryttia metalevykh avtodorozhnikh mostiv na dovhovichnist (M 42.1-37641918-767:2017 Method for calculating asphalt concrete pavement of metal road bridges for durability). Kyiv. 2017. 34 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
14. M 02071168-708:2012 Metodyka rozrakhunku tonkykh asfaltobetonnykh shariv na zhorstkii osnovi z urakhuvanniam termoplastychnykh vlastyvostei asfaltobetonu (M 02071168-708:2012 Method for calculating thin asphalt concrete layers on a rigid base taking into account the thermoplastic properties of asphalt concrete). Kyiv. 2012. 65 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

15. M 02070915-750:2016 Metodyka proektuvannia asfaltobetonnoho pokryttia zalizobetonnykh avtodorozhnykh mostiv (M 02070915-750:2016 Methodology for designing asphalt concrete pavement of reinforced concrete road bridges). Kyiv, 2016. 23 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
 16. A D 2.4-37641918-003:2015 Albom typovykh konstrukttsii dorozhnoho odiahu mostovoho polotna (A D 2.4-37641918-003:2015 Album of typical designs of road surface of bridge deck). Kyiv, 2015. 45 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
 17. Dovidnyk No. 2 rozrakhunkovykh kharakterystyk asfaltobetoniv (Handbook No. 2 of calculated characteristics of asphalt concretes). Kyiv. 2018 43 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
 18. Marchuk A. V., Onyshchenko A. M., Plazii I. P. (2021) Stability analysis of functionally graded plates based on the three-dimensional theory of elasticity. *Composites Part C: Open Access*. 2021. Issue 6. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100200> [in English].
 19. Onyshchenko, A., Gibalenko, O., Klymenko, N., Plazii, I., Semko, O. (2022) Evaluation Criteria the Corrosion Protection of Structures by Actual Condition. Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Issue 299. Springer, Cham. P. 243–252. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_20 [in English].
-

Roman Lisnevskiy¹, <https://orcid.org/0000-0003-1128-913X>

Artur Onyshchenko², D.Sc., Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>

¹Municipal Enterprise «Directorate for the Construction of Road and Transport Facilities of Kyiv», Ukraine

²National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

METHODOLOGY FOR CALCULATING THERMAL STRESSES IN THE ROAD SURFACE ON THE METAL SLAB OF HIGHWAY BRIDGES

Abstract

Introduction. The article presents a methodology for calculating thermal stresses in asphalt concrete road pavement on metal orthotropic highway bridges for durability. This methodology takes into account materials science and design approaches, which allows designing road pavement on metal highway bridges with increased crack resistance to the effects of annual and daily temperatures.

Issues. Highway bridges are an important component of the transport network not only of cities, but also of the entire state. Every year, thousands of new vehicles appear in Ukraine, which leads to a change in the composition of traffic flows, an increase in load capacity and speed. In most European countries, restrictions have been introduced on the movement of heavy vehicles on the bridge deck design in order to ensure a longer service life of the pavement and structural elements of bridges, because the road pavement on metal highway bridges operates in more adverse conditions and, accordingly, higher requirements are imposed on it than on non-rigid road surfaces of highways. The road surface on metal road bridges must be resistant to cracking from temperature fluctuations. In connection with the listed conditions, there is an urgent need to develop an improved calculation method that would meet modern road construction requirements, contribute to increasing the durability of the road surface on metal road bridges, and ensure the rational use of economic resources.

Purpose of the work. The modern development of road construction requires constant improvement of approaches to the design and calculation of road surfaces on metal road bridges, in particular, to determine more optimal rational design solutions for the bridge deck. Taking into account the latest research, modern materials and innovative technologies allows to increase the durability of asphalt concrete road surface on metal road bridges, reduce the risk of thermal cracks and optimize the costs of their repair and operational maintenance.

The purpose of the work is to inform road specialists about the latest trends, methods and developments in the field of designing asphalt concrete road surface on metal slabs of road bridges. The proposed methodology is aimed at increasing the efficiency of design solutions, adapting existing methods to modern operating conditions and ensuring economically justified use of material and technical resources.

Materials and methods. The study used a comprehensive approach based on the analysis of scientific and technical developments in the field of asphalt concrete road pavement design on metal road bridges, as well as practical experience in its arrangement. In particular, the results of research conducted by the National Transport University and Kharkiv Automobile and Road University, which are based on many years of experience in providing services in the field of road construction, were taken into account.

The methodological basis of the work is the analysis of current construction codes and national standards of Ukraine, as well as their comparison with relevant foreign regulatory documents and technical literature. To ensure the comprehensiveness of the study, domestic and international experience gained during the design and installation of asphalt concrete pavement on orthotropic highway bridges was taken into account.

Analytical and experimental methods were applied using the provisions of the theory of elasticity, the theory of viscoelasticity, the kinetic theory of the strength of solids, standardized and special methods for studying the properties of asphalt concrete. Analysis of the results allows us to substantiate improved approaches to the design and implementation of effective design solutions on the bridge deck of highway bridges.

Results. Within the framework of the study, this methodology was developed on the basis of scientific research, an analysis of technical literature and current regulatory documents on the use of asphalt concrete pavement on metal highway bridges. The methodology is based on experimentally established calculation parameters of waterproof materials, namely: mastic asphalt, goose asphalt, epoxy asphalt, cast asphalt, thermal resistance studies, as well as developed analytical dependencies for calculating the durability of asphalt concrete pavement from the position of temperature crack resistance.

Updated approaches to calculating the thermoelasticity of the road surface on a metal orthotropic slab of highway bridges are based on modern scientific research, international experience and practical data, which allows to increase the durability of the asphalt concrete pavement, reduce the risk of uncontrolled cracking and improve the operational characteristics of bridge deck structures.

Conclusions. The proposed method of thermal stresses in asphalt concrete road pavement on a metal orthotropic slab of highway bridges improves existing approaches to design the design of a bridge deck of increased durability is a continuous process of calculating the coating for strength and frost resistance with a feasibility study of options. It is based on modern research, takes into account the material science and design features of asphalt concrete road pavement, operating conditions and advanced world experience, which allows to increase the effectiveness of design solutions. The use of this method will contribute to improving the operational characteristics of road pavement structures on metal highway bridges, increasing their crack resistance, load resistance and durability. This, in turn, will reduce the risk of premature cracking, reduce the cost of repair and operational maintenance of the road pavement on metal highway bridges, and also ensure more rational use of material and technical resources in the field of road construction.

The introduction of a method for calculating thermal stresses in the design of a road bridge deck will contribute to improving the quality and durability of asphalt concrete pavement on metal highway bridges in Ukraine, which meets modern requirements for the development of road infrastructure and international standards.

Keywords: road surface, bridge deck design, metal orthotropic bridge slab, highway bridge, thermoelastic deformations, asphalt concrete, temperature, durability, thermo-viscoelastic properties.

УДК 624.21

Мінюкова А. Д.¹, <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>Сташук П. М.², канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>¹Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна²Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

РОЗРАХУНОК ЗУСИЛЬ І ПЕРЕМІЩЕНЬ ТИПОВИХ БАЛОК ПРОГОНОВИХ БУДОВ ПОСИЛЕНИХ ЗВИЧАЙНОЮ І ПОПЕРЕДНЬО-НАПРУЖЕНОЮ АРМАТУРОЮ

Анотація

Вступ. Багато мостових конструкцій по всьому світу були спроектовані відповідно до застарілих норм і сьогодні не відповідають вимогам сучасних транспортних навантажень. Це створює глобальну проблему безпеки, що робить розроблення ефективних рішень для їхнього посилення критично важливим завданням.

Проблематика. Переважна більшість мостового фонду, особливо в країнах, що розвиваються, була побудована в середині ХХ століття. Проектування цих споруд здійснювалося з урахуванням нормативних навантажень того часу, які були значно нижчими за сучасні. На сьогоднішній день, зростання інтенсивності руху, поява великогабаритного та великовагового транспорту призводить до перевантаження мостів. Це викликає передчасний фізичний знос конструкцій, появу тріщин, зниження їхньої несної здатності та, як наслідок, створює загрозу безпеці для всіх учасників дорожнього руху.

Мета. На основі розрахункового моделювання, кількісно оцінити та порівняти ефективність двох методів посилення: додатковою звичайною та попередньо-напруженою арматурою для типових залізобетонних балок мостових прогонових будов, що були спроектовані за старими нормами.

Результати. Аналіз проведеного розрахункового моделювання підтвердив, що існуючі конструкції мають значний дефіцит міцності: розрахунковий згинальний момент від сучасних навантажень (184 тс·м) перевищує несну здатність існуючих балок (141 тс·м). Було встановлено, що обидва методи посилення — звичайною та попередньо напруженою арматурою — ефективно підвищують несну здатність конструкцій, доводячи її до 193 тс·м та 215 тс·м відповідно. Використання зовнішнього попереднього напруження значно покращило експлуатаційні характеристики конструкції. Розрахунковий прогин від власної ваги зменшився з 21,3 мм до 3,2 мм, а стискальні напруження в бетоні усунули ризик появи тріщин.

Висновки. На основі проведеного розрахунку зусиль, переміщень і порівняльного аналізу, було встановлено, що існуючі залізобетонні балки прогонових будов, спроектовані за старими нормами, мають значний дефіцит несної здатності та не відповідають сучасним вимогам безпеки. Кількісний аналіз підтвердив, що посилення конструкцій додатковою арматурою є ефективним рішенням для підвищення їхньої міцності. Однак, порівняльний аналіз показав, що метод посилення зовнішньою попередньо напруженою арматурою не тільки забезпечує значний приріст несної здатності, але й значно підвищує жорсткість і тріщиностійкість конструкції, що суттєво подовжує її строк експлуатації та знижує майбутні витрати на обслуговування. Таким чином, результати дослідження є науковим та інженерним обґрунтуванням для вибору оптимального методу модернізації типових залізобетонних мостових конструкцій.

Ключові слова: автомобільна дорога, довговічність, залізобетонна конструкція, підсилення, попереднє напруження, міст, моделювання, напружено-деформований стан, несна здатність, реконструкція, транспортне навантаження.

Вступ

Мости відіграють ключову роль у транспортній інфраструктурі, однак із часом їх експлуатаційні характеристики погіршуються через втомні процеси, корозію арматури, збільшення інтенсивності руху та маси транспортних засобів.

Значна частина транспортної інфраструктури України, зокрема залізобетонних мостів, була побудована в 1960–1980-х роках минулого століття. Розрахунок цих споруд виконувався згідно з нормативними документами, що діяли на той час, зокрема, з урахуванням навантажень від рухомого складу класів Н-30 та НК-80. Однак, за останні десятиліття інтенсивність та вага транспортних потоків значно зросли. Сучасні нормативні документи вимагають проектування та експлуатації мостів з урахуванням вищих класів навантажень, таких як А15 та НК-100. Це призвело до виникнення критичної ситуації, коли існуючі конструкції не можуть повною мірою забезпечити безпечну експлуатацію під впливом сучасних навантажень. Також відбувається фізичне зношення, що обмежує термін служби. Бетонні конструкції поступово деградують внаслідок зносу матеріалів, надмірних навантажень та інших факторів навколишнього середовища, а їх початкові характеристики поступово погіршуються, що впливає на довговічність та безпеку конструкцій. Крім фізичного зносу, відбувається моральне відставання мостів від зростаючих вимог транспорту в зв'язку зі збільшенням нормативних розрахункових навантажень і швидкостей руху.

Таким чином, виникає актуальна проблема, яка полягає у визначенні фактичної несної здатності існуючих залізобетонних прогонових будов та розробці ефективних методів їх модернізації. Це дозволить підвищити клас навантаження на існуючі мости, подовжити їх термін служби та уникнути необхідності зведення нових, дороговартісних споруд.

Аналіз міжнародних наукових публікацій показує, що більшість досліджень зосереджено на основних напрямках посилення зовнішнім попереднім напруженням (External Prestressing). Цей метод широко вивчається, оскільки він ефективно підвищує несну здатність конструкції, зменшує прогини та запобігає утворенню тріщин. У публікаціях відзначається, що зовнішнє попереднє напруження є особливо ефективним для старих мостів, розрахованих на менші навантаження, оскільки воно дозволяє відновити деформаційні характеристики та збільшити стійкість до втоми. Наприклад в дослідженні, опублікованому в MDPI, *Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method*, проводиться експериментальний аналіз ефективності зовнішнього попереднього напруження на реальному мосту, що експлуатувався понад 45 років.

Основна частина

Основне завдання дослідження полягає у визначенні несної здатності типової балки Вип. 56 довжиною 16,76 м, розрахованої на навантаження Н-30 і НК-80, та розрахунку необхідного посилення для забезпечення прийняття навантажень А15 та НК-100.

До початку 2000-х років основним нормативним документом у галузі мостобудування в Україні був СНиП 2.05.03-84 [1]. Для автомобільних доріг загального користування найпоширенішим розрахунковим навантаженням був клас Н-30, який моделював проїзд автопоїзда масою 30 т. Цей клас був обраний, виходячи з параметрів транспортних засобів 1960–1980-х років, що забезпечувало достатній запас міцності для тогочасних транспортних потоків.

Однак, зі зростанням інтенсивності дорожнього руху та появою важких автопоїздів вантажопідйомністю понад 40 т, виникла необхідність перегляду розрахункових схем. У сучасних українських будівельних нормах впроваджено нові класи навантажень, зокрема:

А15 — автопоїзд масою 40 – 44 т і НК-80, НК-100 — розрахункові навантаження для надважких транспортних засобів [2]. Основні відмінності між Н-30 та новими класами полягають у збільшенні розрахункової повної маси, зміні схеми навантаження та зростанні інтенсивності смугового навантаження.

За даними розрахунків, перехід від Н-30 до А15 призводить до зростання максимальних згинальних моментів у балках на 15 – 25 %, що безпосередньо впливає на вимоги до міцності та жорсткості конструкцій. Для залізобетонних прогонових будов, спроектованих під клас Н-30, запас міцності виявляється недостатнім для прийняття навантаження А15 без додаткового підсилення. Як наслідок, значна кількість мостів, збудованих у 1960–1970-х роках, не відповідає вимогам сучасних

норм і потребує переведення на вищий клас навантаження або обмеження руху важкого транспорту. Переведення на клас А15 без заміни прогонових будов можливе лише за умови застосування ефективних методів підсилення.

За даними ДП «НІРІ», прогонові будови 211 мостів української дорожньої мережі були виготовлені відповідно до типового проєкту залізобетонних прогонових будов — «Типові проєкти споруд на автомобільних дорогах. Випуск 56».

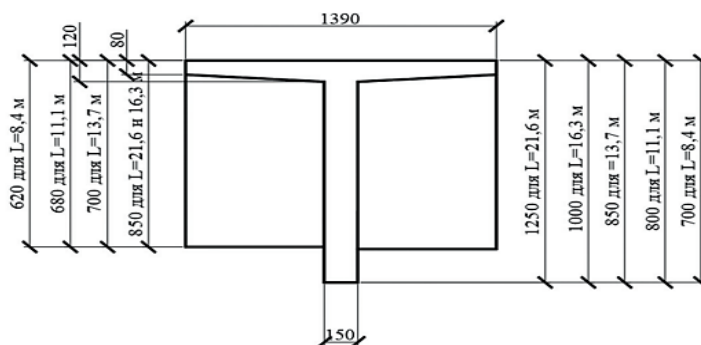


Рисунок 1 — Поперечний переріз балки за типовим проєктом «Випуск 56»

Залізобетонна прогонова будова складається із декількох балок таврового поперечного перерізу із каркасною арматурою (без попереднього натягу). Балки з'єднуються між собою зварюванням сталевих закладних деталей у поперечних діафрагмах. Ці діафрагми виконані у вигляді вертикальних залізобетонних поперечних пластин з обох сторін кожної балки, крім крайніх. Арматування і бетонування діафрагм виконували одночасно з балкою. Висота балок залежить від довжини прогону, а кількість балок в поперечному перерізі мосту визначається розміром проїзної частини і шириною тротуарів. Кожна балка складається з вертикальної стінки постійної товщини і горизонтальної плити. Плита сприймає стиснення при згині балки і, одночасно, підтримує конструкцію проїзної частини. Розтяг при згині балки сприймає нижня поздовжня стрижнева арматура. На ділянках поблизу опор частина стрижнів нижньої поздовжньої арматури відігнута вгору для сприйняття поперечної сили. Попередній натяг арматури відсутній [3]. Проєктна несна здатність балки, згідно з типовим проєктом, становить 141 тс·м.

Розрахункове дослідження ґрунтується на застосуванні методу граничних станів, що є основним підходом у сучасному проєктуванні залізобетонних конструкцій. Цей метод дозволяє комплексно оцінити роботу прогонових будов як за умовою міцності (перша група граничних станів), так і за умовою експлуатаційної придатності, що включає контроль за деформаціями та тріщиностійкістю (друга група граничних станів). На першому етапі було виконано комп'ютерне моделювання прогонової будови типу Вип. 56 довжиною 16,76 м у програмному комплексі «Ліра-Сапр». Це дало змогу створити точну просторову модель конструкції, врахувати спільну роботу головних балок, плити проїзної частини та інших елементів. Під час моделювання було враховано повний спектр навантажень, що діють на міст, а саме:

- постійні навантаження включають власну вагу залізобетонних елементів (балок, плити), а також масу всіх елементів багатошарової конструкції проїзної частини, таких як гідроізоляція, асфальтобетонне покриття, деформаційні шви та тротуарні блоки;
- тимчасові навантаження були прийняті відповідно до чинних норм, що регламентують розрахунок мостових споруд;
- нормативні навантаження від автотранспорту, відповідно до стандартних схем навантажень, з урахуванням сучасного складу транспортного потоку.

У розрахунковій моделі було відтворено реальні геометричні параметри та фізико-механічні характеристики бетону та арматури. Для бетону були прийняті характеристики, що відповідають його

класу за міцністю, з урахуванням фізичного зносу, а для арматури — характеристики, що відповідають її класу.

Було проаналізували напружено-деформований стан типової прогонової будови під власною вагою, що є відправною точкою для оцінювання його початкових характеристик. Без посилення додатковою арматурою максимальне переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги склало 21,3 мм. Максимальне значення згинального моменту M_y балок прогонової будови від власної ваги склало 57,6 тс·м.

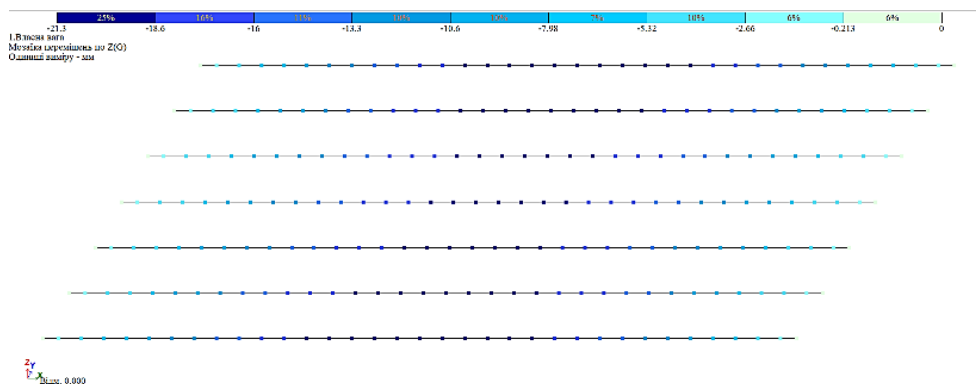


Рисунок 2 — Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги ($\max = 21,3$ мм) без посилення додатковою арматурою

Далі, щоб визначити відповідність конструкції сучасним вимогам, був виконаний розрахунок під різними нормативними навантаженнями. Розрахунковий момент від сполучення навантажень Н-30 плюс постійні склав 132 тс·м. Це показує, що конструкція відповідала нормам, що діяли на момент її проектування.

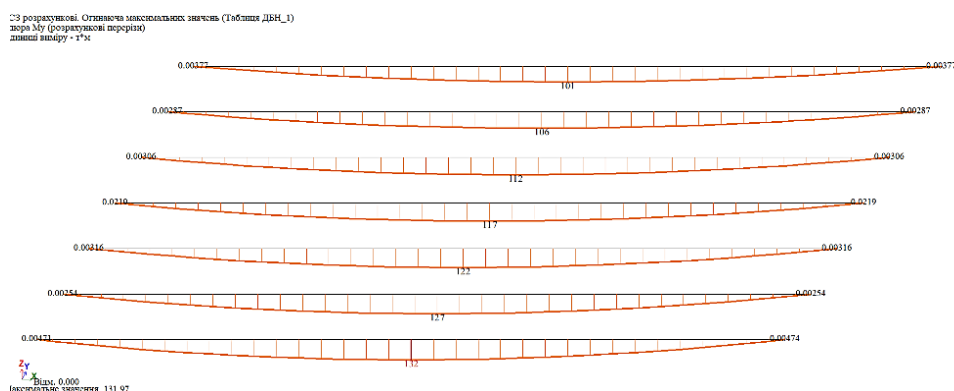


Рисунок 3 — Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, Н-30 плюс постійні ($\max = 132$ тс·м).

Однак, розрахунковий момент від сполучення А15 плюс постійні навантаження склав 184 тс·м. Ця величина є критичною, оскільки при порівнянні з несною здатністю балки, згідно з типовим проектом, яка становить 141 тс·м, видно, що вона значно перевищує допустимий рівень. Це означає, що несна здатність конструкції не забезпечена, а дефіцит становить 43 тс·м.

Така ситуація свідчить, що при проходженні сучасних транспортних засобів, запроєктована конструкція не здатна безпечно сприймати навантаження, оскільки виникнення надмірних напружень може призвести до незворотних деформацій, розкриття тріщин у бетоні та, зрештою, до прогресуючого руйнування або навіть аварійної ситуації. Це підкреслює, що конструкції, запроєктовані за старими

нормами, не відповідають сучасним вимогам безпеки та експлуатаційної надійності, що є прямим обґрунтуванням необхідності їх модернізації.

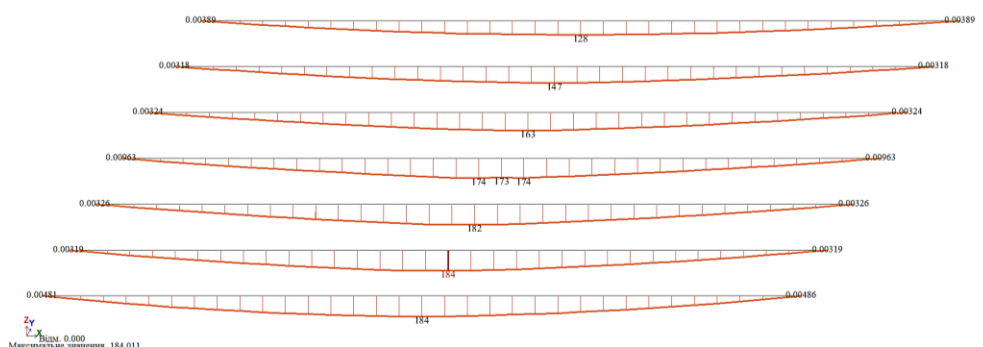


Рисунок 4 — Епюри згинальних моментів M_u балок прогонової будови від розрахункових сполучень навантажень, А15 + постійні ($M_{\max} = 184 \text{ тс} \cdot \text{м}$)

За посилення балки прогонової будови двома стержнями діаметром 32 мм, несну здатність балки прогонової будови відносно навантажень А15 буде забезпечено, $184 \text{ тс} \cdot \text{м} < 193 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

Несну здатність перерізу визначали за формулою:

$$M_{\text{гр}} = \begin{cases} R_b \cdot b_{f1} \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) & \text{if } x < h_{f1} \\ R_b \cdot (b_{f1} - b) \cdot h_{f1} \cdot (h_0 - 0,5 \cdot h_{f1}) + R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - \frac{x}{2}) & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

- де $M_{\text{гр}}$ — граничний момент опору перерізу балки, який визначає її несну здатність;
 R_b — розрахунковий опір бетону на стиск, характеристика міцності бетону, яка враховує коефіцієнти надійності, що залежить від класу бетону;
 b — ширина ребра балки;
 h_0 — робоча висота перерізу балки, яку визначають як відстань від стиснутої грані до центру ваги розтягнутої арматури;
 b_{f1} — ширина полиці (верхньої частини);
 h_{f1} — товщина полиці (верхньої частини) балки;
 x — висота нейтральної осі від найбільш стиснутої грані перерізу.

Відповідно до виконаних розрахунків:

$$M_{\text{гр}} = 51,6 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, сумарний граничний момент опору посиленої балки ($M_{\text{гр.пос}}$) був визначений як:

$$M_{\text{гр.пос}} = 141 \text{ тс} \cdot \text{м} + 74,1 \text{ тс} \cdot \text{м} = 215 \text{ тс} \cdot \text{м} > 184 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Порівняння розрахункового моменту опору посиленої балки з моментом від зовнішніх навантажень показало, що після посилення звичайною арматурою конструкція відповідає вимогам міцності за першою групою граничних станів та здатна безпечно сприймати задані навантаження.

$$M_{\text{гр.пос}} = 141 \text{ тс} \cdot \text{м} + 52 \text{ тс} \cdot \text{м} = 193 \text{ тс} \cdot \text{м} > 184 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

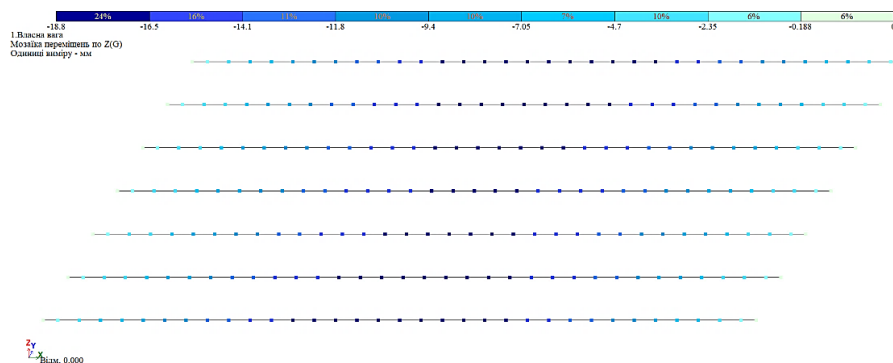


Рисунок 5 — Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги ($\max = 18,8$ мм) за посилення звичайною арматурою

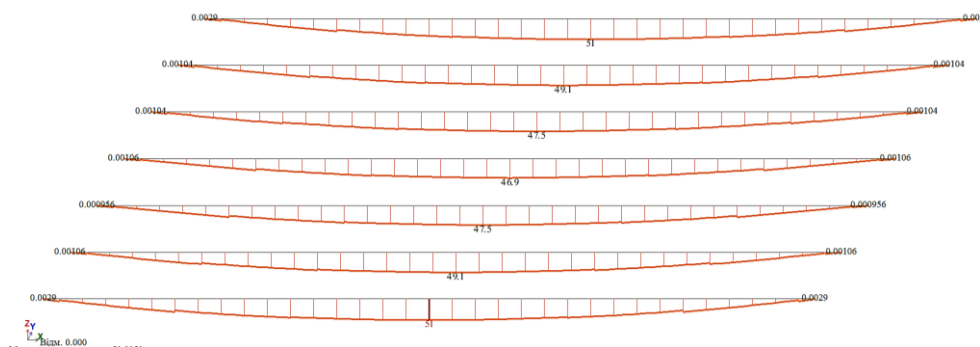


Рисунок 6 — Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від власної ваги ($\max = 51$ тс · м)

Посилення конструкції додатковою звичайною арматурою значно підвищує її несну здатність, проте цей метод має суттєвий недолік, що обмежує його застосування. Він не змінює принципу роботи залізобетонної конструкції, яка залишається схильною до утворення тріщин у розтягнутій зоні під впливом експлуатаційних навантажень.

Це відбувається через те, що бетон добре працює на стиск, але погано на розтяг. Тому навіть після посилення, коли зовнішні навантаження перевищують певну межу, в бетоні все одно виникають розтягувальні напруження, які призводять до розкриття тріщин. Наявність тріщин, у свою чергу, відкриває шлях для агресивних факторів навколишнього середовища (вода, солі, кисень), що призводить до корозії арматури та зниження довговічності всієї конструкції. Таким чином, посилення звичайною арматурою є лише частковим вирішенням проблеми.

Враховуючи виявлені обмеження, наступним етапом є моделювання посилення зовнішньою попередньо-напруженою арматурою. Цей метод є принципово відмінним, оскільки дозволяє активно керувати напружено-деформованим станом конструкції, забезпечуючи її високу тріщиностійкість та довговічність.

Моделювання посилення зовнішньою попередньо-напруженою арматурою здійснювали шляхом введення в розрахункову схему додаткового зусилля попереднього обтиску. Це зусилля, що діє на балку, створює у нижній, розтягнутій зоні бетону постійні стискальні напруження. Це дозволяє компенсувати або значно зменшити розтягувальні напруження, які виникають від зовнішніх навантажень.

Результати розрахунків, отримані після моделювання посилення за цією методикою, продемонстрували її значні переваги.

За посилення балки прогонової будови чотирма попередньо напруженими канатами діаметром 15,2 мм, несну здатність балки прогонової будови відносно навантажень А15 буде забезпечено, $184 \text{ тс} \cdot \text{м} < 215 \text{ тс} \cdot \text{м}$.

За формулою (1) — граничний момент опору перерізу балки, після підпислення складає:

$$M_{\text{гр}} = 74,1 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, сумарний граничний момент опору посиленої балки ($M_{\text{гр.пос}}$) був визначений як:

$$M_{\text{гр.пос}} = 141 \text{ тс} \cdot \text{м} + 74,1 \text{ тс} \cdot \text{м} = 215 \text{ тс} \cdot \text{м} > 184 \text{ тс} \cdot \text{м}.$$

Порівняння розрахункового моменту опору посиленої балки з моментом від зовнішніх навантажень показало, що після посилення звичайною арматурою конструкція відповідає вимогам міцності за першою групою граничних станів та здатна безпечно сприймати задані навантаження.

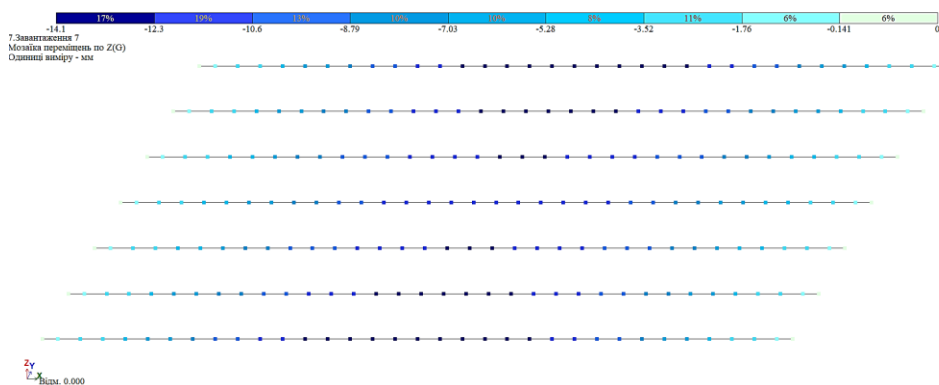


Рисунок 7 — Переміщення балок прогонової будови по осі Z від власної ваги (max = 14,1 мм)

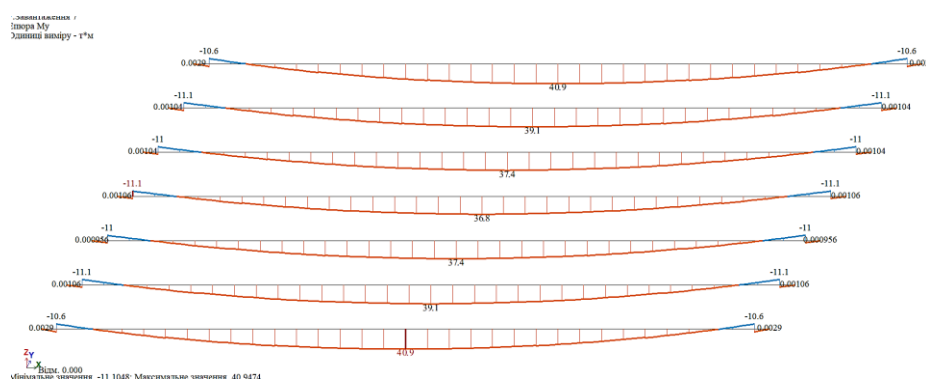


Рисунок 8 — Епюри згинальних моментів M_y балок прогонової будови від власної ваги (max = 40,9 тс · м)

Для оцінки довговічності та захисту арматури від корозії необхідним є розрахунок на тріщиностійкість під дією експлуатаційних навантажень.

На стадії експлуатації проводиться розрахунок на тріщиностійкість для повних експлуатаційних навантажень, що включають постійні та тимчасові навантаження. Нормативний момент у середині прогону від постійних навантажень становить: $M_{\text{п}} = 205$ тис · м. При цьому від власної ваги балки та плити: $M_{\text{пе}} = 125$ тис · м, а від тимчасових навантажень, асфальтобетонного покриття, перил та бар'єрної огорожі: $M_{\text{т}} = M_{\text{п}} - M_{\text{пе}} = 80$ тис · м.

Розтягувальні напруження в бетоні нижньої грані балки не повинні перевищувати величину:

$$\sigma_{b.c.n} \leq 0,8 \cdot R_{bt.ser}, \quad (2)$$

де $\sigma_{b.c.n}$ — розтягувальне напруження в бетоні на нижній грані балки;

$R_{bt.ser}$ — розрахунковий опір бетону розтягу для другої групи граничних станів.

Також накладається обмеження на стискальні напруження в бетоні верхньої грані. Вони не повинні перевищувати:

$$\sigma_{bt.v} \leq R_{b.mc2}, \quad (3)$$

де $\sigma_{bt.v}$ — стискальне напруження в бетоні на верхній грані балки.

Рівнодійна зусилля попереднього напруження в напруженій арматурі з урахуванням втрат:

$$N_p = A_p \cdot \sigma_p, \quad (4)$$

де N_p — рівнодійна сила попереднього напруження;

A_p — площа поперечного перерізу напруженої арматури;

σ_p — напруження в арматурі.

$$N_p = 59,2 \text{ тс}.$$

Напруження в бетоні верхньої грані в середині прогону:

$$\sigma_{bt.be} = \frac{N_p}{A_{red}} - \frac{N_p \cdot e_0 \cdot Y_{red.b}}{I_{red}} + \frac{M_{pe} \cdot Y_{red.b}}{I_{red}}, \quad (5)$$

де $\sigma_{bt.be}$ — стискальне напруження в бетоні на верхній грані балки;
 A_{red} — площа поперечного перерізу приведеної конструкції;
 e_0 — ексцентриситет сили попереднього напруження N_p ;
 $Y_{red.b}$ — відстань від центру ваги приведенного перерізу до верхньої грані балки;
 I_{red} — момент інерції приведенного перерізу;
 M_{pe} — момент від навантаження (постійного та тимчасового експлуатаційного).

$$\sigma_{bt.b1} = 300,9 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2} < 0,8 \cdot R_{b.mc2} = 1460 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2}.$$

Умову виконано, поздовжні тріщини на стадії експлуатації не виникають.

Напруження в бетоні нижньої грані визначають за формулою:

$$\sigma_{bc.ne} = \frac{-N_p}{A_{red}} - \frac{N_p \cdot e_0 \cdot Y_{red.n}}{I_{red}} + \frac{M_{pe} \cdot Y_{red.n}}{I_{red}}, \quad (6)$$

$\sigma_{bc.ne} = -13,8 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2} < 0,8 R_{bt.ser} = 144 \frac{\text{тс}}{\text{м}^2}$ — напруження в бетоні нижньої грані будуть стискаючими.

Результати розрахунків на тріщиностійкість підтвердили ключову перевагу зовнішнього попереднього напруження. На відміну від посилення звичайною арматурою, яке хоча й збільшує несну здатність, але не усуває розтягувальні напруження у бетоні, метод попереднього напруження створює постійне стискальне зусилля. Це стискальне зусилля повністю компенсує розтягувальні напруження, які виникають від зовнішніх навантажень, що запобігає утворенню тріщин у бетоні. Таким чином, цей метод не лише підвищує міцність, а й значно збільшує довговічність конструкції та її стійкість до корозії.

Отримані розрахункові дані щодо міцності, жорсткості та тріщиностійкості дозволяють провести комплексний порівняльний аналіз. Для наочної демонстрації переваг кожного з методів посилення, а також обґрунтування їх доцільності, нижче представлена порівняльна таблиця, що узагальнює ключові техніко-економічні показники.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз ефективності посилення балок звичайною та попередньо напруженою арматурою

Критерій порівняння	Без посилення	Посилення звичайною арматурою	Посилення попередньо напруженою арматурою
Несна здатність (розрахункова)	141 тс·м	193 тс·м	215 тс·м
Запас міцності	Недостатній (141 тс·м < 184 тс·м)	Достатній (193 тс·м > 184 тс·м)	Значний (215 тс·м >> 184 тс·м)
Прогин від власної ваги	21,3 мм	18,8 мм	14,1 мм
Жорсткість конструкції	Стандартна	Вища	Значно вища
Довговічність та тріщиностійкість	Наявні тріщини, ризик корозії	Можливе утворення тріщин, ризик корозії	Утворення тріщин усувається, висока стійкість до корозії
Технологічна складність	Відсутня	Відносно проста	Вища, вимагає спеціального обладнання

Експлуатаційні витрати	Високі (необхідність постійного ремонту)	Можуть бути вищими (обслуговування)	Нижчі

Висновки

У результаті проведеного дослідження були визначені два ефективні методи посилення типової балки за типовим проектом Вип. 56 та виконані розрахунки, які підтверджують їхню ефективність.

Розрахунки показали, що несна здатність типової залізобетонної балки, розрахованої на навантаження Н-30 та НК-80, становить 141 тс·м, що є недостатнім для сприйняття сучасних навантажень А15 та НК-100. Нормативна несна здатність, яка відповідає цим новим навантаженням, становить 184 тс·м. Це обґрунтувало необхідність посилення конструкції. Посилення звичайною арматурою передбачає додаткове армування розтягнутої зони балки. За допомогою розрахунків було встановлено, що після посилення звичайною арматурою несна здатність балки зростає до 193 тс·м. Цей показник перевищує необхідну несну здатність (184 тс·м), що свідчить про ефективність методу. При цьому прогин балки під навантаженням становить 18,8 мм.

Посилення попередньо напруженою арматурою дозволило не тільки збільшити несну здатність, а й змінити напружено-деформований стан конструкції. За результатами розрахунків, несна здатність балки після такого посилення досягла 215 тс·м, що забезпечує значний запас міцності. Крім того, попереднє напруження значно зменшило прогин балок до 14,1 мм, що є важливим для довговічності та тріщиностійкості конструкції.

Наукова новизна дослідження полягає у кількісному обґрунтуванні переваг методу посилення з використанням зовнішньої попередньо напруженої арматури. Порівняльний аналіз довів, що цей метод є більш ефективним, оскільки він не тільки забезпечує необхідну міцність, але й значно підвищує жорсткість і тріщиностійкість конструкції, що є важливим для її довговічності.

Список літератури

1. СНиП 2.05.03-84*. Мости і труби. 1984. 141 с. (Інформація та документація).
2. Остапчук В. Ю., Веретельников О. С. Перспективи та можливості будівництва мостів зі зменшеною кількістю проміжних опор на автомобільних дорогах України застосуванням сучасних технологій. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. С. 273–279. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.273>.
3. Боднар Л. П., Завгородній С. С., Яструбінецький В. Л. Аналіз типових проектів найбільш поширених залізобетонних прогонових будов мостів на автомобільних дорогах України. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 22. С. 176–186. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.176>.
4. ДБН В.2.3-22:2009 Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ, 2009. 47 с. (Інформація та документація).
5. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ, 2009. 53 с. (Інформація та документація).
6. Каськів В. І., Панібратець Л. Г., Степанов С. М., Грінів В. С., Чайковська Л. І. Стан мостового господарства України на дорогах загального користування державного значення на підконтрольних територіях за 2023 рік. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 29. С. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.280>.
7. Попович, М. М., Миронюк, О. С., Борщов, В. І. Підсилення залізобетонних балкових прогінних будов з використанням шпренгелів і попередньо напружених стрижнів. Електронний ресурс. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullweb&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92$) (дата звернення: 15.09.2025)
8. ДБН В.2.3-14:2006. Мости та труби. Правила проектування. Київ, 2006. 48 с. (Інформація та документація).

9. РВ.3.2-03450778-832:2013. Рекомендації з проектування монолітних попередньо-напружених мостів з напруженням на бетон (пост-напружені системи). Київ, 2013. 53 с. (Інформація та документація).
10. Р В.3.2-218-03450778-741:2008 Рекомендації з підсилення конструкцій мостів під навантаженням, в т. ч. з регулюванням зусиль. Київ, 2008. Київ, 2013. 57 с. (Інформація та документація).
11. Kim, S. H., Park, J. S., Jung, W. T., Kim, T. K., & Park, H. B. (2018). Experimental Study on Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method. MDPI, March 2021, Advanced Composites Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Gyeonggi-do, Korea.

References

1. SNiP 2.05.03-84. Bridges and culverts (Bridges and pipes). 1984. 141 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia).
2. Ostapchuk V. Yu., Veretelnikov O. S. Perspektyvy ta mozhlyvosti budivnytstva mostiv zi zmensheniu kilkistiu promizhnykh opor na avtomobilnykh dorohakh ukrainy iz zastosuvanniam suchasnykh tekhnolohii (Prospects and possibilities for the construction of bridges with a reduced number of intermediate supports on Ukrainian motorways using modern technologies). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 29. P. 273–279 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.273> [in Ukrainian].
3. Bodnar L. P., Zavorodnii S. S., Yastrubynetskyi V. L. Analiz typovykh proektiv naibilsh poshyrenykh zalizobetonnykh prohonovykh budov mostiv na avtomobilnykh dorohakh Ukrainy (Analysis of typical designs of the most common reinforced concrete bridge spans on motorways in Ukraine. Roads and Bridges). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2020. Issue 22. P. 176–186 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.176> [in Ukrainian].
4. DBN V.2.3-22:2009 Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (Bridges and Culverts. General Design Requirements). Kyiv, 2009. 47 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
5. DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia (Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions.). Kyiv, 2009. 53 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
6. Kaskiv V. I., Panibratets L. H., Stepanov S. M., Hriniv V. S., Chaikovska L. I. Stan mostovoho hospodarstva ukrainy na dorohakh zahalnoho korystuvannia derzhavnoho znachennia na pidkontrolnykh terytoriiakh za 2023 rik (State of bridge facilities of ukraine on public roads of national importance in the controlled territories in 2023.). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 29. P. 280–292. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.29.280> [in Ukrainian].
7. Popovych, M. M.; Myroniuk, O. S.; Borshchov, V. I. Pidsylennia zalizobetonnykh balkovykh prohinnykh budov z vykorystanniam shprenheliv i poperedno napruzhenykh stryzhniv (Strengthening of Reinforced). Elektronnyi resurs. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%91%D0%BE%D1%80%D1%89%D0%BE%D0%B2%20%D0%92$) (data zvernennia: 15.09.2025) [in Ukrainian].
8. DBN V.2.3-14:2006. Mosty ta truby. Pravila proiektuvannia. (State Building Norms (DBN V.2.3-14:2006) Bridges and Pipes. Design Rules). Kyiv, 2006. (Information and documentation) [in Ukrainian].
9. R V.3.2-03450778-832:2013. Rekomendatsii z proiektuvannia monolitykh poperedn'o-napruzhenykh mostiv z napruzhenniam na beton (post-napruzheni systemy). (Recommendations for the design of monolithic post-tensioned bridges with concrete stress). Kyiv, 2013 [in Ukrainian].
10. R V.3.2-218-03450778-741:2008. Rekomendatsii z pidsylenia konstruktsii mostiv pid navantazhenniam, v t. ch. z rehuliuanniam zusyl' (Recommendations for strengthening bridge structures under load, including tension regulation). Kyiv, 2008 [in Ukrainian].
11. Kim, S.-H., Park, J.-S., Jung, W.-T., Kim, T.-K., & Park, H.-B. (2018). Experimental Study on

Strengthening Effect Analysis of a Deteriorated Bridge Using External Prestressing Method. MDPI, March 2021, Advanced Composites Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Gyeonggi-do, Korea [in English].

Anna Miniukova¹, <https://orcid.org/0000-0002-1830-0189>

Pavlo Stashuk², Ph.D., <https://orcid.org/0000-0001-5221-7015>

¹National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

²State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

CALCULATION OF FORCES AND DISPLACEMENTS OF TYPICAL BRIDGE SPAN BEAMS REINFORCED WITH ORDINARY AND PRESTRESSED REINFORCEMENT

Abstract

Introduction. Many bridge structures worldwide were designed in accordance with outdated standards and no longer meet the demands of modern transport loads. This creates a global safety issue, making the development of effective solutions for their strengthening a critically important task.

Problem Statement. The vast majority of the global bridge infrastructure, particularly in developing countries, was constructed in the mid-20th century. The design of these structures was based on the normative loads of that time, which were significantly lower than current ones. Today, the increase in traffic intensity and the emergence of oversized and heavy-duty vehicles lead to bridge overloading. This causes premature physical wear of the structures, the appearance of cracks, a reduction in their load-bearing capacity, and, consequently, poses a safety threat to all road users.

Materials and methods. The methodology of this study is based on a comprehensive approach that combines theoretical analysis, mathematical modeling, and numerical calculations. The purpose of using these selected methods is to substantiate the need for strengthening existing reinforced concrete bridge structures and to prove the effectiveness of external prestressed reinforcement compared to traditional solutions. The research is based on the Finite Element Method (FEM). This numerical method allows for approximating the behavior of a complex structure by dividing it into a set of simple elements (finite elements). This makes it possible to accurately determine the stress-strain state of the entire object. The calculations were performed using the licensed software package LIRA-SAPR, a modern tool for modeling, analyzing, and designing building structures.

Objective. To assess the effectiveness of external prestressed reinforcement in improving the durability of reinforced concrete bridge structures based on experimental data.

Results. The analysis confirmed that the existing structures have a significant strength deficit: the calculated bending moment from modern loads (184 tm) exceeds the load-bearing capacity of the existing beams (141 tm). It was found that both strengthening methods—with ordinary and prestressed reinforcement—effectively increase the load-bearing capacity of the structures, bringing it up to 193 tm and 215 tm, respectively. The use of external prestressing significantly improved the operational characteristics of the structure. The calculated deflection from self-weight decreased from 21.3 mm to 14.1 mm, and the compressive stresses in the concrete eliminated the risk of crack formation.

Conclusions. Based on the conducted calculation of forces, displacements, and comparative analysis, it was established that existing reinforced concrete bridge span beams, designed with outdated standards, have a significant deficit in load-bearing capacity and do not meet modern safety requirements. The quantitative analysis confirmed that strengthening the structures with additional reinforcement is an effective solution for increasing their strength. However, the comparative analysis showed that the method of strengthening with external prestressed reinforcement is the most appropriate, as it not only provides a significant increase in load-bearing capacity but also considerably improves the stiffness and crack resistance of the structure, which substantially extends its service life and reduces future maintenance costs. Thus, the results of this study provide a scientific and engineering justification for selecting the optimal method for modernizing typical reinforced concrete bridge structures.

Keywords: road, external prestressing, strengthening, load-bearing capacity, durability reinforced concrete structure, stress-strain state, bridge, reconstruction, transport loads, computational modeling.

УДК 624.014:624.21

Абрамов В. М., канд. техн. наук., доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>*Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ (на період воєнного стану), Україна*

МЕТОДИКА ПРАКТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ АРКОВИХ ДОРОЖНІХ СПОРУД ІЗ ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ

Анотація

Вступ. Для поширення в практику транспортного будівництва дорожніх споруд з гофрованого металу під насипом, які вже давно й успішно використовують в різних країнах світу замість малих і середніх мостів, шляхопроводів, водопропускних труб традиційних типів з масивних конструкцій, важливою є наявність відповідних нормативно-методичних документів і посібників, необхідних для їхнього проектування, зокрема у частині розрахунків.

Проблематика. У чинних нормативно-методичних документах з проектування дорожніх споруд з гофрованого металу відсутні дані стосовно аналітичного розрахунку таких споруд аркової форми, є тільки посилання на використання методу скінчених елементів (МСЕ). Проте такі споруди саме аркової форми з гофрованого металу під дорожнім насипом є досить раціональною альтернативою малих мостів з типових масивних конструкцій внаслідок більш привабливих техніко-економічних показників.

Мета і завдання. Надання пропозиції щодо складання методики спрощеного аналітичного розрахунку розглянутих споруд з наведенням всіх потрібних для її практичного використання складових, частково викладених раніше в окремих статтях, з додаванням числового прикладу використання цієї методики — є основною метою і завданням даної роботи.

Методи досліджень і результати. Розрахунково-теоретичні дослідження спрямовані на доповнення уявлень про особливості і закономірності роботи гнучкого аркового склепіння (арки, за умовами плоскої задачі) під дорожнім насипом, які покладено в основу розрахунків, надано деякі пропозиції й уточнення (стосовно визначення еквівалентного тимчасового навантаження, стосовно схеми опору ґрунту тощо).

Висновки. Надана методика практичного розрахунку аркових дорожніх споруд з гофрованого металу на підставі загально відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів та підземних споруд. А також проста зрозуміла розрахункова схема, яка наближена до дійсної роботи такої конструкції в натурних і лабораторних умовах.

Ключові слова: автомобільна дорога, аркова споруда, гофрований метал, міст, МСЕ, насип, несна здатність, опір ґрунту, прогин, труба.

Вступ

Поширення у практику транспортного будівництва дорожніх споруд з гофрованого металу під насипом, які є раціональною альтернативою малих і середніх мостів, шляхопроводів, водопропускних труб традиційних типів з масивних конструкцій, є достатньо актуальним і потребує наявності відповідних нормативно-методичних документів та посібників з проектування.

Для доповнення й удосконалення існуючої нормативно-методичної документації з цих питань [1], особливо у частині розрахунків, важливо продовжувати теоретичні й експериментальні дослідження і розробки з метою створення достатньо повних і коректних методів практичних розрахунків, у тому числі аналітичних, на підставі загально відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів і підземних споруд та простих зрозумілих розрахункових моделей, наближених до реальних схем роботи таких об'єктів.

У частині розрахунків є підстави для корегування і доповнень наступних розділів існуючих норм [1]:

- визначення еквівалентного (рівномірно розподіленого вздовж всього прогону або отвору) тимчасового навантаження для споруд різних форм, доцільне з урахуванням відомих закономірностей розподілу цього навантаження в ґрунті (заміна його «еквівалентним» шаром ґрунту, як прийнято в існуючих нормах, не коректна, тому, що тиск в ґрунті від тимчасового навантаження його поверхні з глибиною розсіюється і зменшується, а від маси ґрунту – зростає);

- посилення на лінії впливу для тимчасового навантаження, які є у нормах, слід доповнити даними про їхні форми, про те, для якого саме зусилля створена дана лінія впливу, про її ординати і площу її ділянок;

- основну розрахункову умову визначення несної здатності споруди слід прийняти з урахуванням її натурної схеми роботи — переважно на згин (зі стиском), а не тільки на стиск, як прийнято в нормах;

- визначення граничного допустимого прогину споруди пов'язувати з величиною можливого граничного допустимого осідання дорожнього покриття над спорудою.

У даній статті пропонується методика практичного розрахунку з рішенням зазначених питань для аркових споруд, але аналогічні підходи можливі і для споруд інших форм.

Основна частина

Вихідні передумови розрахунку

Частково основні вихідні положення методики розрахунку було викладено раніше в окремих статтях [2, 3], але зараз це викладено з уточненнями, доповненнями й об'єднаннями.

Виходячи з відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів і підземних споруд, а також з досвіду обстежень і досліджень, схему роботи і розрахунку гнучкого аркового склепіння (за умовами плоскої задачі — арки) під насипом є підстави вважати такою:

- на початковому етапі засипання арки діє активний бічний тиск ґрунту на її стінки;
- по мірі відсипання насипу над аркою зростає активний вертикальний тиск ґрунту й арка прогинається (що допустимо за умов, щоб можливе локальне осідання поверхні дорожнього покриття над аркою з прогином не перевищувало допустимої величини [2]), а її стінки переміщуються у бік ґрунту [3];

- внаслідок цих переміщень активний бічний тиск ґрунту змінюється на пасивний тиск (пружний опір ґрунту переміщенням стінок арки), який обмежує її деформації і забезпечує потрібну несну здатність системи «споруда-ґрунт», значно більшу за несну здатність гнучкої арки поза ґрунтом [3];

- в межах допустимого прогину гнучкої напівкруглої арки із жорстким обпиранням п'ят схема її деформування під насипом майже така сама, як в арки поза ґрунтом під вертикальним навантаженням, рівномірно розподіленим вздовж прогону — з максимальним переміщенням стінок в точках з координатою 34° [4] від рівня п'ят;

- несну здатність арки від опору ґрунту визначають як вертикальне рівномірно розподілене навантаження, яке забезпечує її статичну рівновагу в допустимому деформованому стані (за граничного прогину), як умовному механізму з повними шарнірами (які в дійсності будуть не повними, а пластичними, згинальний момент у яких не нульовий, а дорівнює граничному моменту внутрішніх сил, що дає певний запас) у місцях найбільших згинальних моментів і переміщень, геометричну незмінність якого забезпечує опір ґрунту, пропорційний переміщенням стінок [3, 5];

- тимчасове навантаження на арку від транспортних засобів на дорозі, яке може бути розподілене фактично тільки на частині прогону, приймають у вигляді еквівалентного рівномірно розподіленого вздовж всього прогону (для спрощення розрахунку), визначеного за допомогою ліній впливу максимального зусилля (згинального моменту в опорному перерізі) ;

- величину опору ґрунту (пасивного тиску) приймають пропорційною переміщенням стінок арки і визначають з використанням встановленого розрахунками (за МСЕ) співвідношення переміщення стінок до прогину арки.

Методика розрахунку

Несна здатність гнучкої арки під насипом забезпечена, якщо виконується умова:

$$p_n + p_{m,eq} \leq (q_o + q_e)m, \quad (1)$$

де $p_n + p_{m,eq}$ — розрахункове (з відповідними коефіцієнтами надійності γ_f [6]) постійне p_n (від маси ґрунту з питомою вагою γ над аркою та від власної ваги конструкцій g) і тимчасове еквівалентне навантаження $p_{m,eq}$, рівномірно розподілене вздовж прогону ($2r$) напівкруглої арки одиничної ширини (за умовами плоскої задачі) на рівні її верху, які визначають за формулами:

$$p_n = \gamma H \gamma_f + g \gamma_f, \quad (2)$$

$$p_{m,eq} = \frac{M}{\omega_o} = \frac{p_m \omega}{\omega_o}, \quad (3)$$

де H — відстань від верху арки до верху дорожнього покриття;
 p_m — фактична величина тимчасового рівномірно розподіленого (на якійсь частині прогону) навантаження на арку на рівні її верху, яку визначають згідно з [7] за формулами:
 — при $H > h_1$, кН/м^2 (тс/м^2).

$$p_m = \frac{980}{ab_1} = \left(\frac{100}{ab_1} \right); \quad (4)$$

— при $H \leq h_1$, кН/м^2 (тс/м^2).

$$p_m = \frac{490}{ab_2} = \left(\frac{50}{ab_2} \right), \quad (5)$$

де $a = 3,8 + 2h_n + 1,16(H - h_n);$

$b_1 = 3,5 + 2h_n + 1,16(H - h_n);$

$b_2 = 1,1 + 2h_n + 1,16(H - h_n);$

h_1 — параметр, який визначають за схемою на **рис. 1**, залежно від товщини дорожнього покриття h_n ;

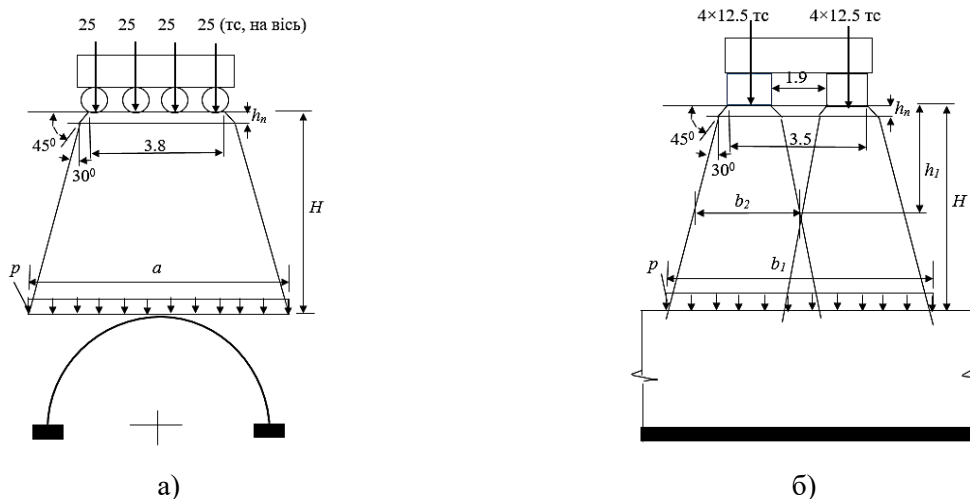


Рисунок 1 — Схеми до визначення навантаження від НК-100 на споруду під дорожнім насипом (розміри в м), переріз вздовж (а) і поперек насипу (б)

ω і ω_0 — площі лінії впливу згинального моменту в опорному (найбільш напруженому) перерізі M , відповідно, у межах фактичного розподілення на частині прогону (на довжині a , **рис. 1, а**) тимчасового рухомого навантаження p і повна площа, з урахуванням позначок її складових – вище за горизонтальну лінію «+», нижче цієї лінії «-» (**рис. 2**);

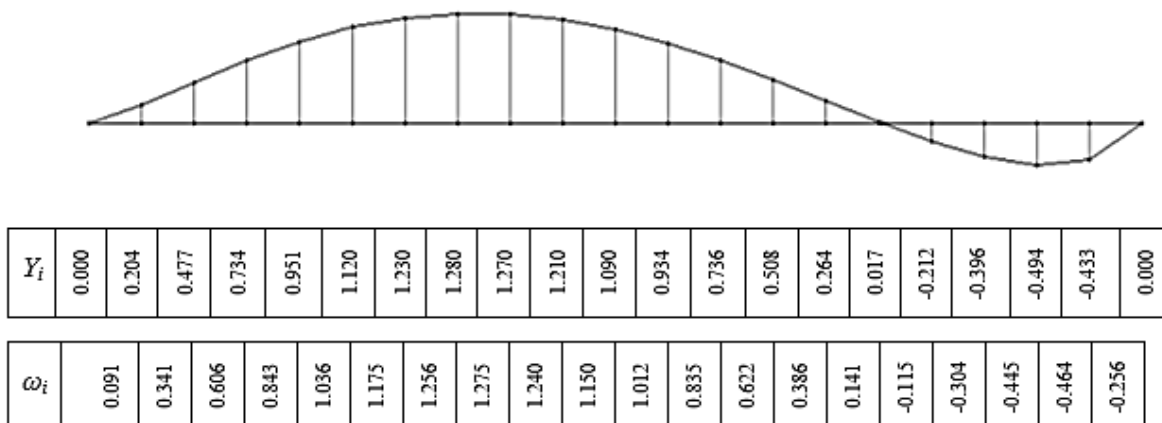


Рисунок 2 — Лінія впливу згинального моменту M в опорному перерізі напівкруглих арок різних розмірів (радіусів і перерізів) із жорстким закріпленням п'ят, її ординати (Y_i , множити на $0,1 r$) і площі (ω_i , множити на $0,01 r^2$) ділянок (довжиною $0,1 r$) між суміжними ординатами

$(q_o + q_z)t$ — відповідно, власна (поза ґрунтом) [4] несна здатність арки q_o радіусом r з металу з граничним пружним згинальним моментом M_{zp} (з границею текучості σ_m і моментом опору перерізу стінки W на одиницю ширини арки) і її несна здатність від опору ґрунту q_z з рівняння статичної рівноваги верхньої частини арки за деформованою схемою, яка аналогічна наведений у [3], які визначають (з коефіцієнтом умов роботи $m = 0,9$) за формулами:

$$q_o = \frac{M_{zp}}{0,108r^2} = \frac{\sigma_m W}{0,108r^2}; \quad (6)$$

$$q_z = \frac{R_x c + R_z l_2}{l_2^2 - 0,5(l_2^2 - l_1^2) \frac{c}{d}}, \quad (7)$$

де $R_x = R \cos 16^\circ$ і $R_z = R \sin 16^\circ$ — відповідно, горизонтальна і вертикальна складові рівнодіючої опору ґрунту R , яка спрямована під зазначеним кутом напрямку (відносно горизонталі) векторів переміщень стінок арки (**рис. 3**);

$c = 0,44r - 1,169f_{zp}$ (на схемі, яку наведено в [3], цей параметр позначено літерою «а»);

$l_1 = 0,17r - 0,6f_{zp}$;

$l_2 = 0,83r + 0,6f_{zp}$;

$d = 0,56r + 0,169f_{zp}$;

f_{zp} — граничний прогин за умови не перевищення можливого осідання дорожнього покриття над аркою гранично допустимого значення S_{zp} з умов безпеки руху транспортних засобів, який визначають згідно з [2] за формулою:

$$f_{zp} = 1,15S_{zp} \left(0,87 + \left(\frac{H}{r} + 0,5 \right) 0,67 \right). \quad (8)$$

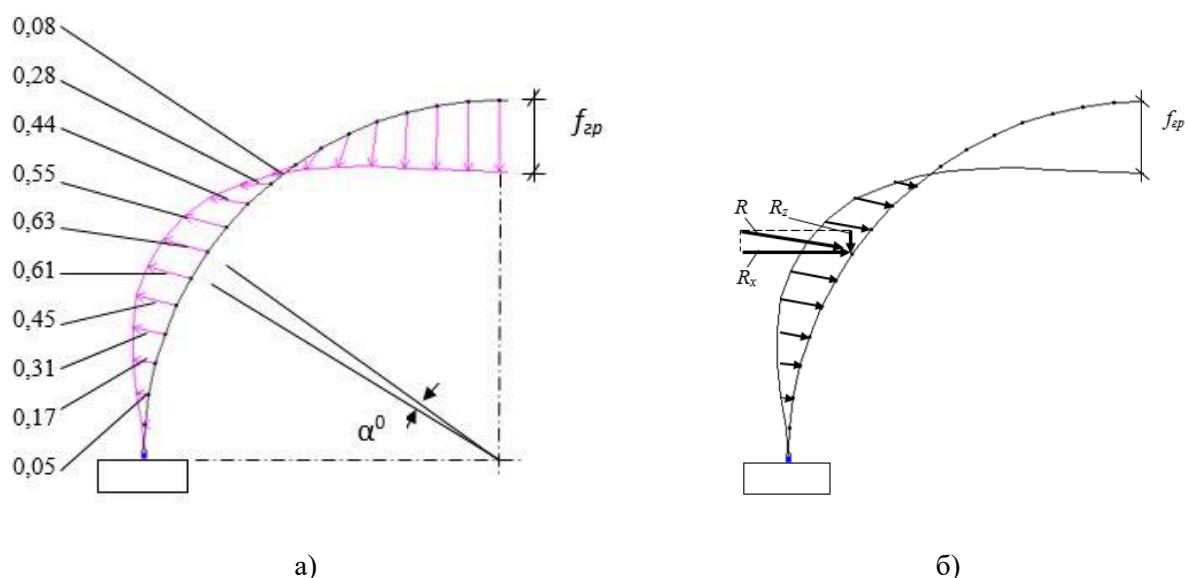


Рисунок 3 — Схема (фрагмент) розрахункових векторів переміщень арки в частках від f_{zp} при $\alpha = 5^\circ$ за МСЕ (а) та епюра (фрагмент) опору ґрунту з рівнодіючою R та її складовими R_x , R_z за рівномірного розподіленого вздовж прогону вертикального навантаження арки і допустимого прогину f_{zp} (б)

Величину рівнодіючої R опору ґрунту з модулем деформації E , коефіцієнтом Пуассона μ і коефіцієнтом постелі k (за формулою Галеркіна Б.Г.), прикладеної в точці максимальних переміщень стінок арки, визначають за формулою:

$$R = A_\delta k = A \frac{E}{(1 + \mu)r}, \quad (9)$$

де A_δ — площа епюри переміщень стінок арки з максимальною ординатою δ_{max} , пов'язаною з прогином f_{zp} (у межах пружної роботи матеріалу конструкції за результатами розрахунків $\delta_{max} = 0,63f_{zp}$, **рис. 3**), яку визначають з урахуванням встановленого розрахунковим шляхом взаємозв'язку між A_δ , r і δ_{max} за формулою:

$$A_\delta = 0,553r\delta_{max}. \quad (10)$$

Приклад розрахунку

Перевіримо несну здатність споруди з напівкруглою аркою за таких вихідних даних: радіус арки $r = 8$ м; гофра $380 \times 140 \times 7$ мм (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина металу); межа текучості металу $\sigma_m = 390$ МПа ($3\,900$ кг/см²); площа перерізу стінки і її момент опору, відповідно $A = 97,7$ см²/м і $W = 322,2$ см³/м; питома вага, модуль деформації і коефіцієнт Пуассона ґрунту насипу, відповідно $\gamma = 18$ кН/м³, $E = 30$ МПа, $\mu = 0,35$; висота засипки $H = 4,0$ м; тимчасове навантаження НК-100, граничне допустиме місцеве осідання дорожнього покриття (при $h_n = 0,15$ м, **рис. 1**) $S_{zp} = 4$ см [2] (дорога II категорії).

За формулами (2) – (4), (6) і (8) – (10), використовуючи лінію впливу на **рис. 2**, для арки шириною 1 м отримаємо:

$$P_n = 1,8 \cdot 4 \cdot 1,3 + 0,00977 \cdot 7,85 \cdot 1,05 = 9,36 + 0,0805 = 9,440 \text{ тс/м (94,40 кН/м);}$$

$$P_m = 100/8,566 \cdot 8,266 = 1,410 \text{ тс/м (14,10 кН/м);}$$

$$P_{m,eq} = 1,41 \cdot 5,573 / 6,672 = 1,178 \text{ тс/м (11,78 кН/м);}$$

$$q_o = 3900 \cdot 322,2 / 0,108 \cdot 800^2 = 18,18 \text{ кгс/см} = 1,820 \text{ тс/м} (18,20 \text{ кН/м});$$

$$f_{zp} = 1,15 \cdot 4 (0,87 + ((400 / 800) + 0,5) 0,67) = 7,08 \text{ см};$$

$$A_\delta = 0,553 \cdot 8 \cdot 0,63 \cdot 0,0708 = 0,197 \text{ м}^2;$$

$$R = 0,197 \cdot 3000 / 1,35 \cdot 8 = 54,72 \text{ тс} (547,2 \text{ кН});$$

$$R_x = 54,72 \cos 16^\circ = 52,600 \text{ тс} (526,00 \text{ кН});$$

$$R_z = 54,72 \sin 16^\circ = 15,083 (150,83 \text{ кН}).$$

За формулою (7), опускаючи проміжні обчислення, отримаємо (при $c = 3,437 \text{ м}$; $l_1 = 1,317 \text{ м}$; $l_2 = 6,683 \text{ м}$ і $d = 4,492 \text{ м}$):

$$q_e = (52,512 \cdot 3,437 + 15,083 \cdot 6,683) / (44,662 - 0,5(44,662 - 1,734 \cdot 0,765)) = 281,586 / 22,994 = 12,23 \text{ тс/м} (122,30 \text{ кН/м}).$$

Основна розрахункова умова (1) виконується:

$$9,44 + 1,178 = 10,618 \text{ тс/м} (106,2 \text{ кН/м}) < (1,82 + 12,23) 0,9 = 12,65 \text{ тс/м} (126,60 \text{ кН/м}).$$

Додатково перевірочним розрахунком за МСЕ встановлено, що за прогину арки $f_{zp} = 7,08 \text{ см}$ максимальний згинальний момент складає $M_{max} = 8,67 \text{ тм}$, що значно менше гранично допустимого $M = \sigma_m W = 3900 \cdot 322,2 = 1256580 \text{ кгс см} = 12,570 \text{ тм} (125,70 \text{ кНм})$, також і нормальна сила стиску $N_{max} = 124,00 \text{ тс}$ значно менше граничного значення: $N_{zp} = \sigma_m A = 3900 \cdot 97,7 = 381030 \text{ кгс} = 381,030 \text{ тс} (3810,00 \text{ кН})$.

Цім розрахунком також встановлено, що розбіжність значень q_e і R , які визначено за МСЕ і за аналітичним способом (відповідно, 13,10 і 56,10 та 12,23 і 54,72), складає всього близько 2,5 % (рис. 4).

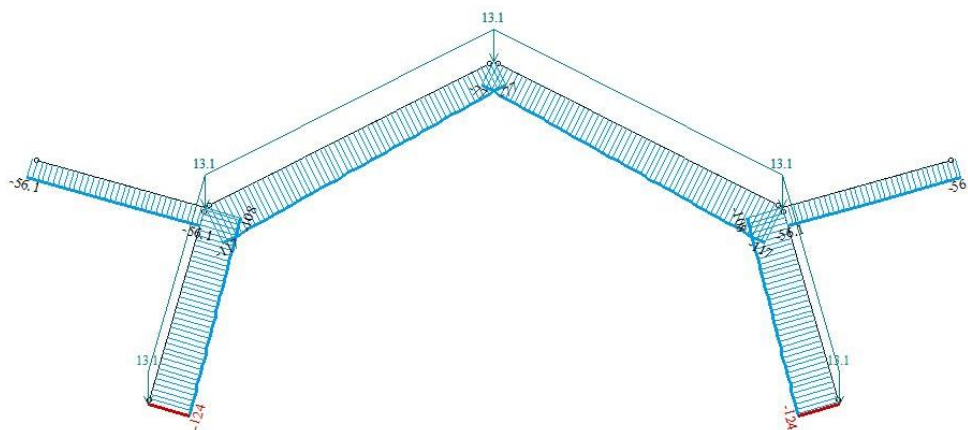


Рисунок 4 — Дані розрахунку (навантаження й епюра нормального зусилля N) за МСЕ несної здатності q_e схеми арки від опору ґрунту для порівняння з аналітичними даними

Висновки

Наведена методика практичного розрахунку несної здатності аркової дорожньої споруди з гофрованого металу на підставі загально відомих закономірностей будівельної механіки, механіки ґрунтів і підземних споруд та простої зрозумілої розрахункової схеми. Які передбачають визначення несної здатності арки від опору ґрунту та аналізування статичної рівноваги її верхньої частини (де власне концентрується деформування й руйнування таких споруд) в допустимому деформованому стані. Наведено приклад виконання такого практичного аналітичного розрахунку, результати якого задовільно збігаються з розрахунком за МСЕ.

Аналогічно може бути розроблена методика аналітичного розрахунку таких дорожніх споруд і інших форм (еліптичної, круглої).

Для додаткового перевіряння методики доцільна її апробація, наприклад пі час випробування експериментальних об'єктів в натурних або лабораторних умовах.

Список літератури

1. ВБН В.2.3-218:2007 Споруди транспорту. Проектування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 49 с. (Інформація і документація).
2. Абрамов В. М. Граничні деформації дорожніх споруд з гофрованого металу. *Вісник НУВГП. Технічні науки: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП, 2023. Вип. 1 (101). С. 143–149. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt1202312>.
3. Абрамов В. М. Розрахунок несної здатності аркової дорожньої споруди аналітичним способом. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. Київ. С. 345–352. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.345>.
4. Клейн Г. К. Посібник з практичних занять з курсу будівельної механіки (статика стрижневих систем). Вища школа. 1980. 348 с.
5. Колоколов Н. М., Янковський О. Я., Щербина К. Б., Черняхівська С. Е. Металеві гофровані труби під насипами. 1973. 117 с.
6. ДБН В 1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ, 2009, 66 с. (Інформація і документація).
7. Абрамов В. М. Про тимчасове навантаження на аркові споруди з гофрованого металу під дорожнім насипом. *Дороги і мости*. 2024. Вип. 30. Київ. С. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.338>.

References

1. VBN B.2.3-218-198:2007. Sporudy transportu. Proektuvannya ta budivnyctvo sporud z metalevikh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystovannya (Transport constructions. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways), Kyiv. 2007. 49 p. (Information and dokumentation) [in Ukrainian].
2. Abramov V. M. Hranyichni deformatsiyi dorozhnykh sporud z hofrovanoho metalu (Boundary deformation of road structures made of corrugated metal). *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky: zb. nauk. prats*. Rivne: NUVHP, 2023. Vyp. 1(101). P. 143–149. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt12202312> [in Ukrainian].
3. Abramov V. M. Rozrakhunok nesnoyi zdatnosti arkovoyi dorozhnoyi sporudy z hofrovanoho metalu analytychnym sposobom (Calculation of the load capacity of an arched road structure from corrugated metal by analytical metod). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 345–351. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.345> [in Ukrainian].
4. Kleyn H. K. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po kursu stroitelnoy mekhaniki (statika sterzhnevyykh system) (Guide to practical lessons on the construction mechanics course (statics of rod systems). Vysshaya shkola. 1980. 348 p. [in Ukrainian].
5. Kolokolov N. M., Yankovskyi O. A., Shcherbyna K. B., Cherniakhivska S. E. Metalevi hofrovani truby pid nasypamy (Metal corrugated pipes under embankments). Transport. 1973. 117 p. [in Ukrainian].
6. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennya ta vplyvy (State Bsliding Norms (DBN V. 1.2-15:2009) Transport constructions. Bridges and pipes. Loads and impacts. Kyiv, 2009, 66 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
7. Abramov V. M. Pro tymchasove navantazhennya na arkovi sporuly z hofrovanoho metaiu pid dorozhnim nasypom (Abou the temporaru load on arched structures made of corrugated metal under road embankment). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 338–344. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.338> [in Ukrainian].

Volodymyr Abramov, *Ph.D., Associate Prof.*, <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>

Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (on period mortal law), Ukraine

METHODOLOGY FOR PRACTICAL CALCULATION OF ARCHED ROAD STRUCTURES MADE OF CORRUGATED METAL

Abstract

Introduction. To spread the practice of transport construction of road structures made of corrugated metal under the embankment, which have long been and successfully used in different countries of the world instead of small and medium-sized bridges, overpasses, culverts of traditional types made of massive structures, it is important to have relevant, sufficiently developed regulatory and methodological documents and manuals necessary for their design, in particular in terms of calculations.

Issues. Current regulatory and methodological documents on the design of corrugated metal road structures lack data on the analytical calculation of such arched structures (there is only a reference to the use of the finite element method). However, such arch-shaped structures made of corrugated metal under the road embankment are a fairly rational alternative to small bridges made of typical massive structures due to more attractive technical and economic indicators.

Purpose and objectives. Providing a proposal for the development of a methodology for simplified analytical calculation of the considered structures, with a list of all the components necessary for its practical use, partially described earlier in separate articles, with the addition of a numerical example of the use of this methodology — is the main purpose and objective of this work.

Research methods and results. Computational and theoretical studies have supplemented the ideas about the features and regularities of the operation of a flexible arch vault (arch, according to the conditions of a plane problem) under a road embankment, which are the basis for calculations, and some clarifications and simplifications have been added (regarding the definition of the equivalent temporary load, regarding the soil resistance scheme, etc.).

Conclusions. The possibility of compiling a methodology for practical calculation of arched road structures made of corrugated metal based on well-known laws of structural mechanics, soil mechanics and underground structures and a simple, understandable calculation scheme, which is close to the scheme of operation of such a structure in full-scale and laboratory conditions, is shown.

Keywords: road, arched structures, bridge, embankment, culvert, corrugated metal, deflection, FEM, soil support, bearing capacity.

УДК 624.014:624.21

Абрамов В. М., канд. техн. наук., доцент, <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>*Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Івано-Франківськ (на період воєнного стану), Україна*

АНАЛІЗ РІЗНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ І ПРОЄКТУВАННЯ ДОРОЖНІХ СПОРУД ІЗ ГОФРОВАНОГО МЕТАЛУ

Анотація

Вступ. Для удосконалення методики проєктування, зокрема в частині розрахунку, об'єктів транспортного будівництва з металевих гофрованих конструкцій (МГК) зі збільшеним розміром отвору (малих мостів і шляхопроводів аркової форми, водопропускних труб під дорожнім насипом), ще порівняно нових в нашій країні, важливо мати більше уявлень про особливості існуючих підходів і їхній вплив на результати.

Проблематика. Чинні в нашій країні норми з проєктування дорожніх споруд з гофрованого металу [1] містять методику аналітичного розрахунку таких споруд тільки у формі круглих труб діаметром до 6 м і вона потребує удосконалення, а споруди інших форм і розмірів цим документом рекомендовано розраховувати методом скінчених елементів (МСЕ). Удосконалювати і доповнювати існуючу нормативну аналітичну методику розрахунку споруд з МГК доцільно маючи більше уявлень про особливості існуючих підходів.

Мета і завдання. Проаналізувати деякі існуючі підходи до розрахунків аркових (та інших) дорожніх споруд з МГК, які прийнято у відповідних нормах і науково-технічній літературі і показати особливості їхнього впливу отримані результати з наданням пропозицій щодо практичного використання різних підходів ті вихідних передумов розрахунку.

Методи досліджень і результати. Розрахунково-теоретичним шляхом проаналізовано особливості впливу різних підходів і вихідних передумов на результати розрахунку дорожніх споруд з МГК, зокрема аркових. Надано пропозиції стосовно вибору підходів, прийняття найбільш адекватної і одночасно простої зрозумілої розрахункової схеми реальної споруди для подальшого удосконалення і доповнення існуючої нормативної методики.

Висновки. Надано характеристику основних з існуючих підходів до розрахунків дорожніх споруд з МГК, встановлено, як вони впливають на отримані результати. На числових прикладах показано наскільки можуть відрізнятися результати розрахунку залежно від прийнятих підходів і вихідних передумов і рівня їх адекватності реальній споруді. Надано й обґрунтовано окремі відповідні пропозиції щодо прийняття підходів до розрахунків і проєктування, які можуть бути корисні під час робіт з удосконалення існуючої нормативної методики.

Ключові слова: автомобільна дорога, арка, міст, несна здатність, опір ґрунту, розрахункова модель, споруди з МГК.

Вступ

Вважаючи на те, що фактично завжди розраховується спрощена модель реальної споруди, тобто її розрахункова схема або модель, тому важливо, щоб рівень адекватності розрахункової моделі відносно реальної споруди був найбільшим. Існують різні підходи до розрахунку споруд з МГК під дорожнім насипом, важливою особливістю яких є сумісна робота гнучких конструкцій і ґрунту. Ґрунт для таких споруд є не тільки основою, а й чинником обмеження деформацій та забезпечення потрібної несної здатності системи «споруда-ґрунт». Ці підходи складаються зі поєднання теоретичних, експериментальних та емпіричних даних.

Для удосконалення чинної нормативної методики розрахунку дорожніх споруд з МГК важливо переглянути і проаналізувати підходи і вихідні передумови, які прийнято в інших існуючих аналогічних нормативних документах, довідниках і науково-технічній літературі.

У роботі [2] було розглянуто методику і один з прикладів розрахунку аркової споруди з МГК, які містяться у довіднику США і Канади [3], наведено її коротку характеристику та порівняння результатів розрахунку за цією методикою і за способом, який викладено у [2, 4].

У даній роботі більш детально розглянуто і проаналізовано методику [3] з порівнянням її основних підходів і вихідних розрахункових передумов з деякими підходами нормативної методики [1] і пропозицій з розрахунку аркових дорожніх споруд з МГК [2, 4].

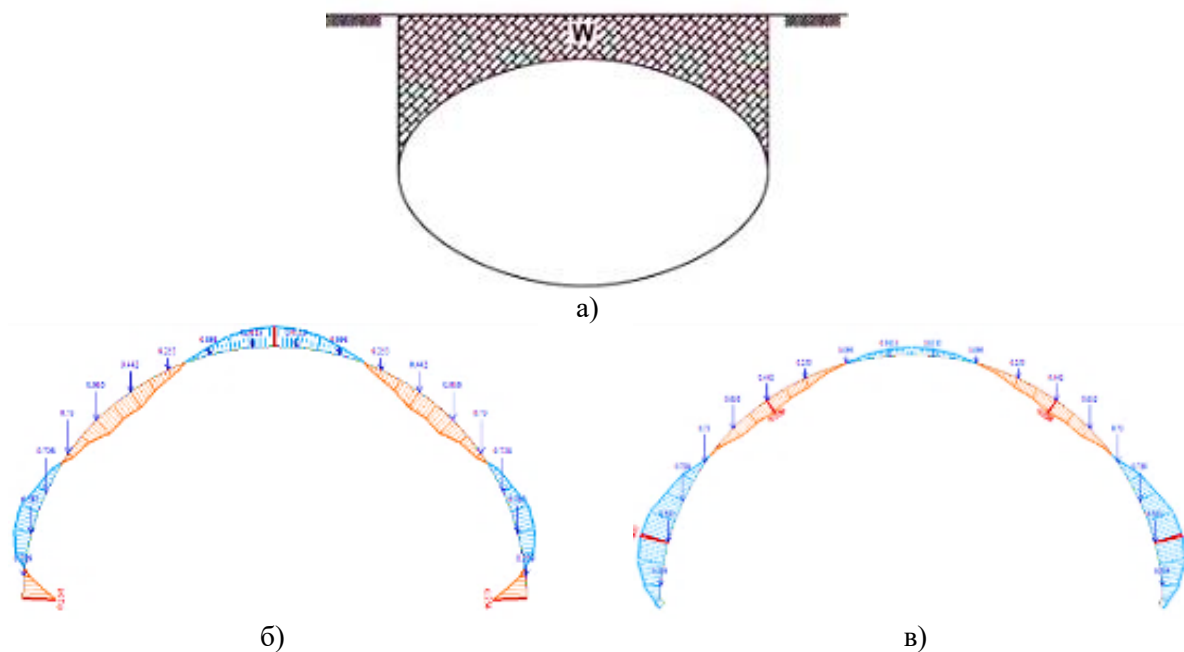
Основна частина

Оскільки спочатку (у кінці 19 століття) дорожні водопропускні споруди з МГК були тільки у формі круглих труб діаметром 1 – 2 м і інколи до 3 м, дослідження і розроблення методів розрахунку виконували саме для таких труб [1]. Сучасний відповідний довідник США і Канади [3], також містить методику розрахунку дорожніх споруд з МГК, яка базується на даних досліджень круглих труб діаметром до 3 м і яку певним чином удосконалено і пристосовано для розрахунків споруд більших розмірів і різних форм отвору, у тому числі й аркової. Процес розрахунку за цим документом складається з визначення наступних параметрів:

- мінімальної висоти засипки над спорудою;
- потрібного ущільнення ґрунту засипки;
- проектного тиску ґрунту на споруду;
- кільцевого (повздожнього) зусилля в стінках споруди;
- стискаючого напруження в стінках;
- мінімальної потрібної жорсткості споруди;
- міцності з'єднань гофрованих конструкцій.

Визначемо деякі із цих параметрів за методикою [3], проаналізуємо з порівнянням з методикою [1] і пропозиціями до складання методики з розрахунку аркових споруд з МГК [2, 4].

Згідно з методикою довідника [3] навантаження на споруду з МГК (у тому числі й аркову) від вертикального тиску ґрунту засипки приймають з урахуванням маси ґрунту не тільки вище, а й нижче рівня верху споруди, у межах всього контуру фігури «W» (рис. 1).



- б) епюра моментів (максимальне значення 2,54 кНм) від маси ґрунту тільки нижче рівня верху споруди при жорсткому обпиранні;
- в) епюра моментів (максимальне значення 3,00 кНм), за шарнірного обпирання.

Рисунок 1 — Схема до визначення навантаження на споруду з МГК від маси ґрунту за методикою [3]

При врахуванні маси ґрунту в межах контуру фігури «W», наприклад, для напівкруглої арки радіусом 3 м з гофрами 152,4 мм × 50,8 мм × 7 мм (відповідно, довжина хвилі, її висота і товщина

металу) при засипки висотою, наприклад, 1,3 м і 5,0 м ґрунтом з питомою вагою 18 кН/м^3 за даними розрахунків максимальний згинальний момент збільшується порівняно з навантаженням тільки від ґрунту вище верху споруди, залежно від умов обпирання і висоти засипки:

— для безшарнірної арки (із жорстким закріпленням п'ят) на 11,4 % за висоти засипки 1,3 м і на 3 % за висоти засипки 5 м;

— для двохшарнірної арки (з шарнірним закріпленням п'ят) на 15,8 % за висоти засипки 1,3 м і на 3,5 % за висоти засипки 5 м.

Дані, які наведено, показують, що вплив навантаження від ґрунту нижче верху споруди значно знижується з підвищенням висоти засипки.

У методі граничних станів, який використовують у будівельному проєктуванні в нашій країні із середини минулого століття, можливі відхилення фактичного значення навантаження на конструкції, зокрема і від тиску ґрунту, компенсуються коефіцієнтом надійності за навантаженням. Згідно з [1] цей коефіцієнт для розглянутої споруди дорівнює 1,3, тобто розрахункове навантаження (а відповідно також і внутрішні зусилля від нього у межах пружності) приймають зі збільшенням його характеристичного (нормативного) значення на 30 %, що перевищує вказане раніше підвищення моменту від навантаження за схемою на **рис. 1, а** [3] (у разі урахування ґрунту нижче рівня верху склепіння).

За методикою довідника [3] експлуатаційну придатність дорожніх споруд з МГК оцінюють за критерієм міцності саме гофрованих конструкцій. Міцність вважають забезпеченою, якщо розрахункові напруження в стінках споруди від внутрішніх зусиль (згинального моменту і повздовжньої сили) не перевищують граничного значення, яке відповідає переходу до появи в якомусь перерізі конструкції пластичних деформацій і пластичного шарніру. Вплив ґрунту дорожнього насипу, який оточує споруду, на її напружено-деформований стан визначають у цій методиці шляхом використання відповідних коефіцієнтів, які зменшують зусилля в конструкціях та їхні деформації. Перевіряють розрахунком також міцність з'єднань гофрованих елементів і згинальна жорсткість (прогин) споруди. Методика [3] доповнюється числовими прикладами розрахунку споруд різних форм отвору, зокрема й арочної. При цьому приймається питома вага ґрунту 22 кН/м^3 і модуль його деформації 12 МПа. Додаються також таблиці зі значеннями мінімальної і максимальної висоти засипки споруди залежно від її геометричних параметрів.

Згідно з даними табл. НС-9 розділу 6 довідника [3] для аркової споруди з вказаними раніше розмірами (радіус 3 м, гофри $152,4 \text{ мм} \times 50,8 \text{ мм} \times 7 \text{ мм}$) максимальна висота засипки складає 13 м. При цьому, вважаючи на основну розрахункову умову у цієї методики, напруження в стінках арки не перевищують допустимого значення і, як наслідок, споруда повинна знаходитися в стані статичної рівноваги.

Враховуючи те, що навантаження від транспортних засобів за висоти засипки більше 10 м втрачає своє практичне значення внаслідок його «розсіювання» в ґрунті (розподілення під кутом 30° від вертикалі), за висоти засипки 13 м ґрунтом з питомою вагою 22 кН/м^3 (як прийнято у [3]) вертикальне навантаження, рівномірно розподілене вздовж прогону, без урахування незначної частини впливу ґрунту нижче рівня верху споруди (збільшення величини моменту всього на 1,47 % порівняно з моментом від висоти засипки 13 м тільки над спорудою) і без урахування дуже незначного, за вказаної висоти засипки, впливу тимчасового навантаження (автомобіля вагою 300 кН [3]) з урахуванням власної ваги конструкцій дорівнює $286,4 \text{ кН/м}^2$.

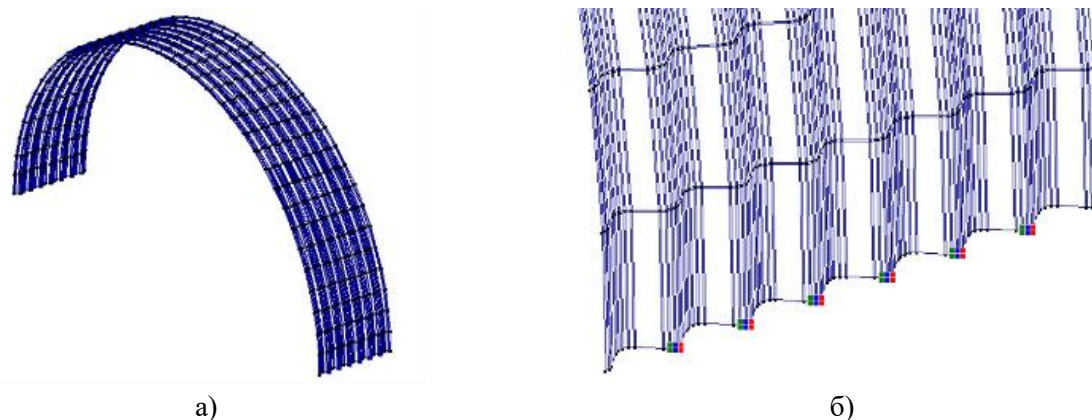
На відміну від [3] згідно з нормами [1] і методикою, запропонованою у [2, 4], постійне розрахункове навантаження на споруду, яка розглядається, приймають тільки від засипки вище верху споруди ґрунтом з питомою вагою для типового проєктування 18 кН/м^3 і з відповідним коефіцієнтом надійності.

Перевіримо несну здатність розглянутої споруди з використанням підходів і вихідних передумов, прийнятих у відповідних нормах нашої країни [1] і в методиці, яку запропоновано і викладено у [2, 4]. У цьому разі розрахункова схема, яку наведено у [2, 4], буде мати інші деякі параметри внаслідок того, що у споруди з обпиранням за схемою, наведеною у [3], максимальні переміщення стінок арки і максимальний згинальний момент виникає в стінках і визначається кутовою координатою, близько 25° від рівня п'ят.

Перерахунок розглянутої аркової споруди за іншими підходами і вихідними передумовами [1, 2, 4] виконано шляхом чисельного моделювання за МСЕ з урахуванням вказаних раніше параметрів форми гофрів.

Шляхом числового моделювання (за МСЕ) роботи розглянутої арки з гофрованого металу з урахуванням форми гофрів (без прийняття умовної прямокутної форми перерізу елементів арки еквівалентної згинальної жорсткості) отримано результати, викладені нижче.

Модель арки зібрано з пластинчастих елементів, а її обпирання прийнято нежорстким (проміжним між жорстким і шарнірним), наближеним до схеми арки відповідно до параметрів гофрів і конструкції опорного вузла, які показано у [3]. При цьому нежорстке закріплення п'ят у схемі арки моделювалося накладанням зв'язків (усуненням можливості лінійних й кутових переміщень) за всіма напрямками тільки у вузлах на вершинах (гребнях) хвиль гофрів зовнішнього боку (рис. 2).

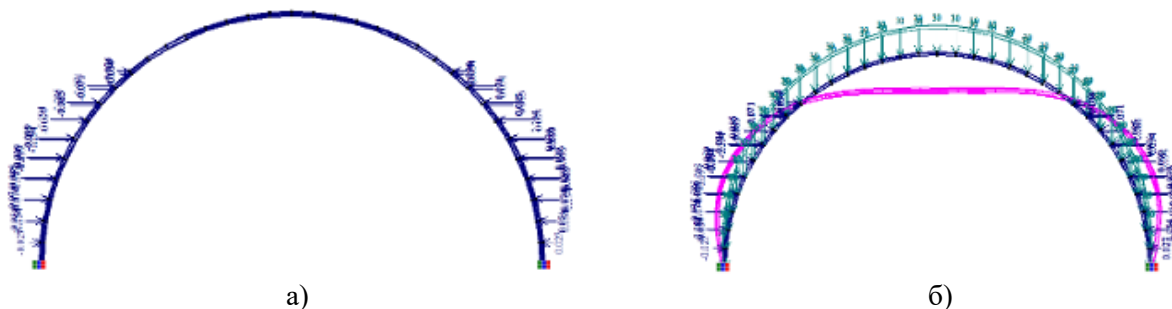


- а) розрахункова модель аркової споруди з МГК;
б) збільшене зображення опорного вузла з розміщенням зв'язків для нежорсткого закріплення.

Рисунок 2 — Розрахункова модель аркової споруди з МГК

Звичайним підбором встановлено, що гранична допустима величина прогину даної арки від дії рівномірно розподіленого вздовж прогону навантаження за критерієм не перевищення напруженнями в конструкціях граничного значення (розрахункового опору металу конструкцій 230 МПа, як у прикладі розрахунку такої арки у [3], складає 53 мм з максимальним горизонтальним переміщенням стінок 36 мм.

Опір ґрунту з модулем деформації 30 МПа (мінімально допустимим за нормами [1]) змодельований прикладанням горизонтальних сил у відповідних вузлах моделі, які визначали пропорційними переміщенням цих вузлів (прийнятих за даними про переміщення вузлів моделі арки за МСЕ з використанням ПК ЛІРА САПР), згідно з методикою [2, 4] (рис. 3).



- а) схема моделювання опору ґрунту прикладанням сил, пропорційних переміщенням;
б) схема роботи арки при дії тиску ґрунту — вертикального активного та горизонтального пасивного опору переміщенням в допустимому деформованому стані.

Рисунок 3 — Схема моделювання опору ґрунту прикладанням сил, пропорційних переміщенням

Несну здатність даної арки в системі «споруда-грунт» визначено як величину навантаження на арку, яке відповідає умовам не перевищення прогином визначеної допустимої величини (53 мм) при пов'язаних з прогином величинах переміщень стінок та пропорційних переміщень стінок, силах опору ґрунту [2, 4] і не перевищення напруженнями в конструкціях розрахункового опору металу (230 МПа). Визначено таким чином, що несна здатність складає 300 кН/м^2 , що має досить малу, допустиму у практичних розрахунках розбіжність (2,4 %) із розрахунковим навантаженням ($307,7 \text{ кН/м}^2$) на арку від засипки висотою 13 м ґрунтом з питомою вагою 18 кН/м^3 , від власної ваги конструкцій та тимчасового навантаження за схемою НК-100 з коефіцієнтами надійності 1,3, 1,05 і 1,1, відповідно для маси ґрунту, власної ваги конструкцій і розрахункового тимчасового навантаження НК-100.

Результати розрахунку розглянутої арки за різних закріплень п'ят (жорсткому, шарнірному і нежорсткому (приблизно проміжному між жорстким і шарнірним), які змодельовані накладанням відповідних зв'язків в опорних перерізах арки) показують, що, за інших рівних умов, найбільш раціональним за критерієм найменших напружень у стінках арки є нежорстке закріплення, змодельоване усуненням можливості лінійних й кутових переміщень за всіма напрямками тільки у вузлах моделі арки на вершинах (гребенях) хвиль гофрів зовнішнього боку (рис. 2). Порівняно з таким нежорстким обпиранням п'ят (яке близьке до конструкції опорного вузла, показаного у [3]) напруження за жорсткого і шарнірного обпирання більше, відповідно на 14,3 % і на 4,8 % (рис. 4 – 6).

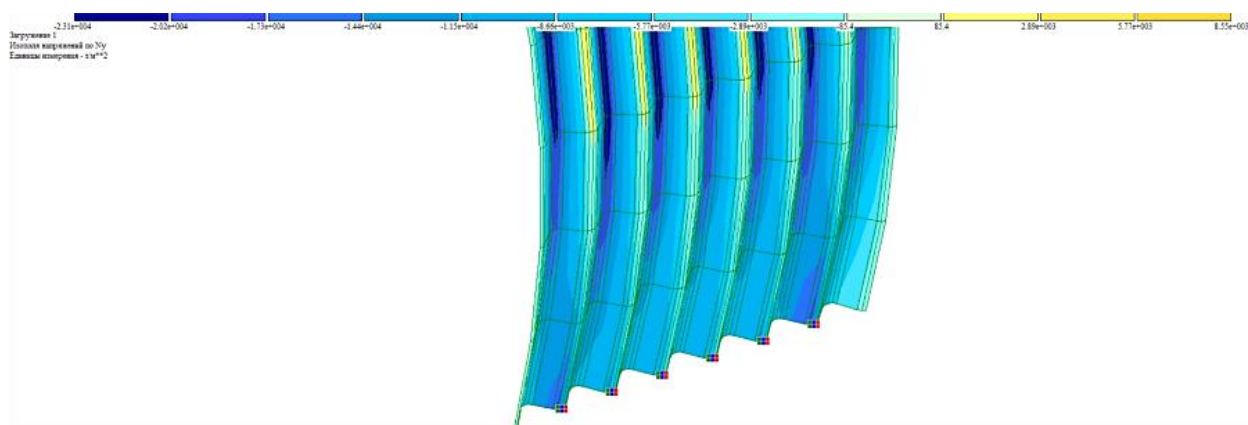


Рисунок 4 — Напруження (ізополя) за нежорсткого закріплення п'ят (максимальне значення – 231 МПа)

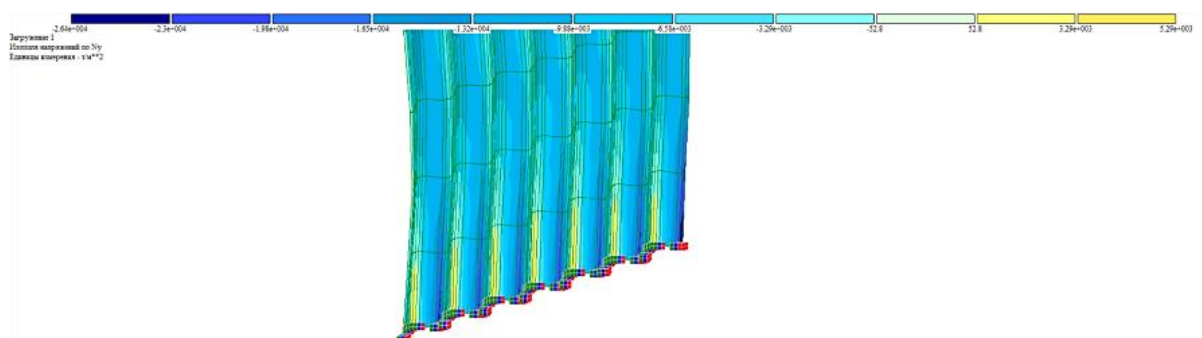


Рисунок 5 — Напруження (ізополя) за жорсткого закріплення п'ят (максимальне значення – 264 МПа)

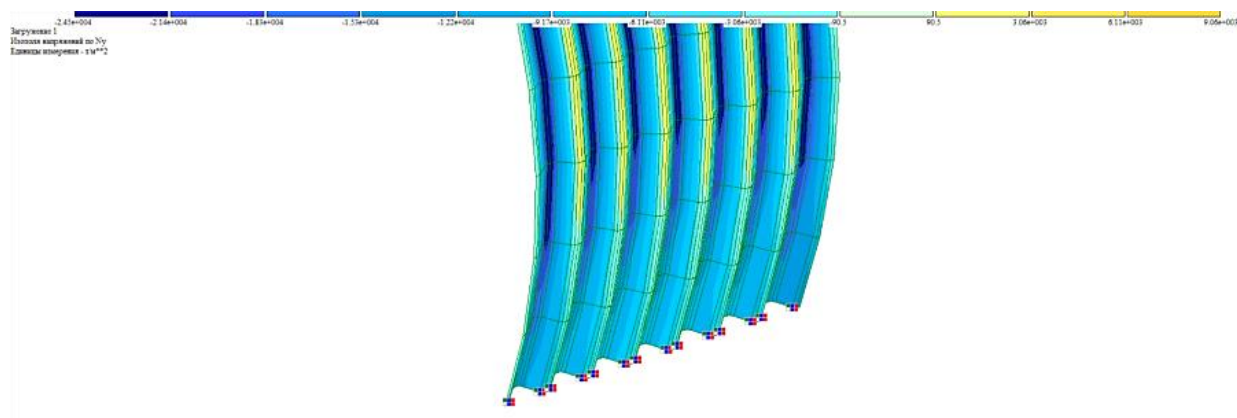


Рисунок 6 — Напруження (ізополя) за шарнірного закріплення п'ят (максимальне значення — 245 МПа)

Висновки

Визначення вертикального навантаження від тиску ґрунту на дорожні споруди з МГК з врахуванням додатково ґрунту вище верху споруди і ґрунту нижче її верху (як прийнято у [3]) для розрахунків методом граничних станів [1, 2, 4] не має практичного значення — це компенсується коефіцієнтом надійності за навантаженням.

За різних підходів до визначення опору ґрунту деформаціям гнучкої споруди з МГК (використанням коефіцієнтів, які знижують згинальний момент і поздовжню силу в стінках споруди [3] і як пасивний опір переміщенням за правилами механіки ґрунтів і будівельної механіки [2, 4]) величини несної здатності, наприклад аркової споруди, досить близькі (у розглянутому в статті прикладі розрахунку розбіжність складає 2,4 %).

За даними розрахунку найбільш раціональним (за критерієм найменших напружень в конструкціях) закріпленням п'ят аркової споруди з МГК, порівняно із жорстким, як розглянуто в [2, 4], або шарнірним, як показано у [1], є нежорстке закріплення, на болтах у вершинах (на гребенях) хвиль гофрів зовнішнього боку (наприклад, як показано у [3]).

Викладені результати аналізу можуть бути корисними для роботи з удосконалення і доповнення чинних норм з проєктування дорожніх споруд з МГК.

Список літератури

1. ВБН В.2.3-218-198:2007 Споруди транспорту. Проєктування та будівництво споруд з металевих гофрованих конструкцій на автомобільних дорогах загального користування. Київ, 2007. 49 с. (Інформація та документація).
2. Абрамов В. М. Порівняння способів розрахунку аркових споруд з гофрованого металу під дорожнім насипом. *Вісник НУВГП. Технічні науки* : зб. наук. праць. Рівне : НУВГП, 2024. Вип. 3(107). С. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt3202424>.
3. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. American Iron and Steel Institute. Washington, DC, USA. Canadian Edition. Corrugated Steel Pipe Institute. Cambridge, Ontario, Canada, 2010. 470 p.
4. Абрамов В. М. Аналітичні і скінчено-елементні розрахунки дорожніх споруд різних форм з гофрованого металу за деформаційним критерієм. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 31. С. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.234>.

References

1. VBN V.2.3-218-198:2007 Sporudy transportu. Proektuvannya ta budivnyctvo sporud z metalevikh hofrovanykh konstrukcy na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannya. (VBN V.2.3-218-198:2007 Transport structures. Design and construction of structures from metal corrugated structures on public highways). Kyiv, 2007. 49 p. [in Ukrainian].
2. Abramov V. M. Porivnyannya sposobiv rozrakhunku arcovykh sporud z hofrovanoho metalu pid dorozhnim nasypom (Comparison of methods for calculating arch structures made of corrugated

metal under road embankments). *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky: zb. nauk. prats. Rivne*: 2024. Vyp. 3(107). P. 237–246. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt3202424> [in Ukrainian].

3. Handbook of Steel Drainage and Highway Construction Products. American Iron and Steel Institute. Washington, DC, USA. Canadian Edition. Corrugated Steel Pipe Institute. Cambridge, Ontario, Canada, 2010. 470 p. [in English].

4. Abramov V. M. Analitichni i ckincheno-elementni rozrahunky dorozhnikh sporud riznykh form z hofrovanoho metalu za deformatsynym kryteriem. (Analytical and finite element calculations of road structures of different forms from corrugated metal according to the deformation criterion). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2025. Issue 31. P. 234–243. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.234> [in Ukrainian].

Volodymyr Abramov, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6911-5178>

Donbas National Academy of Construction and Architecture, Ivano-Frankivsk (for the period of martial law), Ukraine

ANALYSIS OF DIFFERENT APPROACHES TO THE CALCULATION AND DESIGN OF ROAD STRUCTURES FROM CORRUGATED METAL

Abstract

Introduction. In order to improve the design methodology, particularly in the calculation of transport construction objects made of metal corrugated structures (MCS) with increased hole size (small bridges and arch-shaped overpasses, drainage pipes under road embankments), which are still relatively new in our country, it is important to have a better understanding of the features of different approaches to calculation and their impact on the results.

Problem Statement. The current regulatory and methodological documents in our country concerning the design of road structures made of corrugated metal [1] include a methodology for analytical calculation of such structures only in the form of round pipes with a diameter of up to 6 meters and it requires improvement, while structures of other shapes and sizes are recommended to be calculated using the finite element method (FEM). It is advisable to improve and supplement the existing normative analytical methodology for calculating structures made of corrugated metal with a better understanding of the characteristics of existing approaches.

Purpose. To analyze some existing approaches to the calculations of arch (and other) road structures with the help of finite element methods, which are accepted in the relevant standards and scientific-technical literature, and to show the peculiarities of their influence on the results obtained, along with providing proposals for the practical use of various approaches and the initial assumptions of the calculations – this is the goal and objectives of this article.

Research methods and results. The characteristics of the influence of different approaches and initial prerequisites on the results of the calculation of road structures with MCS, in particular arches, were analyzed using a computational-theoretical method. Suggestions were provided regarding the choice of approaches, as well as the adoption of the most adequate and simultaneously simple and understandable calculation scheme for a real structure for further improvement and enhancement of the existing regulatory methodology.

Conclusions. The characteristics of the main existing approaches to the calculations of road structures with MCS have been provided, and it has been established how they affect the obtained results. Numerous examples demonstrate how much the calculation results can differ depending on the chosen approaches and initial assumptions, as well as their adequacy to the real structure. Specific relevant proposals regarding the adoption of approaches to calculations and design, which may be useful in improving the existing regulatory methodology, have been provided and justified.

Keywords: road, bridge, structures with MCS, arch, calculation model, ground supports, bearing capacity.

УДК 625.745.1

Гаркуша М. В., канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна

**ЗАХИСТ БЕТОННИХ ТА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
ТРАНСПОРТНОГО ТА ГІДРОТЕХНІЧНОГО БУДІВНИЦТВА
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТІВ****Анотація**

Вступ. Надійний гідроізоляційний захист є однією з умов забезпечення довговічності транспортних та гідротехнічних споруд. Проте серед домінуючих причин руйнування транспортних та гідротехнічних споруд є передчасне руйнування гідроізоляції, яка є одним із найменш довговічних елементів прогонової будови.

Гідроізоляційна система, що застосовується для захисту бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва повинна мати надійність, що представлено у виконанні необхідних функцій в умовах експлуатації протягом заданого часу при збереженні основних характеристик, мати максимально близький до конструкцій, що ізолюються, термін служби.

Гідроізоляційні матеріали мають дві взаємопов'язані характеристики: внутрішньою будовою і якісними показниками. Взаємозв'язок встановлюється при оптимальних структурах, коли стійкі зв'язки в них забезпечують стабільність основних властивостей при різних зовнішніх і внутрішніх змін матеріалу в конструкціях. Внутрішня будова, або структура, гідроізоляційних матеріалів виражає певний характер зв'язків та порядок зчеплення частинок, з яких вони утворені.

Найбільш досконалими з точки зору забезпечення захисту плити є рідкі композитні мембрани на основі поліуретанових і метилметакрилатних смол. Мембранні покриття утворюють суцільну безшовну конструкцію на поверхнях складної форми, так як їх нанесення проводиться методом розпилення рідини.

Дослідження впливу різних факторів на довговічність гідроізоляційних мембран на основі метилметакрилатної є необхідною складовою для розроблення технології влаштування гідроізоляційних мембран на основі метилметакрилатної смоли на транспортних та гідротехнічних спорудах та встановлення вимог до них.

Проблематика. Встановлено, що існує необхідність в узагальненні існуючих підходів захисту бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва та розроблення рекомендацій щодо улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли.

Мета. Мета наукової роботи полягає у дослідженнях спрямованих на узагальненнях із захисту бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва із застосування метилметакрилатів, що улаштовуються у вигляді гідроізоляції споруд.

Результати. На основі проведених досліджень узагальнено існуючі підходи застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних та гідротехнічних спорудах та розроблено рекомендацій щодо улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли.

Висновки. В роботі наведено рекомендації з підготовки поверхні транспортних та гідротехнічних споруд для улаштування гідроізоляційної системи, які доповнюють діючі нормативні документи України, основні технологічні операції та особливості улаштування гідроізоляційної системи.

Ключові слова: автомобільні дороги, автодорожній міст, гідроізоляція, гідроізоляційна мембрана, довговічність, мостове полотно, метилметакрилат, транспортна споруда.

Актуальність роботи

У 1920-х роках в Європі та США, почали використовувати відносно примітивні гідроізоляції на бетонних спорудах транспортного та гідротехнічного будівництва, в тому числі і мостів. З 1940-х років до 1950-х років, з розгортанням масштабного будівництва автомобільних доріг розпочалося масове

застосування різноманітних гідроізоляційних систем, однак виявилося, що застосування ефективних гідроізоляційних систем досить складна справа. У 1960-х роках внаслідок накопичення знань, а також роботи мостового покриття в агресивних середовищах, здебільшого від дії солей, з'явилася концепція водонепроникної системи, з'являються методики дослідження гідроізоляції [1].

Системи гідроізоляції мостів на основі рідкого полімеру (німецька мова — Flüssigkunststoff (FLK)) були впроваджені приблизно одночасно із системами гідроізоляції мостів з використанням полімерно-бітумних гідроізоляційних мембран [2].

Віадук Грюєр (Viaduc de la Gruyère) був побудований між 1974 і 1979 роками (рис. 1).



Рисунок 1 — Віадук Грюєр, Швейцарія [3]

Його гідроізоляція була виконана за допомогою рідкого полімеру Efkaprene S3. Полімерно-бітумні гідроізоляційні мембрани вперше були широко використані у 1978 році на віадукі Беккенрід-Ленен (Lehnenviadukt Beckenried) (рис. 2).



Рисунок 2 — Віадук Беккенрід-Ленен, Швейцарія [4]

У 1976 році у США в Національній програмі спільних досліджень автомобільних доріг (NCHRP) запропоновано випробування ефективності гідроізоляційного матеріалу [5].

Хоча полімерно-бітумні гідроізоляційні мембрани згодом розширилися та зберегли свої позиції як системи гідроізоляції для мостів (бетонних та металевих елементів), рідко-ін'єкційні полімерні гідроізоляційні системи з того часу стали нішевим рішенням, тимчасово займаючи значну частку ринку.

Спочатку системи на основі розчинених полімерів (Efkarene S3) були в центрі уваги у Швейцарії, а також у Німеччині. Рідкі полімери на основі реактивних речовин були розроблені та використані з початку 1980-х років [2]. Цей розвиток частково був пов'язаний з не зовсім позитивним досвідом використання систем на основі розчинених полімерів (наприклад, утворення бульбашок на покритті віадука Грюер), а частково з досягненнями в хімії поліуретанів, які дозволили розробити «оригінальний» тип поверхневої гідроізоляції. Після розробок 1980-х років було опубліковано та переглянуто в 1995 році ZTV-BEL-B Частина 3/87 [6], перший звід правил у німецькомовних країнах щодо гідроізоляції мостів з рідких полімерів, ZTV-BEL-B Частина 3/95 [7].

Частка ринку гідроізоляції мостів з рідких полімерів у Швейцарії сьогодні переважно становить до 5 %. У Німеччині, де з точки зору Швейцарії очікувалася відносно висока частка ринку, зараз вона становить лише 1 %.

Таким чином, можна зробити висновок, що, незважаючи на значний інтерес, виявлений адміністративними органами та будівельними органами, гідроізоляція мостів та гідротехнічних споруд, що наноситься рідким способом, не мала значного успіху. Окрім частково негативного досвіду використання рідкої гідроізоляції, це також було пов'язано з вищими виробничими витратами на рідку гідроізоляцію порівняно з полімерно-бітумними гідроізоляційними мембранами.



Рисунок 3 — Віадуку Беккенрід-Ленен, Швейцарія [4]

У Великій Британії рідка гідроізоляція також була розроблена та введена як система гідроізоляції мостів у середині 1970-х років після досліджень щодо придатності систем гідроізоляції мостів, що використовувалися на той час. Однак виробники застосували інший хімічний підхід та розробили рідку гідроізоляцію на основі ПММА (поліметилметакрилату). У Великій Британії, на відміну від материкової Європи, цей початок призвів до домінуючої частки ринку рідких гідроізоляційних систем [2].

1 січня 2005 року набрав чинності стандарт SN 640 450: 2005 «Гідроізоляційні системи та бітумні шари на бетонних мостах» [8]. Цей стандарт дозволяє два еквівалентні типи гідроізоляційних систем: гідроізоляційні системи з гідроізоляційним шаром з полімерно-бітумних герметичних мембран та гідроізоляційні системи з гідроізоляційним шаром з рідкого пластику. Це було продовжено в SN 640 450a: 2009, який набрав чинності 1 січня 2009 року [9].

На відміну від стандарту, Федеральне дорожнє управління Швейцарії (Bundesamt für Strassen ASTRA) не дозволило використання гідроізоляційних систем FLK у своїх правилах «Керівні принципи

щодо конструктивних деталей мостів, розділ 5: Гідроізоляція та дорожні покриття» (з переглядом 2005 року) [10].

У своїх правилах ASTRA зазначає: «Використання гідроізоляційних систем FLK на всю поверхню ставить дуже високі вимоги до матеріалу та застосування». Наразі ущільнювачі FLK використовувати не можна. Після ратифікації Керівних принципів EOTA, ASTRA буде прийняте рішення щодо використання гідроізоляції FLK.

Розділ 5 з того часу не переглядався, і навіть після введення Керівних принципів EOTA, ASTRA продовжує загалом не дозволяти FLK як гідроізоляцію для мостів.

Розробка Посібника EOTA розпочалася у грудні 2000 року, а Посібник набув чинності у липні 2010 року як ETAG 033 [11]. Властивості, необхідні в ETAG 033, були обрані на основі національних потреб, а також технічних вимог, щоб мінімізувати вразливість до ризику гідроізоляційних систем FLK та передбачити термін служби щонайменше 25 років.

З введенням ETAG 033 технічне схвалення гідроізоляційних систем FLK для мостів регулюється однаково по всій Європі. Технічне схвалення, надане однією країною, також дійсне в усіх інших країнах. Однак, чи можна його застосовувати, залежить від того, чи відповідає продукт також національно визначеним вимогам для відповідного об'єкта. У Швейцарії SN 640 450 «Гідроізоляційні системи та бітумні шари на бетонних мостах» було переглянуто та адаптовано до властивостей, визначених ETAG 033 щодо рідких гідроізоляційних систем.

Таким чином, чинний стандарт SN 640 450a: 2009 забезпечує поточну основу для використання рідких гідроізоляційних систем на мостах та гідротехнічних спорудах транспортного будівництва.

Протягом кількох років рідкі гідроізоляційні системи у Швейцарії все частіше базуються на полімерах РММА (поліметилметакрилат) та РUA (полісечовина) замість PU (поліуретан). Як і у випадку з PU, для РММА та РUA мало даних щодо взаємозв'язку між адгезійними властивостями та погодними умовами під час використання рідких гідроізоляційних систем та в часовому інтервалі між рідкими гідроізоляційними системами та укладанням мастикового асфальтобетону [2].

На сьогоднішній день, гідроізоляційні системи на основі метилметакрилатної смоли широко застосовуються на транспортних та гідротехнічних спорудах в Україні та світі (рис. 3 – 8).

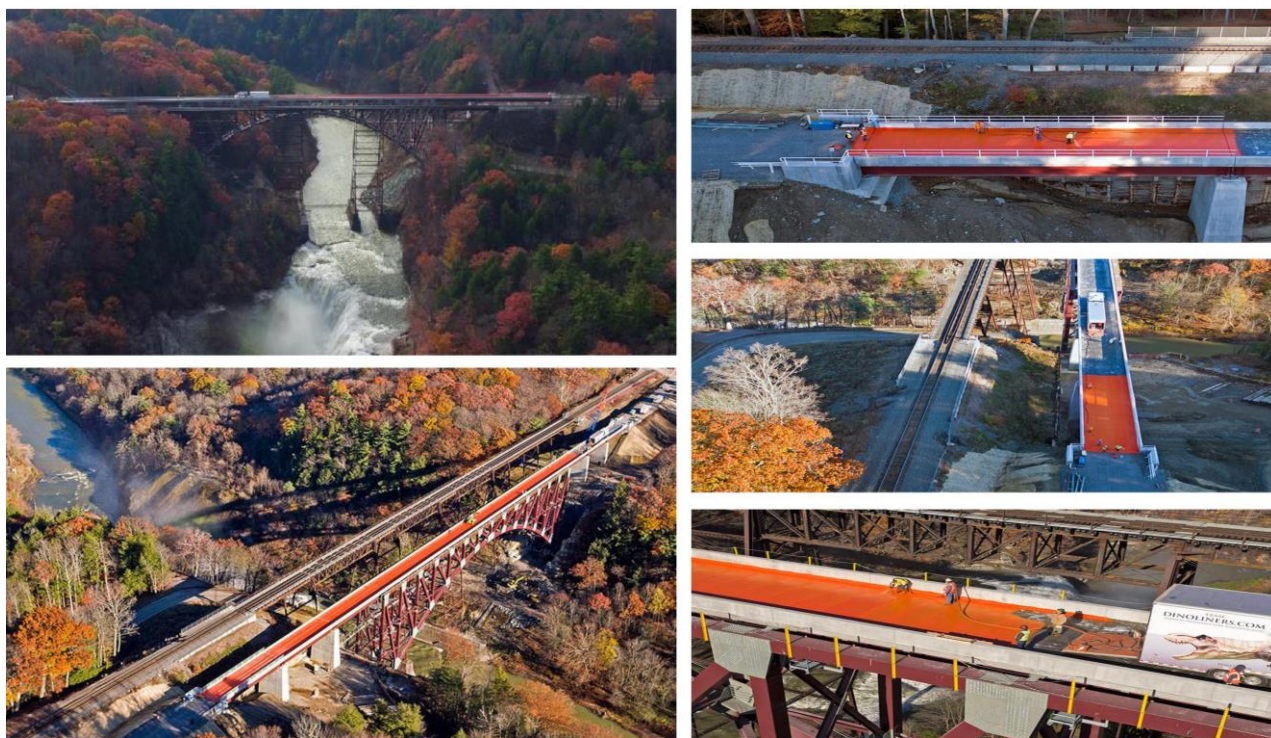


Рисунок 4 — Міст Портаджвіль (Portageville Bridge) м. Портеджвіль, штат Нью-Йорк, США, 2017 р. (побудований 1875 р.) [12]

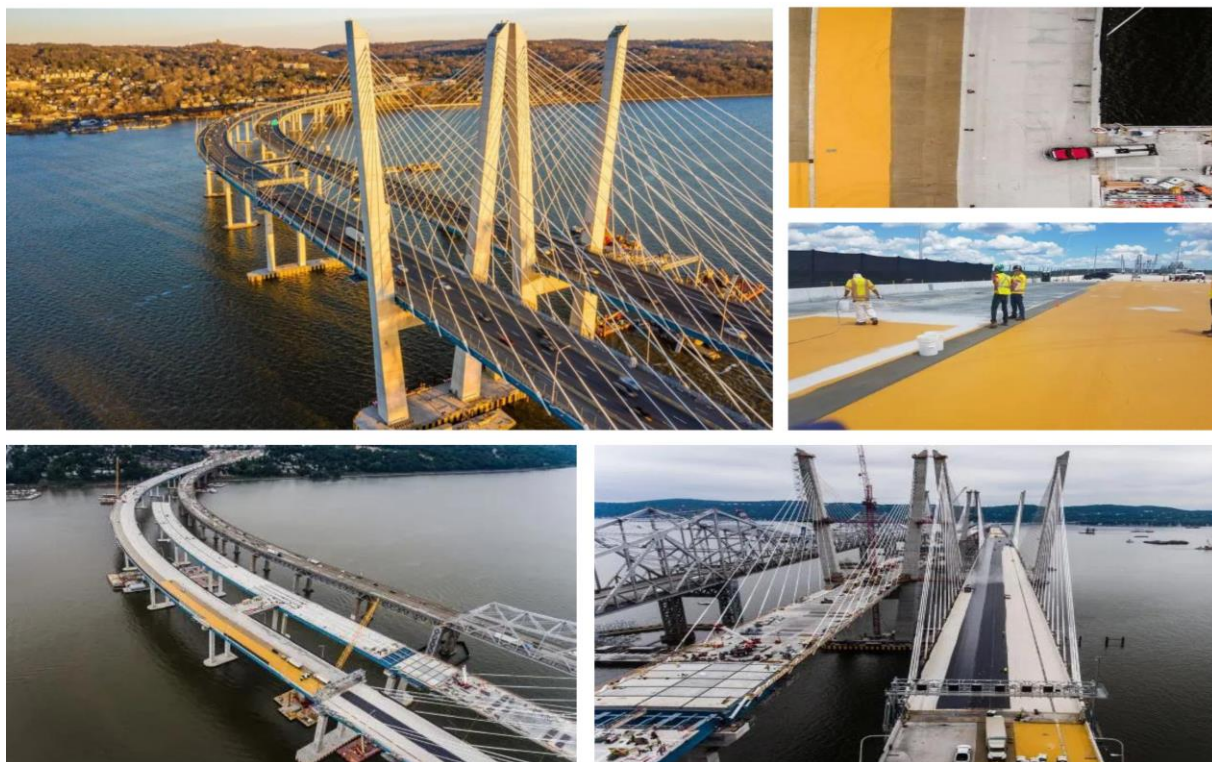


Рисунок 5 — Міст ім. губернатора Маріо М. Куомо (Governor Mario M. Cuomo Bridge) через р. Гудзон, м. Терітаун, штат Нью-Йорк, США, 2018 р. [13]

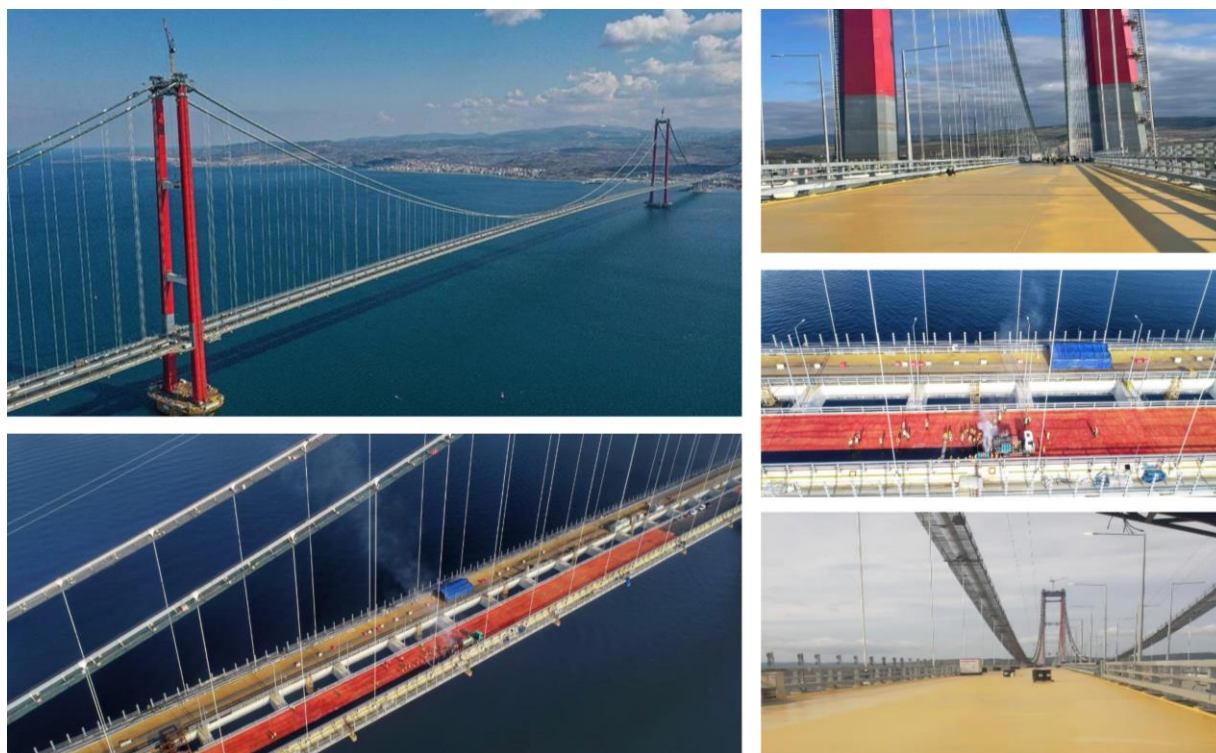


Рисунок 6 — Міст Чанаккале 1915 (1915 Çanakkale bridge) через протоку Дарданели, Туреччина, 2022 р. [14]



Рисунок 7 — Аварійно – відновлювальні роботи на мості на автомобільній дорозі М-06 Київ-Чоп км 831+711 через р. Тису, Закарпатська область, Україна, 2021 р. [1]

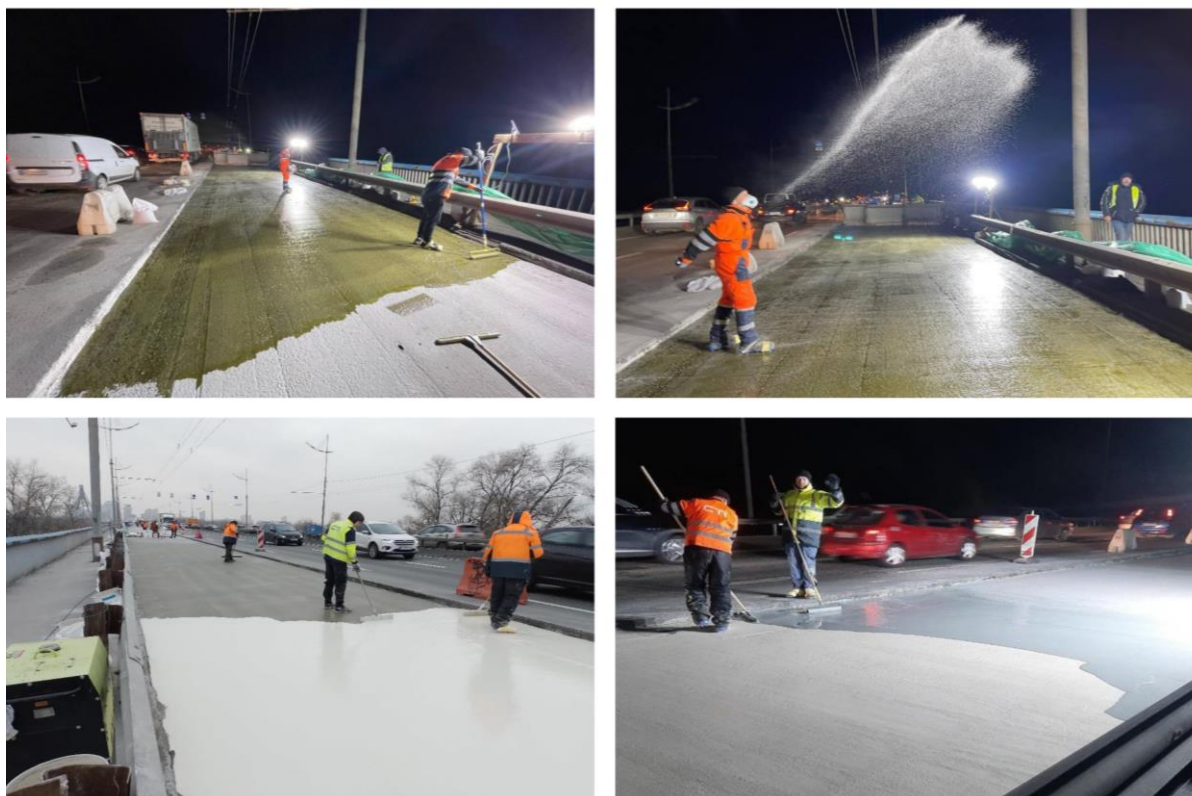


Рисунок 8 — Міст через р. Десенка, м. Київ, Україна, 2022-2023 рр. [1]

Тому, проведення досліджень захисту бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва із застосування метилметакрилатів є актуальним та необхідним.

Викладення основного дослідження

Гідроізоляція бетонних та металевих конструкцій транспортного та гідротехнічного будівництва із застосування метилметакрилатів повинна бути безперервною та водонепроникною по всій ізолюваній поверхні, у сполученнях з конструктивними елементами, конструкціях деформаційних швів, еластичною за мінусових температур; теплостійкою в умовах літніх температур, стійкою під час влаштування асфальтобетону або литого асфальтобетону із застосуванням полімерно-бітумних в'язучих, здатною сприймати будь-які типи механічних впливів та навантаг, що виникають під час будівництва та експлуатування споруди [1, 15].

Виконана за проектом гідроізоляція повинна бути:

- водонепроникною по всій поверхні, яку ізолюють, у місцях сполучення з водовідвідними трубками та конструкціями деформаційних швів;
- герметичною у місцях примикань до тротуарів та інших виступаючих елементів;
- міцно зчепленою із ізолюваною поверхнею і зберігати міцність зчеплення за зсуву;
- міцною і зберігати еластичність у часі та інтервалі розрахункових температур;
- монолітною та безперервною, без здуття, бульбашок та хвилястості;
- цілісною та зберігати гідроізоляційні властивості, не ушкоджуватись у разі тривалих впливів постійної та тимчасової навантаги і можливих деформацій цементобетону у разі виникнення на ізолюваній поверхні тріщин з розкриттям, допустимих нормами проектування (розкриттям до 0,3 мм) відповідно до вимог нормативних документів;
- здатною перекривати тріщини;
- хімічно та біологічно стійка та стійка до проникнення хлорид-іонів;
- тепло та морозостійка, вплив теплової навантаги не повинен істотно впливати на показники матеріалу;
- без компонентів, які спричиняють корозію цементобетону та металу.

Гідроізоляцію влаштовують за технологією у вигляді системи, що складається з (двох, без зчипного шару, у випадку застосування гідроізоляції не під асфальтобетонним покриттям транспортної чи гідротехнічної споруди) трьох міцно пов'язаних між собою хімічно однорідних шарів [9, 16, 17]:

- нижній шар — ґрунтовка (праймер), товщина сухої плівки (0,30 – 0,75) мм — антикорозійне полімерне покриття з високою адгезією до поверхні бетону чи металу та до проміжного шару, забезпечує для бетонних поверхонь закриття пор, зміцнення поверхневого шару бетону, адгезію матеріалу до основи, знепилювання, а для металевих поверхонь — антикорозійний захист металевої поверхні від окислення після абразивоструминного очищення та адгезію гідроізоляційного матеріалу до основи. Ґрунтовка може містити зчипний шар з мінерального матеріалу;
- проміжний шар — гідроізоляційна мембрана — одно або багато шарове, високоеластичне водонепроникне безшовне покриття, товщина сухої плівки (2,0 – 3,0) мм, яка забезпечує водонепроникність по всій поверхні, що гідроізолюється;
- поверхневий зчипний шар — зносостійкий, тріщиностійкий, хімічно та атмосферостійкий, у тому числі до дії ультрафіолетових променів, покрив, що забезпечує адгезію матеріалу гідроізоляційної мембрани з ущільненим або литим асфальтобетоном проїзної частини транспортної чи гідротехнічної споруди.

До початку нанесення гідроізоляційної системи виконують такі заходи:

- на ділянці виконання робіт завершують загальнобудівельні роботи;
- забезпечують об'єкт усіма необхідними гідроізоляційними матеріалами;
- перевіряють відповідність похилів поверхні, на яку гідроізоляція наноситься, проектним величинам;
- перевіряють надійність системи водовідведення;
- забезпечують сухість поверхні, на яку гідроізоляція наноситься;
- готують до роботи установку безповітряного розпилення;
- проводять інструктаж на робочому місці;
- запобігають пересуванню працівників та механізмів по нанесених шарах гідроізоляції.

Гідроізоляційна мембрана це проміжний шар, що утворюється в результаті полімеризації двокомпонентного полімеру на основі акрилових мономерів, модифікованих уретаном. Під час додавання каталізатора відбувається повна полімеризація мономерів. Заполімеризований матеріал

являє собою високоеластичний водонепроникний безшовний покрив з високими характеристиками тріщиностійкості.

Гідроізоляційна мембрана не повинна містити компонентів, що викликають корозійне руйнування металу чи бетону.

Показники фізико-технічних властивостей гідроізоляційної мембрани наведено в **табл. 1**.

Таблиця 1

Показники фізико-технічних властивостей гідроізоляційної мембрани

Назва показників	Нормативні значення показників
Колір та вид	Після висихання утворює рівне, однорідний покрив білого, сірого чи жовтого кольори
Діапазон температур нанесення, °C	5 — 30
Життєздатність за 20 °C, хв не менше ніж	15
Час полімеризації за 20 °C, хв, не менше ніж	60
Час висихання до ступеня 3, хв:	
30 °C, не менше ніж	30
20 °C, не менше ніж	60
10 °C, не менше ніж	90
5 °C, не менше ніж	180
Щільність, в рідкому стані, г/см ³ , не менше ніж	1,1
Водопоглинання, % за масою, не більше ніж	1,0
Міцність на розрив, МПа, не менше ніж	10,0
Відносне подовження на розтягування (еластичність), %, не менше ніж	100
Теплостійкість, не менше ніж, °C	230
Міцність зчеплення з основою, МПа, не менше ніж	
— бетонна	0,3
— сталева	0,3
Міцність на удар, не менше ніж, см	30
Хімічна стійкість — стійкість до дії кислих, лужних, сольових розчинів і нафтопродуктів	Стійкі
Морозостійкість (за температури 25 °C)	Витримує навантагу
Рекомендована товщина сухої плівки кожного шару в двошаровому покритті, E ₅ згідно з ДСТУ EN 1062-1, мкм, не менше ніж	1 000
Рекомендована товщина сухої плівки в одношаровому покритті, E ₅ згідно з ДСТУ EN 1062-1, мкм, не менше ніж	2 000

Перед початком гідроізоляційних робіт бетонна та сталева основа під гідроізоляцію повинна відповідати вимогам нормативних документів.

Поверхня повинна бути сухою, не містити мастильних матеріалів, жиру, частинок, які відшаровуються, цементного молока, пухких матеріалів, бруду, не мати ознак вторинної корозії.

Під час очищення поверхні треба контролювати температуру, вологість та точку роси перед початком кожної зміни та двічі на зміну. Температура навколишнього середовища контролюється на відстані не більше ніж 2 м від поверхні, що очищається. Температура сталевих поверхні, за якою можуть виконуватися абразивоструминні роботи, повинна бути на 3 °C вище за точку роси.

Пил, що утворився під час абразивоструминного очищення, повинен бути видалений з поверхні відразу після абразивоструминного очищення за допомогою стисненого повітря за допомогою компресора. Кількість та розмір частинок не повинні перевищувати розрахункову величину згідно з ДСТУ ISO 8502-3 (тест на пиловміст) [19].

Після відповідної підготовки поверхні з неї повинні бути видалені продукти очищення.

Після того як основа буде очищена треба звести до мінімуму переміщення по ній працівників та техніки, щоб уникнути забруднення. У тих випадках, коли на очищених ділянках використовуються транспортні механізми, треба робити перевірки на наявність витоків палива або мастил. Компресори з витоками потрібно замінити. Якщо це не представляється можливим, витoki на полотні треба локалізувати. Якщо компресори будуть використовуватися для живлення повітряної трубки для обдування поверхні на будь-якій стадії виконання робіт, вони компресори повинні бути оснащені мастило-водяним фільтром.

Роботи з влаштування гідроізоляції розпочинають після одержання висновка генпідрядника на відповідність поверхні транспортної чи гідротехнічної споруди вимогам відповідних стандартів.

До початку виконання робіт рекомендується виконати підтвердження сумісності обраних технологічних процесів на тестових поверхнях в репрезентативних ділянках.

Перед тим, як почати нанесення гідроізоляції, підрядник повинен перевірити адгезію гідроізоляції з основою вибірково нанесенням невеликих ділянок даної гідроізоляції, включаючи нанесення ґрунтовки, що дозволяє встановити адгезійну міцність на відрив. Треба виконати щонайменше п'ять випробувань на кожні 500 м². На менших за площею мостах треба отримати не менше шести результатів випробувань.

Вибірковий контроль повинен включати усі варіанти якості підготовки поверхні.

Час висихання рідких гідроізоляцій визначають згідно з ДСТУ ISO 9117-1 [20].

Міцність зчеплення під час розтягу на відрив на поверхні цементобетонної основи визначають згідно з ДСТУ EN 1542 [21].

На бетонних та металевих основах на яких буде здійснюватися автомобільний рух, рекомендовано, щоб мінімальна міцність на відрив складала не менше ніж 2,1 МПа.

На бетонних та металевих основах на яких буде здійснюватися пішохідний рух, рекомендовано, щоб міцність на відрив складала не менше ніж 1,5 МПа.

Усі результати треба відображати в журналі обліку матеріалів і контролю якості. Також треба зареєструвати характер пошкодження.

Під час улаштування гідроізоляційної мембрани методом безповітряного розпилення рекомендовано влаштовувати два шари з метою досягнення товщини сухої плівки покриття кожного шару не менше ніж 1,0 мм або один шар з товщиною сухої плівки не менше ніж 2,0 мм.

Витрата матеріалу може змінюватись в залежності від текстури основи, але зазвичай складає (1,8 — 1,9) кг/м² для кожного шару під час нанесення у два шари та (3,6 — 3,8) кг/м² за нанесення в один шар, що відповідає товщині мокрого шару покриття (1,2 — 1,3) мм та (2,4 — 2,6) мм відповідно.

Гідроізоляційна мембрана складається з двох компонентів: компонента А, компонента В та порошкового каталізатора, що поставляється в строго дозований кількості, готовий для приготування суміші за місцем. Безпосередньо перед використанням обидва компоненти А і В треба ретельно перемішати за допомогою електричного міксера (150 — 300) об/хв з спіралеподібною насадкою.

У компоненти треба додати порошкового каталізатора в співвідношенні рекомендованим виробником і ретельно вимішати суміш механічним міксером не менше ніж 5 хв до повного розчинення в компоненті В.

З моменту додавання каталізатора компонент переходить у нестійкий стан. Щоб уникнути його передчасного застигання, отриманий розчин треба використовувати у межах його життєздатності.

Час життєздатності компонента В з доданим до нього порошковим каталізатором для кожної конкретної температури треба вважати максимальним часом між внесенням каталізатора у компонент В і часом закінчення нанесення гідроізоляційної мембрани.

Рекомендовано наносити гідроізоляційну мембрану ручним способом (валиком, щіткою) під час ремонтування окремих ділянок.

У такому разі рівна кількість компонентів А і В змішується в окремій ємності та ретельно перемішується. Отримане суміш наносить з допомогою шпателя.

Забороняється додавати порошковий каталізатор у компонент А, оскільки його додавання викликає реакцію, що тягне за собою негайну полімеризацію компонента А та перехід його в гелеподібний стан.

Не дозволяється використовувати розчинник для розведення матеріалів.

Витрату матеріалу потрібно постійно контролювати. Загальну вагу використаного матеріалу в порівнянні з покритою сумарною площею реєструють у журналі виконання робіт.

Треба використовувати маскувальну стрічку, захисні листи або інші доступні засоби для обмеження зон розпилення.

Гідроізоляційну мембрану наносять в один або два шари. Перший шар мембрани фарбують жовтим або сірим пігментом, а другий шар — білим чи сірим.

Перший шар мембрани наносять не раніше, ніж після закінчення мінімального часу висихання ґрунтовки.

Ґрунтовка має обмеження за максимальним часом до нанесення першого шару гідроізоляційної мембрани, що становить 96 год.

Якщо поверхня ґрунтовки волога через опади, то перед нанесенням мембрани поверхню потрібно висушити. Сушіння виконують струменем стиснутого повітря від компресора. Показником відсутності вологи на поверхні є відсутність вологих плям під час протирання за допомогою промокального паперу. Для сушіння поверхні, покритої ґрунтовкою, треба уникати відкритого вогню чи гарячого повітря.

Компонент А та компонент В у пропорції повинні розпилюватися з використанням обладнання з безповітряним розпиленням, яке дозує компонент А та компонент В пропорції 1:1, і змішує їх спільно в системі подачі компонентів. Не дозволено змішувати компонент А та компонент В у ємностях до проходження через розпилювальний апарат, крім випадків ремонтування дефектів ручним способом за допомогою шпателя, коли компоненти змішуються в невеликій кількості в окремій тарі.

Тиск на виході з насоса має бути таким, щоб забезпечувати задовільний смолоскип розпилення, але не надто високий, щоб не допустити сповзання або хвилястість матеріалу.

Максимальний тиск на виході має бути від 7,0 МПа до 11,5 МПа. Розпилення має бути безперервним. У разі затримок під час розпилення потрібно промити систему розчинником (ацетон), щоб уникнути гелеутворення у шлангах або насосі, що може призвести до його поломки.

Товщину гідроізоляційної мембрани, за необхідності, збільшують за згодою інженера-інспектора щодо фарбування. Установлену товщину потрібно постійно перевіряти під час нанесення і зберігати до краю гідроізоляційної мембрани.

Не дозволяється витончувати до нульової товщини край гідроізоляційної мембрани.

Треба наносити її до краю, зберігаючи задану товщину.

Після висихання першого шару гідроізоляційної мембрани треба візуально перевірити щодо виявлення можливих дефектів. Виявлені дефекти ремонтують згідно з додатком Б та наносять другий шар після до їх повного затвердіння.

Другий шар гідроізоляційної мембрани виконують до закінчення часу життєздатності.

Час повного висихання мембрани, до закінчення якого не дозволено переміщення по її поверхні людей та пересувних засобів, складає час, вказаний у **табл. 1** плюс 30 хв.

За нанесення мембрани у два шари рекомендується наносити другий шар не пізніше 48 год після нанесення першого шару мембрани, але у випадках непередбачених обставин, дозволено збільшення цього часу до 120 год з попередньою перевіркою поверхні на предмет забруднення.

У випадках, якщо поверхня першого шару волога через опади, перед нанесенням другого шару гідроізоляційної мембрани поверхню потрібно висушити струменем стисненого повітря від компресора.

Показником відсутності вологи на поверхні є відсутність вологих плям під час протирання за допомогою промокального паперу. Для сушіння поверхні мембрани треба уникати відкритого вогню.

Другий шар гідроізоляційної мембрани повинен бути нанесений на затверділий перший шар без будь-якої підготовки, крім видалення вологи та сміття, наприклад, пилу, піску тощо. Видалення сміття треба проводити струменем стиснутого повітря від компресора.

Після нанесення та затвердіння другого шару гідроізоляційної мембрани його треба перевірити візуально та у разі виявлення будь-яких дефектів їх ремонтують згідно з додатком Б. Усунення дефектів у другому шарі потрібно виконувати так, як і в першому шарі.

Після нанесення другого шару мембрани, щоб уникнути його псування, не дозволено переміщення по його поверхні людей та пересувних засобів раніше мінімального часу висихання мембрани, зазначеного у **табл. 1** плюс 30 хв.

У разі нанесення гідроізоляційної мембрани в один шар завтовшки 2,0 мм і більше контроль суцільності поверхні здійснюється за допомогою електроіскрового дефектоскопа. Під час проходження металеві щітки дефектоскопа над місцем проколу мембрани відбувається пробій струму основи моста і лунає звуковий сигнал. Це місце локалізують і виконують ремонтівання. Так ремонтують усі пошкодження суцільності гідроізоляційної мембрани, у тім числі і ті, що не визначені візуально.

Якщо раніше нанесена гідроізоляційна мембрана не забруднена на ділянці стику, що перекривається, немає необхідності в додатковій підготовці поверхні. У разі забруднення, на цій ділянці роблять зачистку місця перекриття на 100 мм просоченим розчинником (ацетоном) наждачним папером.

У місцях стику нової гідроізоляційної мембрани з раніше нанесеною, добового віку та більше, новий шар повинен перекривати існуючий не менше ніж на 50 мм, внаслідок чого утворюється сходинка, що не впливає на характеристики мембрани та її властивості.

До заходів з ремонтування шарів гідроізоляційної системи відносяться заходи з ремонтування ґрунтовок та гідроізоляційної мембрани [15].

Дефектами ґрунтовок є:

- ділянки, де ґрунтовка не висохла протягом часу [15], треба повністю стерти сухим ганчір'ям неполімеризовані ділянки ґрунтовок до її повного видалення, після чого відремонтувати ці ділянки; типові причини вищеописаного дефекту: потрапляння води та інших сторонніх речовин на основу та в ємність з ґрунтовкою, неправильна підготовка ґрунтовок до нанесення;

- ділянки, на яких порушено суцільність покриття, є здуття або жолоблення шару ґрунтовок внаслідок попадання забруднювачів (у в тому числі вологи) безпосередньо перед або під час нанесення ґрунтовок, а також ділянки з механічними пошкодженнями ґрунтовок треба відремонтувати;

- ділянки, на яких за контрольного перевіряння методом паралельних насічок згідно з ДСТУ ISO 2409 [22] показник адгезії становив понад 1 бал. Треба визначити розміри дефектної ділянки та провести на ній ремонтівання ґрунтовок.

Ремонтівання дефектів шару ґрунтовок проводиться таким чином: виконують очищення поверхні за допомогою наждачного паперу, просоченого ацетоном. Дочекається висихання ацетону і очистити сухим ганчір'ям дефектне місце. Нанести шар ґрунтовок на зачищене місце, захистити відремонтовану поверхню будь-яким доступним способом (накрити відремонтоване місце, не допускаючи контакту з ґрунтовкою) та дочекатися повного висихання матеріалу.

Дефектами гідроізоляційної мембрани є:

- ділянки з кратерами від падіння крапель води, каміння та інших сторонніх предметів на мембрану, що знаходиться в рідкому стані, на яких спостерігається зменшення шару мембрани. Ці місця потрібно висушити, знежирити та нанести мембрану до досягнення потрібної товщини шару вручну за допомогою шпателя;

- ділянки з механічними пошкодженнями гідроізоляційної мембрани, що відбулися після полімеризації мембрани, на яких помічається зменшення шару мембрани чи її прокол;

- ділянки, на яких за контрольного перевіряння показник адгезії до металеві основи моста становив менше ніж 0,3 МПа або до цементобетонної основи моста менше ніж 0,3 МПа, треба визначити розміри дефектного ділянки, за допомогою ножа вирізати за контуром дефектне місце і зняти шар мембрани;

- ділянки, на яких за контрольного перевіряння товщина шару склала менше ніж 2,0 мм, треба переконатися, що мембрана чиста, не містить вологи та сторонніх предметів. На ці ділянки треба нанести мембрану до досягнення необхідної товщини вручну за допомогою шпателя.

Дефектами не є:

- часткова або повна зміна кольору (тону) ґрунтовок та мембрани;

- напливи та потовщення мембрани на горизонтальних, похилих, вертикальних поверхнях та місцях ремонтування внаслідок нерівномірності її нанесення.

Оцінку захисних властивостей покриття проводять згідно з ДСТУ ISO 4628-1 [23] та кількість дефектів не повинна перевищувати вимоги нормативних документів.

Ремонтування дефектів гідроізоляційної мембрани проводиться таким чином:

— ділянки з кратерами від падіння крапель води, каміння та інших сторонніх предметів на мембрану треба висушити, знежирити та нанести мембрану до досягнення потрібної товщини вручну за допомогою шпателя. Для цього взяти рівну кількість компонента А та компонента В з доданням до нього каталізатором і змішати їх у відкритій ємності в пропорції 1:1. Далі нанести змішані компоненти за допомогою шпателя на дефектне місце. Захистити відремонтовану поверхню будь-яким доступним способом (накрити відремонтоване місце, не допускаючи зіткнення з мембраною) та дочекатися повного висихання матеріалу;

— ділянки, на яких за контрольного перевіряння товщина шару склала менше ніж 2 мм, потрібно очистити від забруднень та за погодження з інспектором, нанести мембрану з використанням обладнання для безповітряного розпилення або вручну за допомогою шпателя, довівши товщину її шару до необхідного значення;

— ділянки з механічними пошкодженнями мембрани, що відбулися після полімеризації мембрани та ділянки, на яких за контрольного перевіряння показник адгезії становив менше необхідного [15], треба видалити за допомогою різального або абразивоструйного інструменту.

Далі провести очищення поверхні від залишків ґрунтовки та мембрани за допомогою наждакового паперу, просоченого ацетоном, та здійснити ремонтування шару ґрунтовки. Після цього здійснити ремонтування мембрани та, за погодженням з інспектором, нанести мембрану з використанням обладнання для безповітряного розпилення чи вручну.

Висновки

На цей час існуючі нормативні документи України не в повній мірі регламентують застосування сучасних видів гідроізоляційних систем, які мають широке застосування на транспортних і гідротехнічних спорудах у світі. Одним з найпоширеніших видів гідроізоляційного матеріалу на сучасних складних транспортних спорудах є застосування водонепроникної двокомпонентної гідроізоляційної мембрани на основі метилметакрилатної смоли. Однак, існуючі нормативні документи значною мірою не враховують технологічні особливості застосування цього виду матеріалу, що призводить до погіршення умов експлуатації дорожнього одягу та транспортної споруди в цілому.

Тому, залишається актуальним питання дослідження ефективності та умов роботи за різних температур і режимів експлуатування гідроізоляційної мембрани на основі метилметакрилатної смоли на транспортних і гідротехнічних спорудах.

Список літератури

1. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Федоренко О. В., Гаркуша І. Ю. Застосування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 25. С. 74–86. URL: <http://bttip.diit.edu.ua/article/view/303313/295395>.
2. Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik, 2015, 1505, VSS 2006/509. P 128.
3. Компанія SCHMIDT+PARTNER. URL: <https://schmidtundpartner.ch/projekt/n12-viaduc-du-lac-de-la-gruyere> (дата звернення: 01.09.2025).
4. Компанія Bänziger Partner AG. URL: <https://www.bp-ing.ch/projekte-sammlung/lehnenbruecke-beckenried> (дата звернення: 01.09.2025).
5. Zhou Lu, Zhang Dan, Li Xiaogang, Gao Zhiwei, Chen Qian & Wang Chaohui (2022). Overview: Application of Resin Waterproof Adhesive Materials in Bridge Deck Pavement in China. *Advances in Civil Engineering*. 2022. Article ID 2320374. P. 15. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/2320374>.
6. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB. Teil 3. 1987.
7. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB. Teil 3. 1995.
8. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450. 2005.

9. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450a. 2009.
10. Richtlinien für Konstruktive Einzelheiten von Brücken, Kapitel 5: Abdichtungen und Beläge (Stand Revision 2005).
11. European Organisation for Technical Assessment EOTA. Leitlinie für die Europäische technische Zulassung für Bausätze für flüssig aufzubringende Brückenabdichtungen, ETAG 033, 2010.
12. Компанія Bridge preservation. URL: <https://bridgepreservation.com/norfolk-southern-opens-new-portageville-bridge-trains/> (дата звернення: 01.09.2025).
13. Компанія The Sherwin-Williams Company. URL: <https://industrial.sherwin-williams.com/na/us/en/protective-marine/media-center/case-studies/new-york-cuomo-bridge-steel-coating.html> (дата звернення: 01.09.2025).
14. Компанія BTMBOYA. URL: <https://btmboya.com.tr/Btmboya-projects/1915-canakkale-bridge/> (дата звернення: 01.09.2025).
15. Р В.2.3-37641918-934:2023 Рекомендації з улаштування гідроізоляційних систем на основі метилметакрилатної смоли на транспортних спорудах. Київ, 2023. 58 с. (Інформація та документація).
16. NACE No. 6/SSPC-SP 13-2018, Surface Preparation of Concrete
17. SIA 162/1:1989 Betonbauten Materialprüfung
18. ДСТУ EN 1062-1:2012 Фарби та лаки. Лакофарбові матеріали та системи покриттів для зовнішніх мінеральних і бетонних поверхонь. Частина 1. Класифікація (EN 1062-1:2004, IDT). Київ. 2012. 16 с. (Інформація та документація).
19. ДСТУ EN ISO 8502-3:2022 Готування сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і подібної продукції. Випробування для оцінювання чистоти поверхні. Частина 3. Оцінювання наявності пилу на підготовленій для фарбування сталевій поверхні (метод липкої стрічки) (EN ISO 8502-3:2017, IDT; ISO 8502-3:2017, IDT). Київ, 2022. 15 с. (Інформація та документація).
20. ДСТУ EN ISO 9117-1:2022 Фарби та лаки. Контроль висихання. Частина 1. Визначення стану та часу повного висихання (EN ISO 9117-1:2009, IDT; ISO 9117-1:2009, IDT). Київ. 2022. 10 с. (Інформація та документація).
21. ДСТУ EN 1542:2022 Вироби та системи для захисту та ремонту бетонних конструкцій. Методи випробувань. Вимірювання міцності з'єднання відриванням (EN 1542:1999, IDT). Київ. 2022. 12 с. (Інформація та документація).
22. ДСТУ EN ISO 2409:2022 Фарби та лаки. Випробування методом решітчастих надрізів (EN ISO 2409:2020, IDT; ISO 2409:2020, IDT). Київ. 2022. 20 с. (Інформація та документація).
23. ДСТУ EN ISO 4628-1:2022 Фарби та лаки. Оцінювання руйнувань лакофарбових покриттів. Визначення кількості, розмірів дефектів та інтенсивності однорідних змін зовнішнього вигляду. Частина 1. Основні принципи та система оцінювання (EN ISO 4628-1:2016, IDT; ISO 4628-1:2016, IDT). Київ, 2022. 25 с. (Інформація та документація).

References

1. Onyshchenko A. M., Harkusha M. V., Fedorenko O. V., Harkusha I. YU. Zastosuvannya hidroizolyatsiynykh system na osnovi metylmetakrylatnoyi smoly na transportnykh sporudakh. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka*, Dnipro. 2024. Vyp. 25. P. 74–86. URL: <http://btrp.diit.edu.ua/article/view/303313/295395> [in Ukrainian].
2. Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen., Erfassen der Verbundproblematik, 2015, 1505, VSS 2006/509. P 128 [in German].
3. Kompaniya SCHMIDT+PARTNER. URL: <https://schmidtundpartner.ch/projekt/n12-viaduc-du-lac-de-la-gruyere> (data zvernennya: 01.09.2025) [in German].
4. Kompaniya Bänziger Partner AG. URL: <https://www.bp-ing.ch/projekte-sammlung/lehnenbruecke-beckenried> (data zvernennya: 01.09.2025) [in German].
5. Zhou Lu, Zhang Dan, Li Xiaogang, Gao Zhiwei, Chen Qian & Wang Chaohui (2022). Overview: Application of Resin Waterproof Adhesive Materials in Bridge Deck Pavement in China. *Advances in Civil Engineering*., 2022, Article ID 2320374. P. 15. URL: <https://doi.org/10.1155/2022/2320374> [in English].

6. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB. Teil 3. 1987 [in German].
7. Bundesministerium für Verkehr. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für das Herstellen von Brückenbelägen – Dichtungsschicht aus Flüssigkunststoff ZTV-BELB. Teil 3. 1995 [in German].
8. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450. 2005 [in German].
9. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken, SN 640450a. 2009 [in German].
10. Richtlinien für Konstruktive Einzelheiten von Brücken, Kapitel 5: Abdichtungen und Beläge (Stand Revision 2005) [in German].
11. European Organisation for Technical Assessment EOTA. Leitlinie für die Europäische technische Zulassung für Bausätze für flüssig aufzubringende Brückenabdichtungen, ETAG 033. 2010 [in German].
12. Kompaniya Bridge preservation. URL: <https://bridgepreservation.com/norfolk-southern-opens-new-portageville-bridge-trains/> (data zvernennya: 01.09.2025) [in English].
13. Kompaniya The Sherwin-Williams Company. URL: <https://industrial.sherwin-williams.com/nas/en/protective-marine/media-center/case-studies/new-york-cuomo-bridge-steel-coating.html> (data zvernennya: 01.09.2025) [in English].
14. Kompaniya BTMBOYA. URL: <https://btmboya.com.tr/Btmboya-projects/1915-canakkale-bridge/> (data zvernennya: 01.09.2025) [in English].
15. R V.2.3-37641918-934:2023 Rekomendatsiyi z ulashtuvannya hidroizolyatsiynykh system na osnovi metylmetakrylatnoyi smoly na transportnykh sporudakh [R B.2.3-37641918-934:2023 Recommendations for the installation of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin on transport structures]. Kyiv, 2023. 58 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
16. NACE No. 6/SSPC-SP 13-2018, Surface Preparation of Concrete [in English].
17. SIA 162/1:1989 Betonbauten Materialprüfung [in English].
18. DSTU EN 1062-1:2012 Farby ta laki. Lakofarbovi materialy ta systemy pokryttiv dlya zovnishnikh mineral'nykh i betonnykh poverkhon'. Chastyna 1. Kласифікація (EN 1062-1:2004, IDT) [State Standard of Ukraine (DSTU EN 1062-1:2012) Paints and varnishes. Paints and varnishes and coating systems for external mineral and concrete surfaces. Part 1. Classification]. Kyiv, 2012. 16 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
19. DSTU EN ISO 8502-3:2022 Hotuvannya stalevykh poverkhon' pered nanesennyam farb i podibnoyi produktsiyi. Vyprobuvannya dlya otsynyuvannya chystoty poverkhni. Chastyna 3. Otsynyuvannya nayavnosti pylu na pidhotovleniy dlya farbuвання stalevykh poverkhni (metod lypkoyi strichky) [State Standard of Ukraine (DSTU EN ISO 8502-3:2022) Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for the assessment of surface cleanliness. Part 3. Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (adhesive tape method). Kyiv, 2022. 15 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
20. DSTU EN ISO 9117-1:2022 Farby ta laki. Kontrol' vysykhannya. Chastyna 1. Vyznachennya stanu ta chasu povnoho vysykhannya (EN ISO 9117-1:2009, IDT; ISO 9117-1:2009, IDT) [State Standard of Ukraine (DSTU EN ISO 9117-1:2022) Paints and varnishes. Drying control. Part 1. Determination of the state and time of complete drying. Kyiv, 2022. 10 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].
21. DSTU EN 1542:2022 Vyroby ta systemy dlya zakhystu ta remontu betonnykh konstruktsiy. Metody vyprobuvan'. Vymiryuvannya mitsnosti z'yednannya vidryvannyam (EN 1542:1999, IDT). Kyiv, 2022. 12 p. (Informatsiya ta dokumentatsiya) [State Standard of Ukraine (DSTU EN 1542:2022 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Measurement of bond strength by pull-off. Kyiv, 2022. 12 p. (Information and documentation) [in English].
22. DSTU EN ISO 2409:2022 Farby ta laki. Vyprobuvannya metodom reshchastykh nadriziv (EN ISO 2409:2020, IDT; ISO 2409:2020, IDT) [State Standard of Ukraine (DSTU EN ISO 2409:2022 Paints and varnishes. Tests using the lattice notch method. Kyiv, 2022. 20 p. (Information and documentation) [in English].

23. DSTU EN ISO 4628-1:2022 Farby ta laky. Otsinyuvannya ruynuvan' lakofarbovykh pokryttiv. Vyznachennya kil'kosti, rozmiriv defektiv ta intensyvnosti odnoridnykh zmin zovnishn'oho vyhlyadu. Chastyna 1. Osnovni pryntsypy ta systema otsinyuvannya (EN ISO 4628-1:2016, IDT; ISO 4628-1:2016, IDT). [State Standard of Ukraine (DSTU EN ISO 4628-1:2022 Paints and varnishes. Assessment of damage to paint and varnish coatings. Determination of the number, size of defects and intensity of uniform changes in appearance. Part 1. Basic principles and assessment system. Kyiv, 2022. 25 p. (Information and documentation) [in English].

Mykola Harkusha, Ph.D., Associate Prof., <https://orcid.org/0000-0002-5388-0561>

National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

PROTECTION OF CONCRETE AND METAL STRUCTURES OF TRANSPORT AND HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION USING METHYL METHACRYLATES

Abstract

Introduction. Reliable waterproofing protection is one of the conditions for ensuring the durability of transport and hydraulic structures. However, among the dominant causes of the destruction of transport and hydraulic structures is the premature destruction of waterproofing, which is one of the least durable elements of the span structure.

A waterproofing system used to protect concrete and metal structures of transport and hydraulic construction must have reliability, which is represented by the performance of the necessary functions under operating conditions for a given time while maintaining the main characteristics, and have a service life as close as possible to the structures being insulated.

Waterproofing materials have two interrelated characteristics: internal structure and quality indicators. The relationship is established with optimal structures, when stable bonds in them ensure the stability of the main properties during various external and internal changes in the material in the structures. The internal structure, or structure, of waterproofing materials expresses a certain nature of the bonds and the order of adhesion of the particles from which they are formed.

The most advanced in terms of ensuring the protection of the slab are liquid composite membranes based on polyurethane and methyl methacrylate resins. Membrane coatings form a continuous seamless structure on surfaces of complex shape, since their application is carried out by the method of liquid spraying.

Research into the influence of various factors on the durability of waterproofing membranes based on methyl methacrylate is a crucial component for developing a technology for installing waterproofing membranes based on methyl methacrylate resin on transport and hydraulic structures and establishing requirements for them.

Problems. It has been established that there is a need to generalize existing approaches to protecting concrete and metal structures in transport and hydraulic engineering construction and to develop recommendations for the installation of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin.

Objectives. The purpose of the scientific work is to conduct research aimed at generalizing the protection of concrete and metal structures of transport and hydraulic engineering using methyl methacrylates, which are arranged in the form of waterproofing of structures.

Results. Based on the conducted research, existing approaches to the use of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin on transport and hydraulic structures were summarized and recommendations were developed for the installation of waterproofing systems based on methyl methacrylate resin.

Conclusions. The paper provides recommendations for preparing the surface of transport and hydraulic structures for installing a waterproofing system, which complement the current regulatory documents of Ukraine, the main technological operations and features of installing a waterproofing system.

Keywords: highways, highway bridge, waterproofing, waterproofing membrane, durability, bridge deck, methyl methacrylate, transport structure.

УДК 624.21

Артьомов В. Є.¹, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0005-2699-5477>Андрусяк А. В.¹, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>Білоус І. І.², <https://orcid.org/0009-0002-9881-6683>¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна²Заклад вищої освіти «Університет Короля Данила», м. Івано-Франківськ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОГОНОВІ БУДОВИ МОСТІВ ЗА НОРМАМИ ПРОЄКТУВАННЯ УКРАЇНИ ТА ВІЙСЬКОВИМИ СТАНДАРТАМИ НАТО STANAG/TDTC

Анотація

Вступ. Зростання інтенсивності та маси транспортних потоків, як цивільних, так і військових, створює значні виклики для мостової інженерії, що вимагає постійного оновлення та вдосконалення методів оцінки вантажопідйомності та безпеки мостів. Об'єкти української інфраструктури, що постраждали від російсько-української війни (зокрема, мости), потребують швидкого відновлення та забезпечення надійності. Пропоноване дослідження проводить порівняльний аналіз українських державних будівельних норм (ДБН) з Тристороннім кодексом НАТО для проєктування та випробувань військових мостів і переправних конструкцій (TDTC). Результати дослідження допомагають оцінити сумісність існуючих цивільних мостів із сучасною військовою технікою та надають рекомендації для проєктувальників щодо імплементації закордонних військових стандартів. У цілому, публікація сприяє гармонізації українських будівельних норм із міжнародними стандартами в рамках євроатлантичної інтеграції України.

Проблематика. Проблематика дослідження полягає у відсутності відкритих даних про роботу мостів під військовими навантаженнями та необхідності систематичного порівняння методологій цивільного та військового мостобудування. Російсько-українська війна підкреслила вразливі місця в інфраструктурі, що зумовило гостру потребу в порівняльному аналізі стандартів проєктування. Цивільний сектор прагне до точності та оптимізації життєвого циклу конструкцій, використовуючи імовірнісні моделі, тоді як військовий — до швидкості та тактичної мобільності, застосовуючи спрощені, детерміновані системи, як-от MLC. Існуючі дослідження виявили інформаційні прогалини, зокрема: недостатній аналіз динамічної взаємодії військових колон, брак стандартизованого протоколу перехресної оцінки, а також обмеженість відкритих даних про рух військових транспортних засобів. Ці проблеми перешкоджають повноцінному інженерному аналізу та забезпеченню безперебійного, безпечного функціонування української інфраструктури.

Результати. Порівняльний аналіз показав, що в цілому зосереджене колісне навантаження від військової техніки НАТО до класу MLC 70 та розподілений контактний тиск від усіх класів (до MLC 150 включно) не перевищують значень, закладених в українських будівельних нормах. Проте, аналіз згинальних моментів в прогонівій будові моста розрізної схеми дає іншу, більш точну картину сумісності. Для мостів, спроектованих під навантаження A11, допустимими є класи MLC 30 та нижче. Для навантаження A15 пороговим є клас 40. Споруди, розраховані на модель НК-80, можуть пропускати військову техніку до 100 класу MLC, а мости з урахуванням навантаження НК-100 відповідають практично всім класам військової техніки STANAG.

Висновки. Українські будівельні норми та військові стандарти НАТО (TDTC) мають принципово різну філософію: цивільний сектор орієнтований на точність та оптимізацію, тоді як військовий — на швидкість й тактичну мобільність. Хоча порівняння зовнішніх характеристик навантажень (зосереджений та розподілений тиск) свідчить про те, що українські норми є достатньо надійними, аналіз внутрішніх зусиль дає більш точні висновки. Для забезпечення повної сумісності мостів з військовою технікою необхідні подальші, деталізовані розрахунки, що враховують динамічні ефекти

та інші специфічні чинники. Представлена робота є початковим етапом для подальших досліджень, спрямованих на гармонізацію українських та міжнародних стандартів, що є важливим кроком для зміцнення обороноздатності та інфраструктури України.

Ключові слова: аналіз, ДБН, екіпаж, міст, модель, навантаження, НАТО, стандарт, STANAG, MLC.

Вступ

Постановка проблеми

Зростання інтенсивності та маси транспортних потоків, як цивільних, так і військових, становить неабиякий виклик для мостової інженерії. Точна оцінка вантажопідйомності, несучої здатності та безпеки мостів вимагає постійного оновлення та вдосконалення. Мостові конструкції, які раніше розраховувалися з використанням консервативних, усереднених моделей, дедалі більше піддаються впливу трафіку, який характеризується високою варіативністю, динамічністю та непередбачуваністю [3, 15, 16, 18]. У цьому контексті виникає потреба в систематичному аналізі та порівнянні методологій, що застосовуються для цивільного та військового мостобудування.

З іншого боку, відкритих даних про роботу мостів під навантаженнями військового часу — критично мало. Російсько-українська війна, що розпочалася у 2014 році та набула повномасштабного характеру 24 лютого 2022 року як найбільший збройний конфлікт у Європі з часів Другої світової війни, стала викликом не лише для України, а й для міжнародної системи безпеки, виявивши вразливі місця в обороні та інфраструктурі. То ж у сучасному контексті відновлення та забезпечення надійності інфраструктури, що зазнала руйнувань, порівняльний аналіз стандартів проектування є надзвичайно актуальним. Особливе значення має зіставлення вимог до транспортних навантажень, визначених українськими державними будівельними нормами (ДБН), з Тристороннім кодексом НАТО для проектування та випробувань військових мостів і переправних конструкцій (Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment, TDTC).

Ця робота заповнює наукову прогалину, пропонуючи аналіз двох різних підходів: моделей транспортних навантажень у ДБН та індексованої системи військового класу навантажень (Military Load Classification, MLC) у TDTC. Результати дослідження покращують оцінку сумісності існуючих цивільних мостів з сучасною військовою технікою, а також надають практичні рекомендації для проектувальників щодо подальшої імплементації закордонних військових стандартів для підвищення надійності інфраструктури. Автори сподіваються, що ця публікація стане важливим внеском у дискусію щодо гармонізації українських будівельних норм із міжнародними стандартами, яка є невід’ємною частиною євроатлантичної інтеграції України.

Актуальність теми

Дослідження, що стосуються порівняння українських і міжнародних військових стандартів, мають не лише теоретичну, а й практичну цінність, допомагаючи Україні зміцнювати свою обороноздатність і успішно рухатися до перемоги. Зазначимо кількох таких ключових аспектів.

1. Підвищення стійкості інфраструктури. Російські війська систематично знищують критичну інфраструктуру, зокрема мости, щоб перешкодити пересуванню українських військ та постачанню. У відповідь на це, Україна потребує швидких та ефективних рішень для відновлення логістичних шляхів. Дослідження, що порівнюють цивільні будівельні норми із військовими стандартами НАТО, дозволять оцінити можливість використання існуючих мостів та переправ для пересування важкої військової техніки, а також використати міжнародний досвід і передові практики для проектування і будівництва нових, більш стійких та надійних мостових споруд.

2. Гармонізація зі стандартами НАТО. Україна обрала курс на євроатлантичну інтеграцію. Це означає не лише політичне та військове партнерство, але й перехід на єдині стандарти та процедури. Вивчення і впровадження світових стандартів, як-от STANAG, є необхідною умовою для повної інтеграції Збройних Сил України до системи колективної оборони НАТО. Дослідження TDTC та його зв’язку зі STANAG 2021 сприяє співпраці з арміями країн-членів Альянсу (особливо в питаннях логістики та інженерного забезпечення), а також розробці й виробництву українського військового обладнання, яке буде повністю сумісним із західними зразками.

3. Науковий та технічний розвиток. Війна стимулює інновації та науково-технічний прогрес. Порівняння стандартів мостобудування є важливим елементом цього процесу, що сприяє розвитку

вітчизняної інженерної думки та дозволяє адаптувати світові наукові досягнення до унікальних потреб української оборони та післявоєнного відновлення. Ці питання також підсвічують гостру необхідність загальної діджиталізації цивільної та військової інженерії, зокрема з розробкою спеціалізованих цифрових рішень оборонної тематики [17, 18].

Аналіз наукових публікацій наочно показує, що і цивільне, і військове мостобудування рухаються від спрощених детермінованих моделей до більш точних, імовірнісних та динамічних. Однак їхні філософії та пріоритети все ще залишаються різними: цивільний сектор прагне до точності та оптимізації життєвого циклу, а військовий — до швидкості та тактичної мобільності.

Існуючі наукові дослідження свідчать, що концентровані навантаження від реального цивільного трафіку можуть перевищувати проєктні значення, а динамічні ефекти на коротких прогонах з неякісним покриттям можуть бути значно вищими за нормативні. Щодо MLC, то ця система військових навантажень є ефективною для швидкої «польової» оцінки, але може виявитися недостатньою для повноцінного інженерного аналізу [4].

Подолання виявлених прогалин є критично важливим для забезпечення міцності, ефективності та безпеки транспортної інфраструктури, як в умовах мирного часу, так і під час надзвичайних ситуацій. Перехід до імовірнісних та гібридних моделей, а також впровадження інтелектуальних моделей та концепцій BIM, є ключовими для майбутнього інженерії мостів. Ці технології забезпечать повну прозорість, точність та ефективність на всіх етапах життєвого циклу конструкцій, що дозволить приймати більш обґрунтовані рішення та оптимізувати використання ресурсів [6, 9].

Аналіз останніх досліджень

Military Load Classification (MLC) є основним методом класифікації навантажень для військового мостобудування, стандартизованим НАТО (STANAG 2021). Ця система визначає параметри навантаження від транспортних засобів (колісних та гусеничних) у вигляді єдиного числового значення. MLC заснована на наборі з 16 гіпотетичних стандартних колісних і 16 гусеничних транспортних засобів, які є типовими для країн-членів НАТО. Кожен клас MLC визначає повну вагу, геометрію та максимальне навантаження на вісь, що дозволяє інженерам або військовим підрозділам швидко оцінити можливість проїзду через міст.

Ключовим принципом системи MLC є забезпечення швидкої та безпечної оцінки в польових умовах, що повністю підпорядковується пріоритету тактичної мобільності [10]. Цей підхід є детермінованим та спрощеним, що дозволяє миттєво приймати рішення в умовах бойових дій або надзвичайних ситуацій, але не дає деталізованих даних для глибокого інженерного аналізу конструкції (хоча огляд останніх публікацій свідчить, що науковці почали застосовувати для визначення ваги військових екіпажів імовірнісні підходи [12]).

Динамічні та інші коефіцієнти, що використовуються у військових стандартах, залежать від національних норм та процедур розрахунку. Аналіз свідчить, що військові стандарти, як правило, застосовують менші коефіцієнти надійності (коефіцієнти безпеки) для рухомих навантажень, порівняно з цивільними [13]. Що стосується динамічних ефектів, то деякі військові норми припускають лінійну залежність динамічного коефіцієнта від довжини прогону, а для дуже низьких швидкостей (до 5 км/год) динамічний ефект може бути повністю відкинутий [8]. Важливо, що в деяких стандартах, як-от STANAG 2021, рекомендації щодо цих коефіцієнтів віддані на розсуд національним інженерним службам [13]. Це створює певну прогалину в стандартизації та може призвести до невідповідностей в оцінці несучої здатності інженерами різних країн та проєктних організацій.

Фундаментальна відмінність між цивільними та військовими підходами до моделювання навантажень полягає у філософії дизайну як такого. Цивільні мости оптимізуються за співвідношенням витрат та вигод протягом усього життєвого циклу, що вимагає використання складних імовірнісних моделей, які забезпечують доволі точну оцінку та ефективне управління інфраструктурними активами [11, 14]. Військові мости, навпаки, оптимізуються за швидкістю розгортання та мобільністю, що вимагає простих, детермінованих і надійних систем класифікації (як-от MLC). Ця базова відмінність є першопричиною розбіжностей у всіх інших аспектах, включаючи моделі навантажень, коефіцієнти та ін.

Практична потреба в уніфікації цивільних та військових підходів постійно зростає. Військові конвої регулярно використовують цивільні мости під час навчань або розгортання [12]. З іншого боку, військові мости, розроблені для швидкого перекидання через перешкоди, все частіше

використовуються для надання допомоги цивільному населенню (наприклад, під час війни або природних катастроф). Ця взаємозалежність створює зростаючий попит на міждисциплінарні рішення та об'єднання підходів [11].

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, у наявних матеріалах виявлено кілька критичних прогалин.

1. Недостатній аналіз динамічної взаємодії військових колон. Хоча теоретичні дослідження глибоко вивчають динамічні ефекти смуг вантажівок [5], вони не містять аналогічного аналізу динаміки руху військових конвоїв на мостах, особливо середніх та великих. Враховуючи, що військові колони є щільними, важкими та можуть рухатися з високою швидкістю, їхній динамічний вплив на конструкцію мосту може бути значним і, ймовірно, відрізнятиметься від цивільного трафіку. Цей аспект є невивченою, але надзвичайно важливою областю для забезпечення безперервного життєвого циклу та загальної безпеки інфраструктури.

2. Брак стандартизованого протоколу перехресної оцінки. Дослідження демонструють взаємозастосовність цивільної та військової інфраструктури, але не пропонують стандартизованого фреймворку для оцінки несучої здатності цивільних мостів під військовими навантаженнями, та навпаки [12]. Детермінований характер системи MLC є недостатнім для точного інженерного розрахунку — особливо в умовах, коли міст цивільного призначення перебуває в експлуатації тривалий час.

3. Обмеженість даних. Хоча системи збору великих масивів даних про реальну вагу транспортних засобів, їхню швидкість та кількість осей без переривання руху є ключовими для транспортної галузі, аналогічні відкриті набори даних для військових маршрутів — обмежені. Це перешкоджає детальному імовірнісному моделюванню динаміки військового трафіку та його впливу на конструкції.

Порівняння моделей важкої військової техніки за стандартом STANAG з національними моделями навантажень АК, НК

Тристоронній кодекс для проектування та випробувань військових мостів і переправних конструкцій (TDTC) є основоположним документом і водночас частиною більш широкої системи стандартизації НАТО. Цей норматив був розроблений та узгоджений між Німеччиною, Великою Британією та США для забезпечення взаємосумісності мостових елементів (згодом прийнятий в рамках Альянсу як Натовська інженерна публікація AEP-4865).

Ключовим елементом TDTC є концепція класу військового навантаження (Military Load Classification, MLC), яка стандартизує класифікацію мостів і транспортних засобів. Ця система класифікації є основою для STANAG 2021 і визначає єдині вимоги для оцінки та використання мостів та понтонних переправ. Таким чином, TDTC не лише слугує технічним посібником, але й є невід'ємною частиною нормативно-правової бази НАТО, яка гарантує ефективну координацію та мобільність військових сил на єдиному європейському театрі дій.

Важливо зазначити, що кодекс TDTC не є суворо директивним. Він не охоплює багатьох специфічних аспектів, необхідних для повноцінного проектування мостових конструкцій. Цей стандарт містить узагальнені підходи та моделі навантажень, тому в загальному випадку інженер має орієнтуватися на керівні документи країни, в якій виконуються основні проектні роботи — ДБН, ДСТУ в Україні; BSI — у Великій Британії; Єврокоди — в країнах Європи, тощо. TDTC відкритий для публічного доступу і, на відміну від багатьох інших секретних військових документів, доступний для ознайомлення. Це важливо, оскільки відкритий доступ дозволяє інженерам, дослідникам та виробникам, що працюють у цивільному та оборонному секторі, брати участь у розробці сумісних мостових конструкцій та систем.

В кодексі TDTC представлено гіпотетичні моделі гусеничного і колісного навантаження STANAG 2021, які віднесені до 16 окремих класів: 4, 8, 12, 16, 20, 24, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150. Клас дає наближене значення загальної ваги екіпажу; точне значення вказане у Додатку С [2]. Як бачимо, найнижчому класу MLC 4 відповідає найлегша бойова техніка вагою до 4 т, а найвищому MLC 150 — гусеничні машини вагою до 140 т та колісні до 155 т.

Найвідповіднішим прототипом гусеничного навантаження в STANAG / TDTC є танк, однак в загальному випадку це може бути інша транспортна одиниця — гусенична бойова машина піхоти (БМП), бронетранспортер (БТР), самохідна артилерійська установка (САУ), тощо. Ці навантаження

мають постійну геометрію та відрізняються лише вагою і габаритами: довжиною гусениць, шириною ходової частини (розмір по зовнішнім граням гусениць) та шириною однієї площини гусениць (довжина траку).

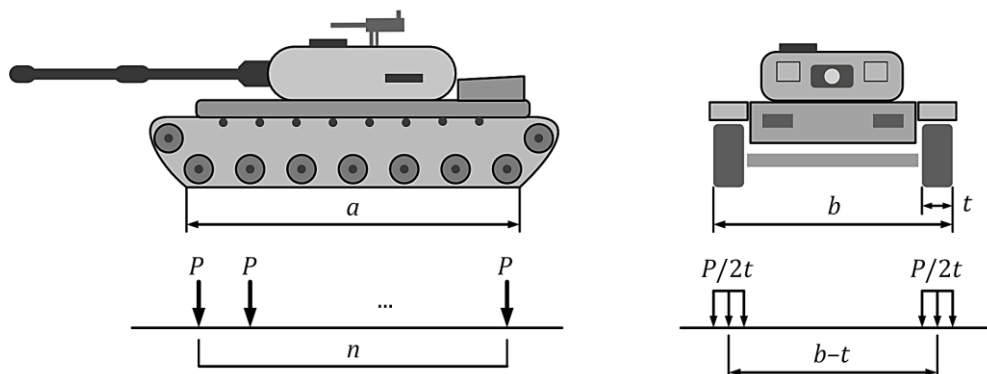


Рисунок 1 — Схема гусеничного навантаження за моделлю STANAG 2021

За структурою, ця модель близька до тандемного навантаження в смугах АК або одиночного чотиривісного екіпажу НК [1]. Безпосередньо у розрахунках інженер має оперувати зосередженим тиском від кожної колісної пари екіпажу, прикладаючи це зосереджене (вздовж мосту) або розподілене (поперек мосту) навантаження до відповідних елементів прогонової будови. Слід зауважити, що кількість ведучих коліс в ходовій частині екіпажу залежить від класу навантаження MLC [2], а у випадку реальної військової техніки у розрахункову модель слід закладати відповідні реальні вагові та геометричні характеристики.

На основі даних [1, 2] виконано порівняльний аналіз зосередженого (рис. 2) та розподіленого (рис. 3) тиску за моделями STANAG 2021 та ДБН В.1.2-15:2009.

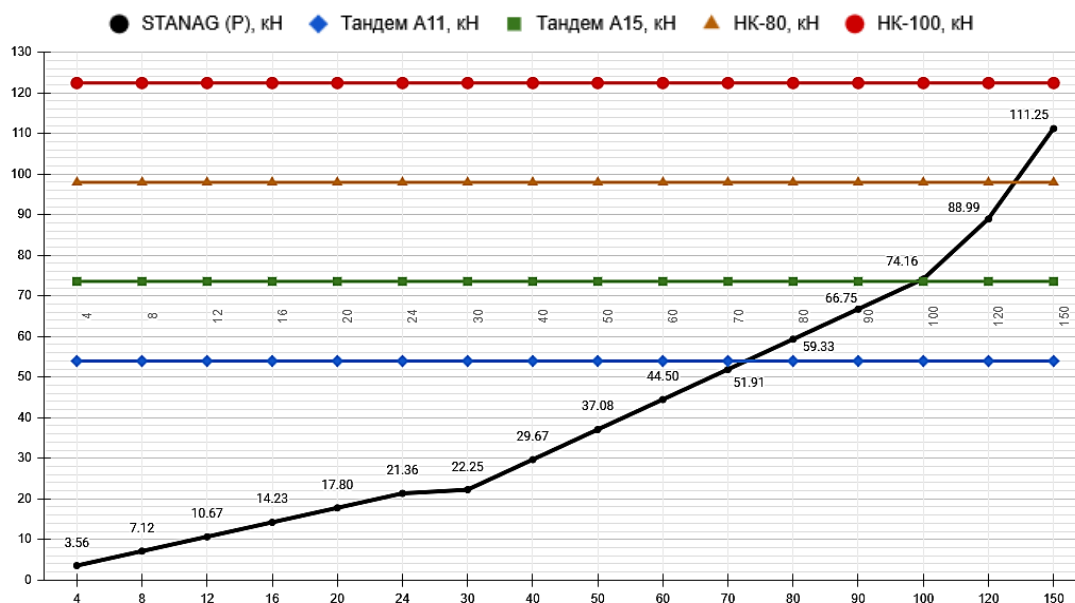


Рисунок 2 — Зосереджений тиск від колеса екіпажу STANAG, тандему A11 та A15, машини НК-80 та НК-100 (кН)

Горизонтальна вісь на обох графіках містить класи військового навантаження MLC. Вертикальна вісь відображає зосереджене зусилля від одного колеса в кН (рис. 2) та розподілений тиск цього ж колеса в кН/м (рис. 3). Моделі STANAG / TDTC порівнюються з відповідними навантаженнями від тандему АК (класів 11 та 15) та одиночними екіпажами НК-80 і НК-100.

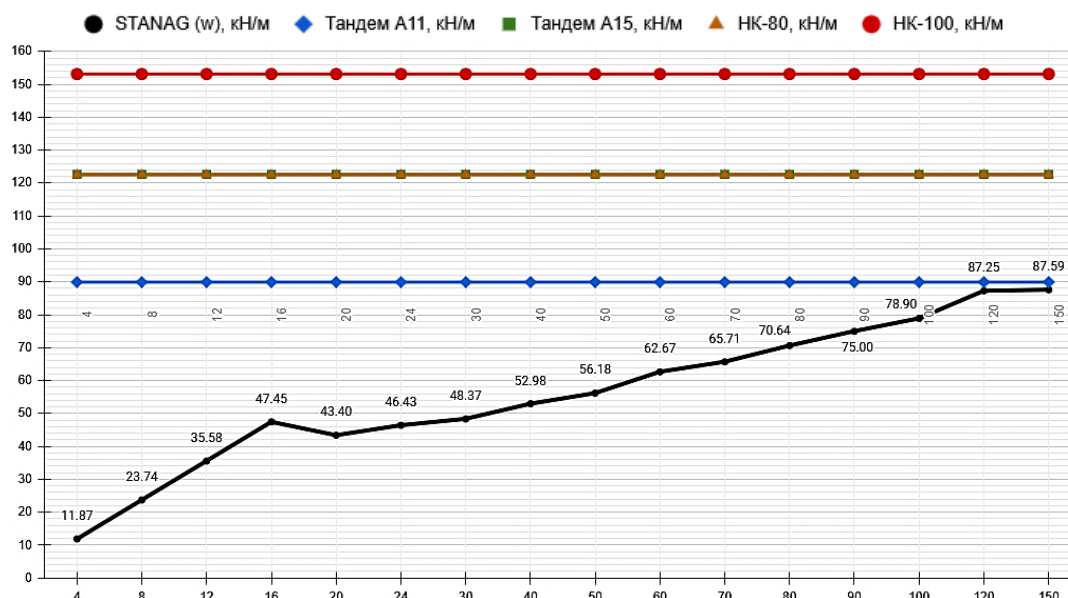


Рисунок 3 — Контактний тиск від колеса екіпажу STANAG, тандему A11 та A15, машини НК-80 та НК-100 (кН/м)

Як бачимо, зосереджене колісне навантаження від гусеничної військової техніки НАТО до 70-го класу включно є нижчим за моделі, що використовуються в українських нормах проєктування капітальних мостів на автомобільних дорогах усіх категорій. Екіпажі від 70 до 100 класу MLC є важчими за тандеми A11, але легшими за тандеми A15. Екіпажі класів 100 і 120 «працюють» в межах національного навантаження НК-80 (екіпаж класу 150 перевищує його). Жодна гіпотетична одиниця військової техніки за класифікацією MLC не перевищує відповідного колісного навантаження найважчої мостової моделі НК-100. Що до розподіленого навантаження (так званої «контактної плями»), то моделі усіх класів (до MLC 150 включно) не перевищують показники, наведені в ДБН В.1.2-15:2009.

Варто зазначити, що порівняння суто вагових характеристик транспорту не дає однозначної відповіді про роботу конструкції під цим навантаженням. Оскільки розглянуті моделі відрізняються не тільки величиною контактного тиску, а й розташуванням сил у просторі (геометрією), то відмінність між ними варто дослідити, порівнюючи параметри напружено-деформованого стану (тобто через внутрішні зусилля, спричинені цими навантаженнями). З цією метою розглянемо шарнірно опертую балку довжиною 10 м, яка моделює розрізну прогонову будову автодорожнього мосту:

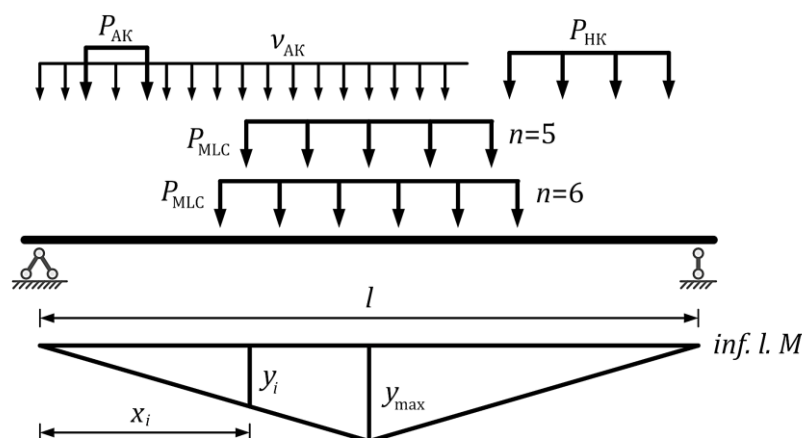


Рисунок 4 — Схеми навантажень АК, НК, MLC та лінія впливу згинального моменту в центральному перерізі прогонової будови моста

Послідовно завантажуюмо лінію впливу згинального моменту п'ятьма типами моделей: екіпажами MLC усіх класів; розподіленим смуговим навантаженням з тандемом A11, A15; одиночними екіпажами НК-80, НК-100. Використовуємо характеристичні (нормативні) значення навантажень, без ексцентриситетів. За отриманими сумарними моментами будуюмо наступні співвідношення:

- Момент від MLC / Момент від A11;
- Момент від MLC / Момент від A15;
- Момент від MLC / Момент від НК-80;
- Момент від MLC / Момент від НК-100.

Результати розрахунків наведені на **рис. 5**.

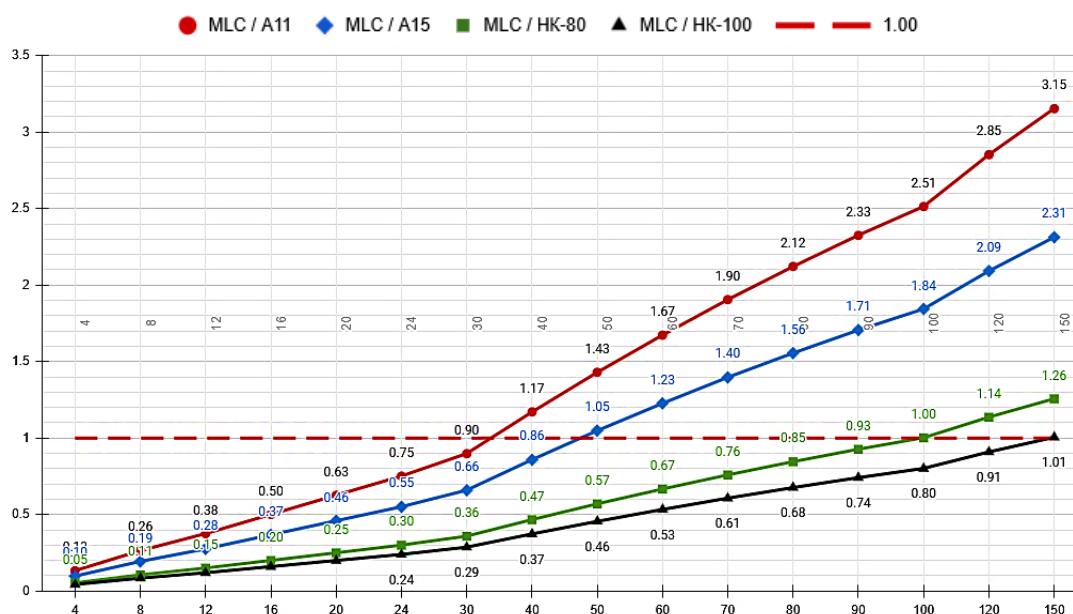


Рисунок 5 — Співвідношення максимальних моментів в розрізній прогоновій будові моста від екіпажів MLC та навантажень A11, A15, НК-80, НК-100

Вертикальна вісь тут є безрозмірною і характеризує співвідношення моментів. Значення нижче одиниці свідчать про допустимість навантаження MLC в межах національного підходу, вище — про його наднормативність. Отже для мостів, побудованих під навантаження A11, допустимими є класи MLC 30 та нижче, а для навантаження A15 — до 40 класу включно. Національна модель одиночного чотиривісного колісного екіпажу НК-80 обмежує використання військової техніки до 100 класу включно. Споруди, запроєктовані з урахуванням моделі НК-100, відповідають екіпажам MLC практично усіх класів (у рамках прийнятих у дослідженні припущень).

Висновки

На основі виконаного аналізу можна зробити висновок, що українські норми та військові стандарти НАТО, зокрема Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment та STANAG 2021, мають принципово різну філософію, що відображається у їхніх моделях навантажень. Якщо цивільний сектор прагне до оптимізації та точності через складні імовірнісні моделі, то військовий орієнтується на швидкість і тактичну мобільність, використовуючи спрощену систему MLC.

Проведені дослідження порівнюють вітчизняні будівельні норми на проєктування мостів ДБН В.1.2-15:2009 з військовими нормами STANAG 2021 / TDTC, аналізуючи як зовнішні характеристики навантажень, так і напружено-деформований стан прогонової будови. Аналіз, представлений на **рис. 2** і **рис. 3**, показав, що зосереджене навантаження від військової техніки НАТО до MLC 70, а також розподілений контактний тиск від усіх класів військової техніки (до MLC 150) не

перевищують значень, закладених в ДБН В.1.2-15:2009. Хоча військова техніка класів MLC 70..120 може бути важчою за деякі цивільні моделі, вона все ще відповідає або не перевищує осьові навантаження, що застосовуються для проєктування найважчих українських мостів.

Однак, ключові висновки щодо сумісності мостів з військовою технікою отримано з аналізу внутрішніх зусиль (згинальних моментів), результати якого наведені на **рис. 5**. Дослідження встановило, що для мостів, запроєктованих під навантаження A11, допустимими є екіпажі класу MLC 30 і нижче; для навантаження A15 пороговим є клас 40. Споруди, розраховані на модель НК-80, можуть пропускати військову техніку до 100 класу MLC, а мости, спроектовані з урахуванням навантаження НК-100, відповідають практично усім класам військової техніки STANAG. Варто наголосити, що ці результати є первинним порівнянням і не повинні трактуватися як остаточний критерій для пропуску техніки, адже для цього необхідні детальніші розрахунки з урахуванням динамічних ефектів та інших чинників, що є предметом подальших досліджень.

Список літератури

1. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.
2. Hornbeck B. K., Kluck J., Connor R. Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment. Defense Technical Information Center, 2019. Accession No. AD1070838. Доступ: URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1070838> (дата звернення: 16.09.2025).
3. Артёмов В. Є., Распопов О. С. Порівняльний аналіз моделей залізничних навантажень C14 та LM71 для балкових мостів. *Наука та прогрес транспорту*. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2014. № 1 (49). С. 160–166.
4. Hou N., Sun L., Chen L. Modeling vehicle load for a long-span bridge based on weigh-in-motion data [Електронний ресурс]. ResearchGate. Доступ: URL: https://www.researchgate.net/publication/352250845_Modeling_vehicle_load_for_a_long-span_bridge_based_on_weigh_in_motion_data (дата звернення: 16.09.2025).
5. Zhang H., Quilligan M. Simulation of Traffic Loading on Long Span Bridges [Електронний ресурс]. SWORD, Cork Institute of Technology. 2020. Доступ: URL: <https://sword.cit.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=ceri> (дата звернення: 16.09.2025).
6. Laman J. A., Pechar J. S., Boothby T. E. Dynamic load allowance for through-truss bridges [Електронний ресурс]. Penn State Research Database. Доступ: URL: https://www.researchgate.net/publication/245559817_Dynamic>Loading_of_Bridges (дата звернення: 16.09.2025).
7. Laman J. A., Pechar J. S., Boothby T. E. Dynamic load allowance for through-truss bridges [Електронний ресурс]. Penn State Research Database. Доступ: URL: <https://pure.psu.edu/en/publications/dynamic-load-allowance-for-through-truss-bridges> (дата звернення: 16.09.2025).
8. Köhncke M., Jaelani Y., Mandler A., Neumann L., Wittenberg P., Rode-Klemm A., Keßler S. Static and Dynamic Load Tests on the Bridge Vahrendorfer Stadtweg [Електронний ресурс]. arXiv, 2020. Доступ: URL: <https://arxiv.org/html/2412.15713v1> (дата звернення: 16.09.2025).
9. Zhu S., Li Y., Xu X. Dynamic Analysis of Wind–Vehicle–Bridge Systems: An Advanced Hybrid Method [Електронний ресурс]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2019. Доступ: URL: https://www.researchgate.net/publication/361097091_Dynamic_Analysis_of_Wind-Vehicle-Bridge_Systems_An_Advanced_Hybrid_Method (дата звернення: 16.09.2025).
10. Defense Technical Information Center (DTIC). Military Load Classification. Washington, D. C. : U.S. Department of the Army, 2009. 55 с. (DTIC Accession No. AD1151141). Доступ: URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/trecms/AD1151141> (дата звернення: 16.09.2025).
11. Szelka J., Wysoczański A. Modern structures of military logistic bridges [Електронний ресурс]. *Open Engineering*. 2017. Доступ: URL: https://www.researchgate.net/publication/367500496_Modern_structures_of_military_logistic_bridges (дата звернення: 16.09.2025).
12. MacDonald A. J., Bartlett F. M., Wight R. G. Probabilistic Gross Vehicle Weights and Associated Axle Loads for Military Vehicles in Bridge Evaluation and Code Calibration [Електронний ресурс]. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2007. Доступ: URL: <https://www.researchgate.net/>

publication/319293865_Probabilistic_Gross_Vehicle_Weights_and_Associated_Axle_Loads_for_Military_Vehicles_in_Bridge_Evaluation_and_Code_Calibration (дата звернення: 16.09.2025).

13. Hajós B. Safety and dynamic factors for determining the military load capacity of road bridges [Електронний ресурс]. *Katonai Műszaki Tudományok*. 2024. Доступ: URL: <https://real.mtak.hu/211320/1/71864-2-10-20241208.pdf> (дата звернення: 16.09.2025).

14. AssetIntel. Bridge Deterioration Modeling with manageX™: Optimizing Asset Management [Електронний ресурс]. *AssetIntel*, 2023. Доступ: URL: <https://www.assetintel.co/blogs/decoding-bridge-deterioration-the-power-and-process-of-predictive-modeling-for-bridge-longevity> (дата звернення: 16.09.2025).

15. Day B. H. The Future of Bridge Design [Електронний ресурс]. *Structure Magazine*. 2016. Доступ: URL: <https://www.structuremag.org/article/the-future-of-bridge-design/> (дата звернення: 16.09.2025).

16. Russell B. R., Thrall A. P. Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments [Електронний ресурс]. ASCE Library. 2013. Доступ: DOI: <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000454> (дата звернення: 16.09.2025).

17. Міст за годину: як простий застосунок від Dystlab допомагає військовим інженерам. Dystlab. Доступ: URL: <https://dystlab.com/uk/blog/003> (дата звернення: 16.09.2025).

18. Артьомов В. Є., Горбатюк Ю. М., Звонарюк Д. В. Швидке відновлення штучних споруд в контексті сталого розвитку та військового стану. У: Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів, загроз: зб. наук. пр. за матеріалами Всеукр. наук. конф. (28.10.2022 р.). Дніпро: УДУНТ, 2022.

References

1. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy [Transport facilities. Bridges and culverts. Loads and impacts]. Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 2009 [in Ukrainian].

2. Hornbeck B. K., Kluck J., Connor R. Trilateral Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment. Defense Technical Information Center, 2019. Accession No. AD1070838. Available at: URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1070838> (Accessed: 16 September 2025) [in English].

3. Artyomov V. Ye., Raspopov O. S. Porivnialnyi analiz modelei zaliznychnykh navantazhen S14 ta LM71 dlia balkovykh mostiv [Comparative analysis of railway load models S14 and LM71 for beam bridges]. *Nauka ta prohres transportu*. Visnyk Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana, 2014, No. 1 (49), P. 160–166 [in Ukrainian].

4. Hou N., Sun L., Chen L. Modeling vehicle load for a long-span bridge based on weigh-in-motion data. ResearchGate. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/352250845_Modeling_vehicle_load_for_a_long-span_bridge_based_on_weigh_in_motion_data (Accessed: 16 September 2025).

5. Zhang H., Quilligan M. Simulation of Traffic Loading on Long Span Bridges. SWORD, Cork Institute of Technology, 2020. Available at: URL: <https://sword.cit.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1019&context=ceri> (Accessed: 16 September 2025) [in English].

6. Laman J. A., Pechar J. S., Boothby T. E. Dynamic load allowance for through-truss bridges. Penn State Research Database. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/245559817_Dynamic>Loading_of_Bridges (Accessed: 16 September 2025) [in English].

7. Laman J. A., Pechar J. S., Boothby T. E. Dynamic load allowance for through-truss bridges. Penn State Research Database. Available at: URL: <https://pure.psu.edu/en/publications/dynamic-load-allowance-for-through-truss-bridges> (Accessed: 16 September 2025) [in English].

8. Köhncke M., Jaelani Y., Mendler A., Neumann L., Wittenberg P., Rode-Klemm A., Keßler S. Static and Dynamic Load Tests on the Bridge Vahrendorfer Stadtweg. arXiv, 2020. Available at: URL: <https://arxiv.org/html/2412.15713v1> (Accessed: 16 September 2025) [in English].

9. Zhu S., Li Y., Xu X. Dynamic Analysis of Wind–Vehicle–Bridge Systems: An Advanced Hybrid Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2019. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/361097091_Dynamic_Analysis_of_Wind-Vehicle-Bridge_Systems_An_Advanced_Hybrid_Method (Accessed: 16 September 2025) [in English].

10. Defense Technical Information Center (DTIC). Military Load Classification. Washington, D. C.: U.S. Department of the Army, 2009. 55 p. (DTIC Accession No. AD1151141). Available at: URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/trecms/AD1151141> (Accessed: 16 September 2025) [in English].
11. Szelka J., Wysoczański A. Modern structures of military logistic bridges. *Open Engineering*, 2017. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/367500496_Modern_structures_of_military_logistic_bridges (Accessed: 16 September 2025) [in English].
12. MacDonald A. J., Bartlett F. M., Wight R. G. Probabilistic Gross Vehicle Weights and Associated Axle Loads for Military Vehicles in Bridge Evaluation and Code Calibration. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2007. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/319293865_Probabilistic_Gross_Vehicle_Weights_and_Associated_Axle_Loads_for_Military_Vehicles_in_Bridge_Evaluation_and_Code_Calibration (Accessed: 16 September 2025) [in English].
13. Hajós B. Safety and dynamic factors for determining the military load capacity of road bridges. *Katonai Műszaki Tudományok*, 2024. Available at: URL: <https://real.mtak.hu/211320/1/71864-2-10-20241208.pdf> (Accessed: 16 September 2025) [in English].
14. AssetIntel. Bridge Deterioration Modeling with manageX™: Optimizing Asset Management. AssetIntel, 2023. Available at: URL: <https://www.assetintel.co/blogs/decoding-bridge-deterioration-the-power-and-process-of-predictive-modeling-for-bridge-longevity> (Accessed: 16 September 2025) [in English].
15. Day B. H. The Future of Bridge Design. *Structure Magazine*, 2016. Available at: URL: <https://www.structuremag.org/article/the-future-of-bridge-design/> (Accessed: 16 September 2025) [in English].
16. Russell B. R., Thrall A. P. Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments. ASCE Library, 2013. Available at: DOI: <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0000454> (Accessed: 16 September 2025) [in English].
17. Mist za hodynu: yak prostyi zastosunok vid Dystlab dopomahaie viiskovym inzheneram [Bridge in an hour: how a simple Dystlab app helps military engineers]. Dystlab. Available at: URL: <https://dystlab.com/uk/blog/003> (Accessed: 16 September 2025) [in Ukrainian].
18. Artyomov V. Ye., Horbatiuk Yu. M., Zvonariuk D. V. Shvydke vidnovlennia shtuchnykh sporud v konteksti staloho rozvytku ta viiskovoho stanu [Rapid restoration of artificial structures in the context of sustainable development and martial law]. In: Lohistyka i transportna bezpeka: problemy ta perspektyvy rozvytku v konteksti analizu suchasnykh vyklykiv, zahroz: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference (28 October 2022). Dnipro: UDUNT, 2022 [in Ukrainian].

Vitalii Artomov¹, Ph.D., <https://orcid.org/0009-0005-2699-5477>

Andriy Andrusyak¹, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-2099-9045>

Ihor Bilous², <https://orcid.org/0009-0002-9881-6683>

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

²Higher Education Institution «King Danylo University», Ivano-Frankivsk, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRAFFIC LOADS ON BRIDGE SUPERSTRUCTURES ACCORDING TO UKRAINIAN DESIGN STANDARDS AND NATO MILITARY STANDARDS STANAG/TDTC

Abstract

Introduction. The increasing intensity and weight of both civilian and military traffic pose significant challenges to bridge engineering, requiring continuous updates and improvements in the assessment methods of load-bearing capacity and structural safety. Ukrainian infrastructure objects damaged during the Russo-Ukrainian war — particularly bridges — require urgent restoration and reliability assurance. This study conducts a comparative analysis of Ukrainian State Building Codes (DBN) and the NATO Tri-Partite Design and Test Code for Military Bridging and Gap-Crossing Equipment (TDTC). The findings help assess the

compatibility of existing civilian bridges with modern military equipment and provide recommendations for designers regarding the implementation of foreign military standards. The publication contributes to the harmonization of Ukrainian building norms with international standards within the context of Ukraine's Euro-Atlantic integration.

Problem Statement. The core issue addressed in this research is the lack of open data on bridge performance under military loads and the need for a systematic comparison between civil and military bridge engineering methodologies. The Russo-Ukrainian war has highlighted infrastructural vulnerabilities, generating an urgent demand for the comparative assessment of design standards. The civil sector emphasizes accuracy and lifecycle optimization via probabilistic models, while the military sector prioritizes speed and tactical mobility through simplified, deterministic systems such as the MLC (Military Load Classification). Previous studies have revealed critical knowledge gaps, including insufficient analysis of the dynamic interaction between military convoys, a lack of standardized cross-assessment protocols, and limited access to data on military vehicle movement. These challenges hinder comprehensive engineering assessments and the secure, uninterrupted functioning of Ukrainian infrastructure.

Results. The comparative analysis indicates that, in general, the concentrated wheel loads from NATO military vehicles up to MLC 70, as well as distributed contact pressures up to MLC 150, do not exceed the load values specified in Ukrainian DBN standards. However, a more accurate representation of compatibility is obtained by analyzing bending moments in the simply supported bridge superstructures. For bridges designed under load class A11, only MLC 30 vehicles and below are permissible. For load class A15, the threshold increases to MLC 40. Bridges designed for model NK-80 loads can accommodate vehicles up to MLC 100. Structures calculated for NK-100 loads are compatible with virtually all STANAG-class military vehicles.

Conclusions. Ukrainian civil design standards and NATO military standards (TDTC) are founded on fundamentally different philosophies: the civilian sector aims for precision and lifecycle optimization, while the military sector prioritizes tactical speed and mobility. Although a comparison of external load characteristics (concentrated and distributed pressure) shows that Ukrainian standards are generally robust, the analysis of internal forces offers more accurate insight. Ensuring full compatibility of bridges with military vehicles will require further detailed calculations accounting for dynamic effects and other specific factors. This study serves as an initial step toward future research aimed at harmonizing Ukrainian and international standards — a crucial element in strengthening Ukraine's defense capabilities and infrastructure resilience.

Keywords: standard, NATO, STANAG, MLC, DBN, load, bridge, vehicle, model, analysis.

УДК 624.21

Лукін Д. О., <https://orcid.org/0009-0003-9630-1085>*Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), м. Харків, Україна*

**МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ДОБОВИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ КОЛИВАНЬ
НА ЗАЛІЗОБЕТОННИЙ МІСТ В УМОВАХ КЛІМАТУ УКРАЇНИ*****Анотація***

Вступ. Вплив температури на прогонові будови мостів є одним із факторів, що постійно діють на конструкцію. Через низьку теплопровідність бетону виникають температурні перепади по перерізу конструкції, які викликають додаткові деформації та внутрішні напруження. З огляду на глобальні зміни клімату та зростання середньорічних температур повітря, ця проблема набуває особливої актуальності.

Проблематика. Недооцінка температурного впливу під час проєктування та експлуатації мостів може призводити до пошкоджень конструкцій, зменшення їхньої довговічності та порушення експлуатаційної надійності мостових споруд. Попри наявність нормативних моделей температурного впливу в європейських та американських стандартах, в Україні бракує систематизованих досліджень в умовах місцевого клімату. Особливо відчутною є нестача експериментальних даних, що ускладнює адаптацію або створення актуальних моделей для проєктування мостів.

Мета. Створення та верифікація математичної моделі розподілу температури в залізобетонній прогоновій будові мосту протягом добового циклу в умовах українського клімату. Модель враховує зовнішні кліматичні фактори та властивості матеріалів. Її верифікацію здійснено шляхом порівняння з натурними вимірюваннями, що дозволяє точніше оцінити температурні напруження та підвищити надійність мостових конструкцій.

Матеріали й методи. У статті розглядається вплив кліматичних факторів на температуру залізобетонної прогонової будови мосту в умовах клімату України. Для дослідження температурного режиму мосту було використано аналітичні та числові методи моделювання. Методика включала експериментальні вимірювання температури на поверхні прогонової будови та теоретичне моделювання зміни температури протягом дня із застосуванням методу скінченних елементів. Також проведено аналіз напружено-деформованого стану елементів прогонової будови.

Результати. Проведене моделювання кліматичних впливів з урахуванням сонячної радіації, температури повітря та швидкості вітру показало хорошу відповідність натурним вимірам, похибка в більшості точок не перевищувала 10 %. Максимальна різниця температури по висоті прогонової будови становила 14,2 °С, що свідчить про можливе зростання цих значень у літній період. Отримані результати підтверджують необхідність врахування реального температурного поля при проєктуванні та оцінці технічного стану мостів в умовах клімату України.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що перепади температури, по перерізу елементів прогонової будови, викликають внутрішні напруження, які потрібно враховувати під час проєктування та експлуатації залізобетонних мостів. Запропонована розрахункова математична модель, яка враховує сонячну радіацію, температуру повітря та швидкість вітру, показала високу точність і може ефективно використовуватись для прогнозування температурного поля в елементах конструкції мосту. Отримані результати свідчать про необхідність врахування реальних кліматичних умов під час проєктування та експлуатації мостів для забезпечення їхньої надійності та довговічності.

Ключові слова: автомобільна дорога, залізобетонна прогонова будова, кліматичні умови, математична модель, метод скінченних елементів, міст, напружено-деформований стан, температура, температурне поле, температурні напруження, сонячна радіація.

Вступ

Температурний вплив на прогонові будови мостів є постійним і неминучим чинником. Через низьку теплопровідність бетону в елементах залізобетонних прогонових будов виникають додаткові внутрішні зусилля, спричинені нерівномірним розподілом температури по перерізу конструкції. Часто значення цього впливу недооцінюють, однак практика свідчить, що за певних умов температурні деформації можуть суттєво позначатися на експлуатаційних характеристиках мостової споруди. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах глобальних кліматичних змін і зростання середньорічних температур повітря. За таких обставин температурний вплив стає ще більш суттєвим фактором, який необхідно враховувати при проєктуванні, експлуатації та обстеженні мостів. Для ефективного аналізу й прогнозування температурних навантажень слід поєднувати результати експериментальних досліджень на існуючих мостах з методами теоретичного моделювання.

Дослідження впливу температури на мостові конструкції розпочалося ще в середині минулого століття. Інженери та науковці почали виявляти дефекти на залізобетонних мостах, що експлуатуються, які пов'язувалися з дією кліматичних факторів, зокрема температури. Вивчення виникнення та розвитку таких дефектів активно проводилось у Німеччині [1, 2], Австрії [3], США [3, 4], де фіксували характерні пошкодження залізобетонних елементів. У Швеції, наприклад, на залізобетонних мостах спостерігали тріщини в елементах прогонових будов із сонячного боку [5]. Таким чином, температура виявилась одним із чинників, що спричиняє утворення тріщин і пошкоджень у конструктивних елементах залізобетонних мостів [6–8]. Це зумовило потребу в глибокому аналізі кліматичних впливів і дослідженні змін температурного поля в поперечному перерізі конструкцій, а також їхнього впливу на експлуатаційні характеристики споруд. Поєднуючи експериментальні дані, отримані на реальних об'єктах, із теоретичними моделями, дослідники створюють методики прогнозування та врахування температурних впливів під час проєктування й експлуатації мостів [9, 10].

У результаті досліджень різниці температур, що виникають по висоті залізобетонної прогонової будови (яку також називають температурним перепадом або градієнтом), проведених М. Прістлі у Новій Зеландії [11, 12], було запропоновано описувати її за допомогою кривої п'ятого порядку:

$$T(y) = T_0 \left(\frac{y}{1200} \right)^5, \quad (1)$$

де y — відстань від верху прогонової будови, мм;

T_0 — максимальне значення температури по висоті прогонової будови, °C.

Ці результати згодом були включені до національних будівельних норм Нової Зеландії [13], а пізніше й Австралії [14]. Базуючись на цьому досвіді та додаткових дослідженнях, проведених у США [15–17], спрощена форма цієї температурної кривої була включена і до американських будівельних норм. У Великій Британії дослідження, проведені з урахуванням місцевих кліматичних умов [18, 19], призвели до виявлення іншого типу різниці температур по висоті. Це знайшло відображення у відповідних національних будівельних стандартах [20], які згодом були впроваджені до європейського стандарту Eurocode EN 1991-1-5 [21], а пізніше перекладені в Україні у вигляді нормативного документа [22]. Проте, застосування однакового температурного перепаду по висоті конструкції для всіх країн Європи незалежно від клімату викликає сумніви.

На тлі глобальних змін клімату актуальність досліджень у цій сфері лише зростає [23, 24]. Сучасні наукові роботи активно вивчають вплив температурних чинників на напружено-деформований стан елементів мостів у різних кліматичних зонах [25–27]. В Україні також проводили дослідження кліматичних впливів та зміни температури в перерізі прогонових будов [28–30], однак більшість із них мали обмежений або несистемний характер, зокрема через нестачу експериментальних даних для мостів в кліматичних умовах України. Існуючі державні будівельні норми [31–33], з свого боку, фактично не враховують нерівномірного розподілу температури по перерізу залізобетонних елементів, а також пов'язаних із цим додаткових напружень і деформацій. Тому надзвичайно

актуальним є теоретичне моделювання таких впливів на основі експериментальних даних, отриманих із реальних мостових конструкцій в умовах клімату України.

Метою цього дослідження є розроблення моделі кліматичних впливів, які протягом добового циклу діють на прогонову будову залізобетонного мосту. Порівнюючи результати числового моделювання з експериментальними даними, отриманими під час натурних вимірювань, досліджується можливість достовірного прогнозування зазначених температурних впливів. Окрему увагу приділено аналізу отриманих результатів та їхнього впливу на напружено-деформований стан елементів прогонової будови.

Виклад основного матеріалу

Кліматичні чинники та температура мосту

Зміни, та перепади температури в елементах прогонової будови, ураховуючи фізичний процес теплообміну, відбуваються трьома способами: теплопровідністю, конвекцією та тепловим випромінюванням.

Серед основних кліматичних чинників, що впливають на зміну температурного режиму мостових споруд (**рис. 1**), виділяють сонячну радіацію, температуру навколишнього повітря та швидкість вітру [9, 34]. Найбільш суттєвий вплив здійснює сонячна радіація, яка формує нерівномірний розподіл температур у конструкції. Температура повітря переважно визначає рівномірну температуру мосту, тоді як вітер сприяє примусовій конвекції між повітрям і поверхнею споруди, що з часом вирівнює температурні показники конструкції з температурою довкілля. Теплове випромінювання інших об'єктів зазвичай впливає на температуру незначно.

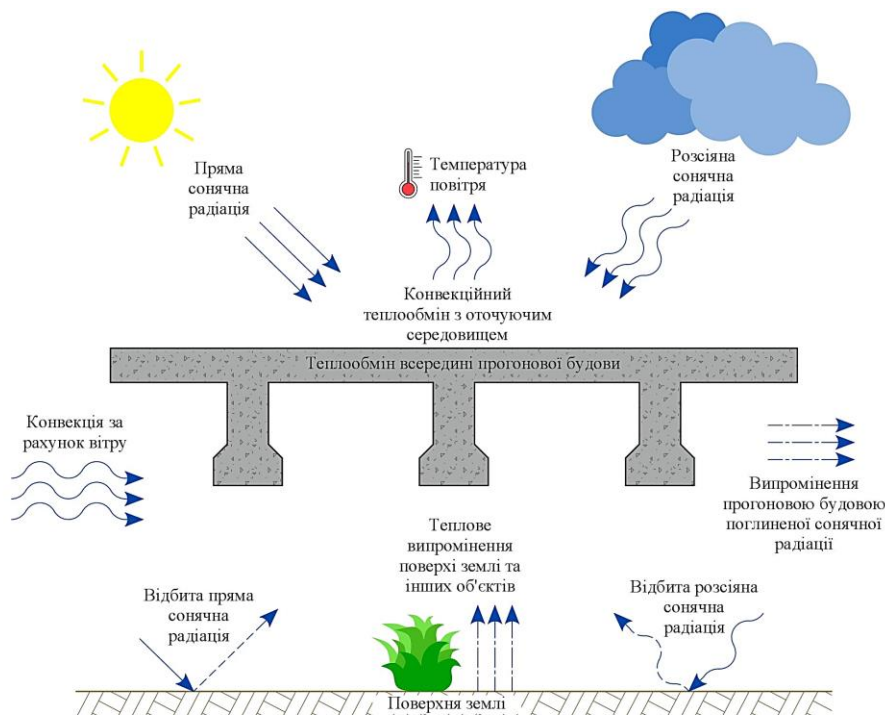


Рисунок 1 — Основні чинники, що впливають на температуру прогонової будови

Теплообмін випромінюванням

Передача тепла шляхом випромінювання відіграє ключову роль у процесі теплообміну на поверхні мостових конструкцій [16]. Упродовж світлового дня конструкція накопичує теплову енергію внаслідок дії сонячної радіації. Кількість сонячної енергії, що потрапляє на поверхню моста, залежить від погодних, атмосферних та географічних умов. Водночас частина тепла втрачається через відбиття

від поверхні елементів моста. Рівень цих втрат визначається властивостями поверхні, зокрема її кольором. Кількість іррадіації, що поглинається поверхнею, можна визначити за таким виразом [35]:

$$G_{abs} = \alpha_{sc} G, \quad (2)$$

де G_{abs} — поглинута іррадіація, тобто кількість енергії, яку поглинає поверхня на одиницю площі;
 α_{sc} — поглинальна здатність поверхні;
 G — іррадіація, тобто сумарне випромінювання, яке падає на одиницю площі поверхні з навколишнього середовища.

Також відбувається чиста втрата енергії через теплове випромінювання, яке було накопичене в конструкції, в навколишнє середовище. Така втрата тепла відбувається здебільшого вночі та може призвести до того, що температура поверхні буде навіть нижчою за температуру навколишнього повітря [15]. Цей механізм описується законом Стефана – Больцмана та в загальному вигляді має наступний вигляд [35]:

$$Q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4), \quad (3)$$

де Q — кількість тепла, що випромінюється;
 ε — коефіцієнт теплового випромінювання поверхні, характеризує здатність поверхні тіла випромінювати теплову;
 σ — стала Стефана – Больцмана, визначає зв'язок між потоком випромінювання й ефективною температурою тіла і дорівнює $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$;
 T_s — температура поверхні тіла;
 T_{sur} — температура навколишнього середовища.

Сонячна радіація

Кількість сонячної радіації, що потрапляє на поверхню елементів мосту, залежить від кількох чинників: положення Сонця на небі у певний момент часу, географічного розташування моста, хмарності атмосфери, а також орієнтації та нахилу поверхні конструкції. Положення Сонця відносно будь-якої точки на земній поверхні визначається наступними кутами: географічною широтою φ , годинним кутом ω , деклінацією Сонця δ , кутом зеніту θ_z , висотою підйому сонця α_s та азимуту Сонця γ_s [36].

Географічна широта φ та годинний кут ω , характеризують положення точки на поверхні Землі відносно екватора та середнього меридіана відповідного часового поясу. Деклінація Сонця δ визначає сезонні зміни висоти Сонця над горизонтом впродовж року. Для заданого дня року її можна визначити за наближеною емпіричною формулою:

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right), \quad (4)$$

де n — номер дня року починаючи з 1 січня.

Кут зеніту Сонця θ_z , це кут між вертикаллю в точці спостереження та напрямком на Сонце. Кут висоти підйому сонця α_s показує на якій висоті над горизонтом знаходиться Сонце в момент часу. Азимут Сонця γ_s визначає напрямок на Сонце в горизонтальній площині. У цій статті напрямок відліку азимуту Сонця приймається «на південь» відповідно до [36], і змінюється від -180° (для східної півсфери) до $+180^\circ$ (для західної півсфери).

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \times \cos \omega \times \cos \delta + \sin \varphi \times \sin \delta, \quad (5)$$

$$\alpha_s = \frac{\pi}{2} - \theta_z, \quad (6)$$

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \right) \right|, \quad (7)$$

де $\text{sign}(\omega)$ — це знак годинного кута Сонця (ω). Тобто, якщо $\omega > 0$, то $\text{sign}(\omega) = +1$, а якщо $\omega < 0$, то $\text{sign}(\omega) = -1$.

Сумарну сонячну радіацію, що надходить до будь-якої точки на Землі в момент певний часу, називають іррадіацією і визначають як суму трьох складових: прямої, розсіяної та відбитої радіації.

Сонячну радіацію, що надходить безпосередньо від сонячного диска, називають прямою сонячною радіацією. Інтенсивність прямої сонячної радіації, що потрапляє на горизонтальну поверхню I_B , може бути визначена за моделлю, що базується на законі Бугера — Ламберта — Бера. Це досить поширений підхід для оцінки прямої сонячної радіації [29, 41 – 44], що дозволяє врахувати хмарність та мутність атмосфери:

$$I_B = I_0 e^{-km} \cos \theta_z = I_0 P^m \cos \theta_z, \quad (8)$$

$$m = \csc \alpha_s, \quad (9)$$

де I_0 — сонячна стала, що дорівнює приблизно $I_0 \approx 1367 \text{ Вт/м}^2$, та може бути уточнена для певного дня року;

k — коефіцієнт поглинання (або зникнення) сонячного випромінювання в атмосфері;

m — відносна оптична маса повітря;

$P = e^{-k}$ — коефіцієнт прозорості атмосфери.

Інтенсивність прямої сонячної радіації, що потрапляє на негоризонтальну поверхню може бути розрахований замінивши θ_z на кут падіння сонячного випромінювання θ на цю поверхню.

Розсіяна сонячна радіація — це частина сонячного випромінювання, яке змінює свій напрямок та розсіюється в атмосфері за рахунок її неоднорідності. Для ясного дня інтенсивність розсіяного випромінювання I_D на горизонтальну поверхню, може бути визначено за моделлю Лю – Джордана [36, 41]:

$$I_D = (0,271 \cdot I_0 - 0,294 \cdot I_{Bn}) \cdot \cos \theta_z, \quad (10)$$

де I_{Bn} — інтенсивність прямої нормальної сонячної радіації, Вт/м^2 .

Відбита сонячна радіація залежить від відбивної здатності поверхні, яка характеризується коефіцієнтом альbedo ρ_g . Значення альbedo може змінюватися залежно від типу ландшафту, характеру відбиваючих об'єктів та пори року. Інтенсивність відбитого випромінювання, яке після взаємодії з навколишнім середовищем досягає нахиленої поверхні, може бути визначена за ізотропною моделлю Лю – Джордана [36]:

$$I_R = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \rho_g (I_B + I_D), \quad (11)$$

де β — кут нахилу поверхні до горизонту.

Конвекція

Конвекційний теплообмін між потоком повітря та поверхнею тіла, що контактує з цим потоком, називається конвекційною тепловіддачею. Залежно від механізму виникнення руху повітря, розрізняють вільну та примусову конвекцію. У випадку мостових конструкцій на їхній поверхні можуть діяти обидва типи конвекції. Вільна конвекція виникає внаслідок різниці температур між

конструкцією та навколишнім повітрям. Примусова конвекція спричинена дією атмосферного вітру, що змушує повітря активно обтікати поверхню. Процес конвекційної тепловіддачі може бути описаний законом охолодження Ньютона – Ріхмана, який має такий вигляд [35]:

$$q = h_c (T_s - T_\infty), \quad (12)$$

де q — густина теплового потоку при конвекції, Вт/м²;

h_c — коефіцієнт теплопередачі (або тепловіддачі) при конвекції, Вт/м²/°C;

T_s — температура поверхні, °C;

T_∞ — температура рідини або газу, °C.

Коефіцієнт теплопередачі при конвекції h_c може бути визначений з виразу [9]:

$$h_c = 4v + 5,99, \quad (13)$$

де v — швидкість вітру, м/с;

Теплопровідність

У попередніх підрозділах було розглянуто процеси теплопередачі на поверхні елементів мосту. Проте перенесення тепла всередині конструктивних елементів зумовлене теплопровідністю, яка описується законом Фур'є. Для аналізу теплопровідності в матеріалах мостових конструкцій зазвичай застосовується диференціальне рівняння теплопровідності, яке встановлює зв'язок між температурою, просторовими координатами та часом [34]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (14)$$

де x, y, z — просторові координати, що характеризують положення в системі координат по ширині висоті та довжині мосту;

k_x, k_y, k_z — коефіцієнти теплопровідності в напрямках відповідних координат;

t — час, с;

T — температура в точці з координатами (x, y, z) в час t ;

Q — тепловий потік;

c — питома теплоємність матеріалу;

ρ — щільність матеріалу елемента.

Опис мосту

Трипрогоновий залізобетонний міст через річку Марунька, розташований поблизу села Чижиків на автомобільній дорозі II категорії, має прогонову будову, що складається з двох частин — старої та нової (рис. 2). Прогонова схема мосту – 6,0 + 8,66 + 6,0 м.



Рисунок 2 — Загальний вид залізобетонного мосту

Стара частина представлена монолітною нерозрізною залізобетонною плитою зі звичайним армуванням, яка із зовнішнього боку має тротуарну консоль.

Нова частина моста виконана як розрізна залізобетонна балкова конструкція. У середньому прогоні розміщено шість двотаврових попередньо напружених балок довжиною 8,66 м (за типовим проєктом ВТП-16). Крайні прогони нової частини збудовані зі збірних залізобетонних плитних балок довжиною 6,0 м із звичайним армуванням. У кожному з крайніх прогонів встановлено по чотири плитні балки шириною 0,98 м та висотою 0,3 м (за типовим проєктом Випуск 5-04-145). Додатково, під тротуаром у крайніх прогонах встановлено по одній П-подібній балці висотою 1,1 м та шириною 0,65 м.

Виконання замірів температури на мосту

Заміри температури на мосту виконували в ясний день 31 травня 2023 року. Виміри температури здійснювали об 11:00 ранку та 14:00 дня за характеристичними точками перерізу конструкції за допомогою електронного безконтактного пірометра. Вимірювання проводили на крайньому прогоні мосту. Результати замірів температури наведені на **рис. 3** та **табл. 1**.

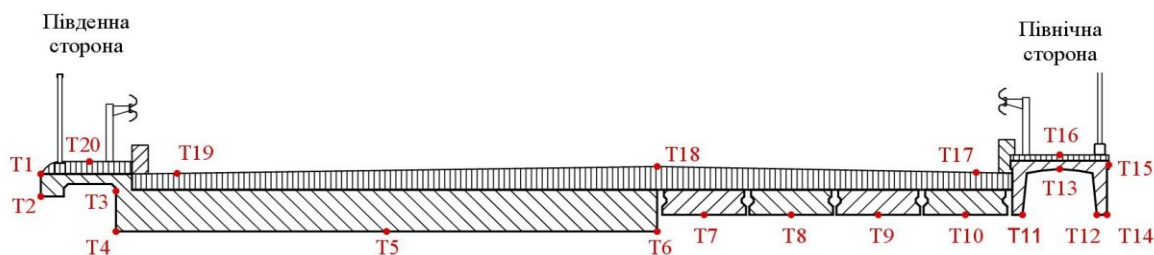


Рисунок 3 — Схема вимірів температури по перерізу мосту

Таблиця 1

Значення заміряних температур, °C

Точка виміру	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Температура в 11:00	25,1	23,7	19,8	18,9	18,8	17,9	18,4	18,7	18,7	18,7
Температура в 14:00	35,9	29,5	21,7	22,5	19,9	19,4	19,4	19,7	19,6	19,7
Точка виміру	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20
Температура в 11:00	18,8	20,5	18,0	21,8	24,0	40,0	33,9	34,0	35,9	39,9

Температура в 14:00	21,3	21,6	20,3	23,6	23,4	57,5	42,3	41,8	45,2	53,7

Протягом дня погода була ясна, з невеликою хмарністю. Температура повітря досягала максимуму в 24 °С. Швидкість вітру, відповідно до метеорологічних даних коливалася від 2 м/с до 4 м/с і в цілому була невелика.

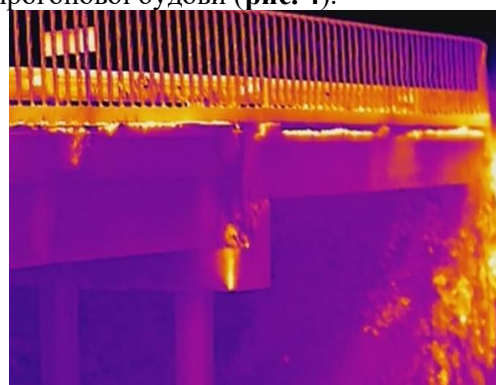
Міст орієнтовано з північного сходу на південний захід, тож у першій половині дня під прямим сонячним випромінюванням знаходиться південна сторона мосту, а у другій половині дня північна. Азимут повороту бічних граней мосту складає $\gamma = -44^\circ$ та -134° , а кут падіння сонячного випромінювання θ для кожної із сторін, у певний момент часу може бути визначений за рівнянням [36], залежно від азимуту сонця γ_s , кута нахилу поверхні елементу β , та кута зеніту Сонця θ_z :

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma). \quad (15)$$

Крім того було проведено огляд конструкції за допомогою тепловізора для аналізу загального характеру розподілу температурних полів на поверхні прогонової будови (рис. 4).



а)



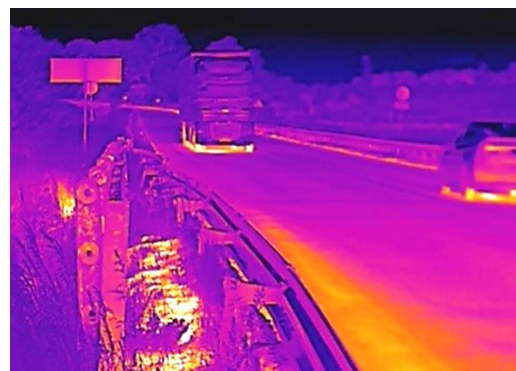
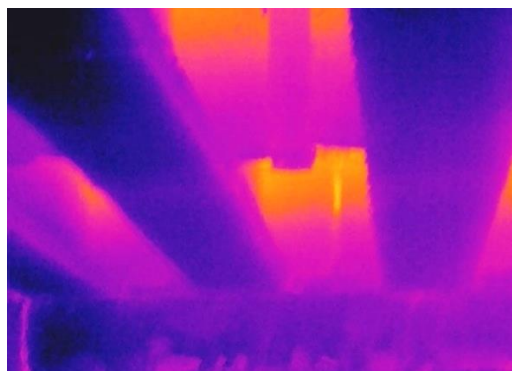
б)



в)



г)



д)

е)

- а) балки середнього прогону;
- б) П-подібна балка крайнього прогону (в тіні);
- в) бічна поверхня плитної балки;
- г) низ плитних балок та монолітної прогонової будови;
- д) діафрагмове об'єднання балок середнього прогону;
- е) проїзна частина на мосту.

Рисунок 4 — Термограми конструкцій мосту

Властивості матеріалів та вихідні дані для моделювання

Для подальшого аналізу важливими є також механічні та теплотехнічні властивості матеріалу прогонової будови.

Міцність бетону була визначена за допомогою неруйнівного контролю та відповідає класу бетону В25, тоді модуль пружності $E = 30,0$ ГПа, відповідно до [31]. Модуль пружності асфальтобетону прийнятий відповідно до [37], як для II категорії дороги.

Коефіцієнт теплопровідності k , що характеризує здатність матеріалу проводити тепло, прийнятий для бетону рівним $1,4$ Вт/(м·°К) [38], а для асфальтобетону рівним $0,9$ Вт/(м·°К) [39]. Питома теплоємність прийнята $C_p = 920$ Дж/кг·°С для бетону [38] та $C_p = 880$ Дж/кг·°С для асфальтобетону [39]. Коефіцієнти поглинання сонячної енергії α_{sc} та коефіцієнт теплового випромінювання зовнішньої поверхнею ε прийняті відповідно до [40].

Альbedo поверхні під мостом, зважаючи на те, що під крайнім прогоном росте травостій, прийняте $\rho_g = 0,1$. Більш детально прийняті властивостей матеріалів наведені в **табл. 2**.

Таблиця 2

Властивості матеріалів прийняті під час розрахунку

	Коефіцієнт теплопровідності k , Вт/м·°К	Питома теплоємність C_p , Дж/кг·°С	Модуль пружності E , ГПа	Коефіцієнт температурного розширення α , 1/°С	Коефіцієнт поглинання сонячної енергії α_{sc}	Коефіцієнт теплового випромінювання ε
Бетон прогонових будов	1,4	920	30,00	10×10^{-6}	0,7	0,62
Асфальтобетон	0,9	880	0,19	$3,0 \times 10^{-5}$	0,9	0,93

Важливим є також значення початкової температури. Це така температура, за якої напруження в елементах залізобетону дорівнюють нулю. Точне визначення такої температури на практиці представляє собою складну задачу, тому в дослідженнях прийнято приймати початкову температуру такою, за якої температура прогонової будови зрівнюється з температурою повітря, а температурний перепад по перерізу прогонової будови мінімальний [18, 19, 41]. Зазвичай така температура фіксується рано вранці, коли сонячна радіація ще не почала діяти. У нашому випадку така температура прийнята в 6:00 ранку (схід сонця фіксувався в 5:25).

Розрахункова модель

У цьому дослідженні розглядається тільки крайній прогін мосту. Розрахункова модель (**рис. 5**) будується за допомогою методу скінченних елементів, до якої застосовані граничні умови описані вище.

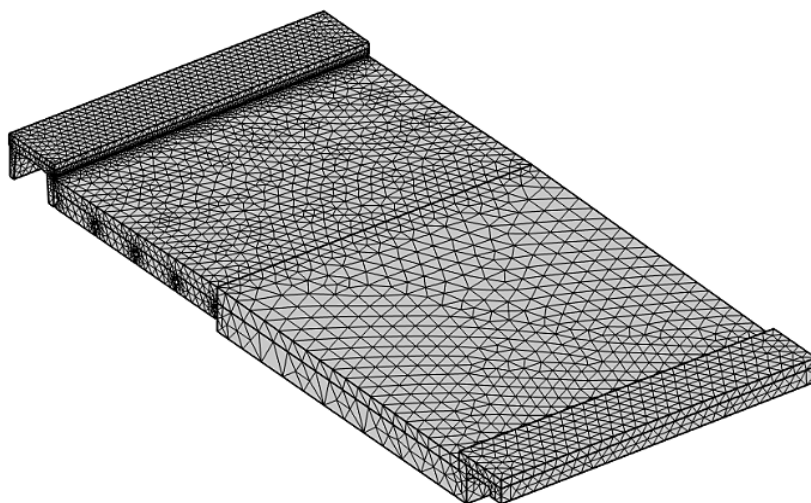


Рисунок 5 — Розрахункова модель прогонової будови

Початок симуляції кліматичних впливів на елементи прогонової будови відбувається з 6:00 ранку 31 травня, протягом доби, по 6:00 ранку 1 червня. Початкова температура елементів мосту прийнята рівною температурі повітря о 6 ранку, а саме 15,5 °С. Зміна інтенсивності сумарної, прямої та розсіяної сонячної радіації на горизонтальну поверхню протягом дня наведено на **рис. 6**. Розподіл температури повітря протягом дня наведено на **рис. 7**.

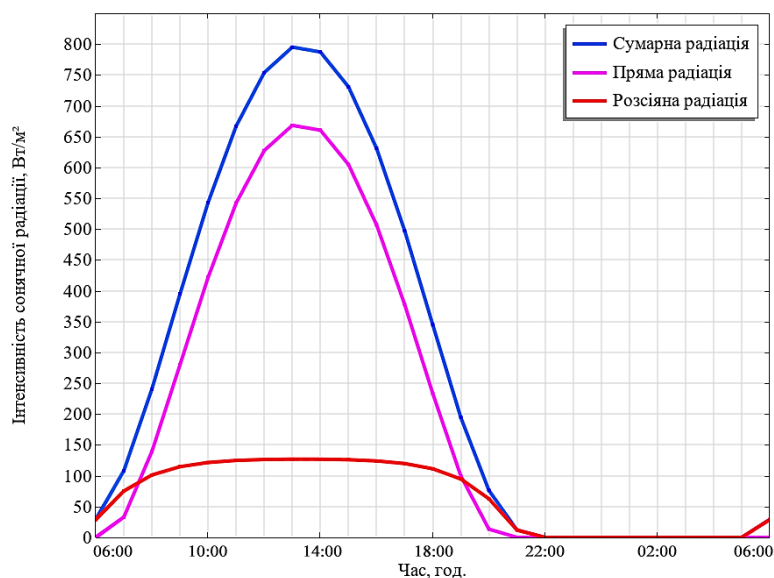


Рисунок 6 — Інтенсивність сумарного, прямого та розсіяного сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню протягом доби

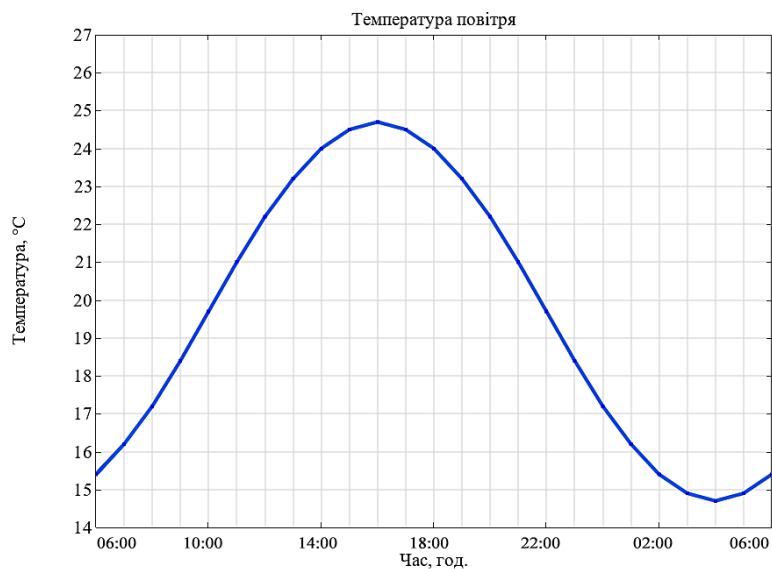


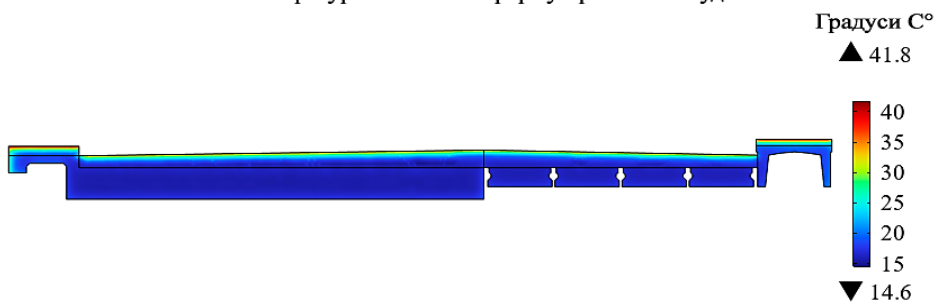
Рисунок 7 — Зміна температури повітря протягом розглянутої доби з 6:00 31 травня по 6:00 1 червня 2023 року

Результати розрахунку

У результаті моделювання кліматичних факторів, можемо дослідити зміну температури прогонової будови протягом дня. Розподіл температури по перерізу прогонової будови в різний момент часу наведений на **рис. 8**.

Час 11:00

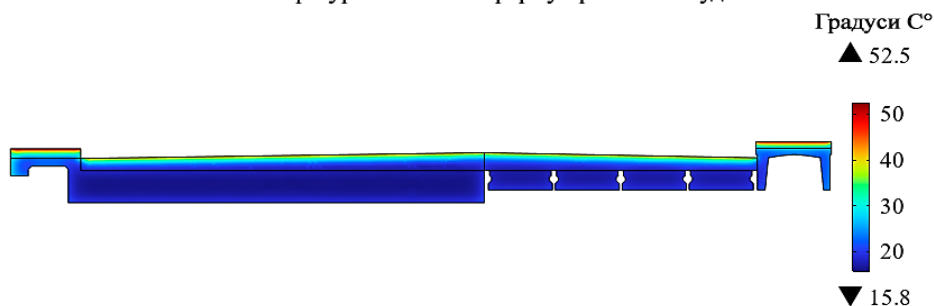
Температурне поле по перерізу прогонової будови



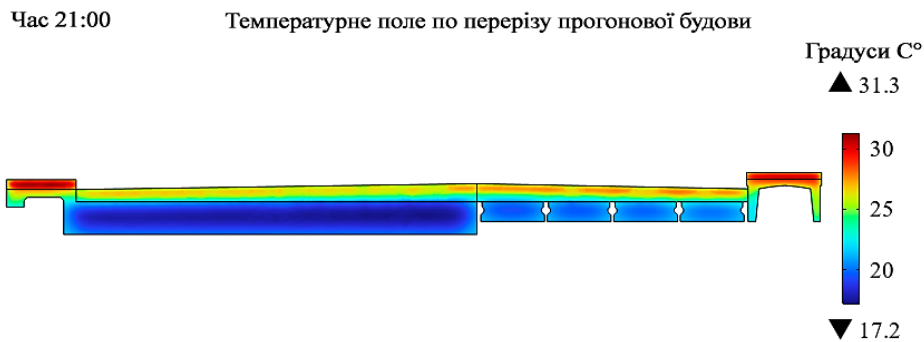
а)

Час 14:00

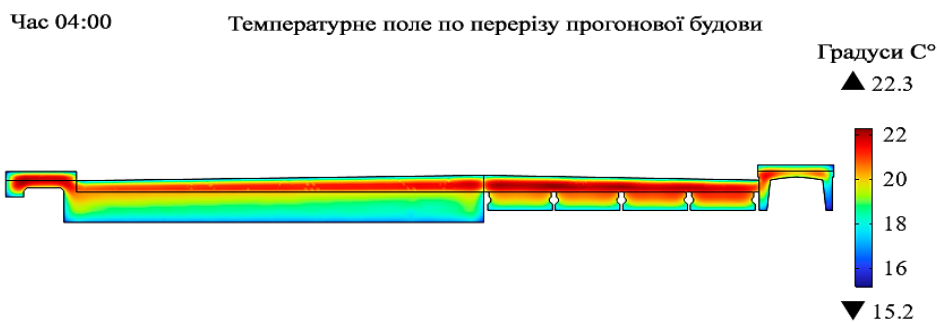
Температурне поле по перерізу прогонової будови



б)



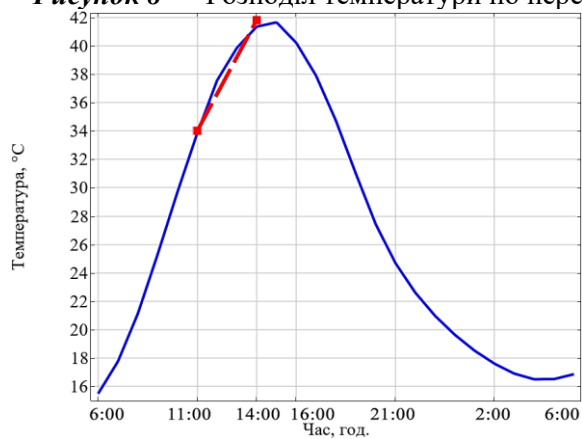
в)



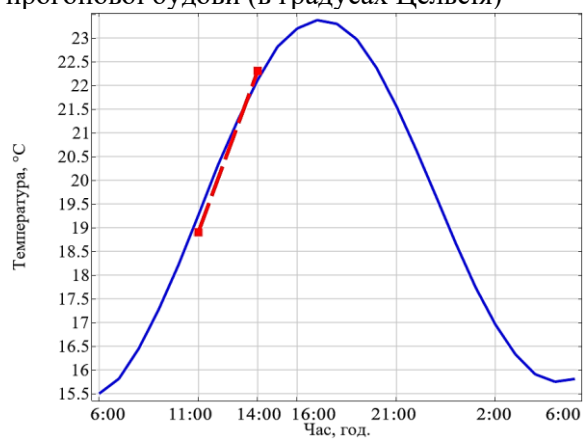
г)

- а) в 11:00 ранку; в) в 21:00;
б) в 14:00; г) в 4:00 ранку наступного дня.

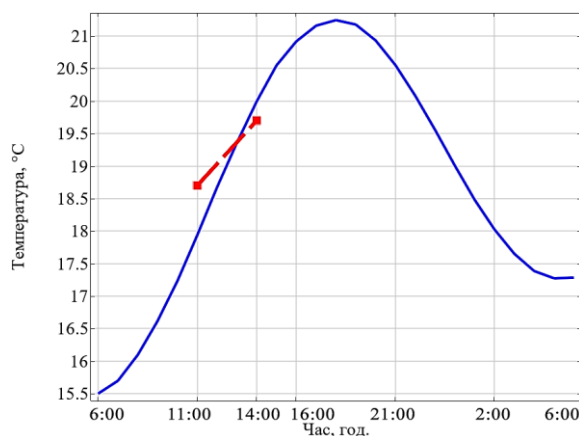
Рисунок 8 — Розподіл температури по перерізу прогонової будови (в градусах Цельсія)



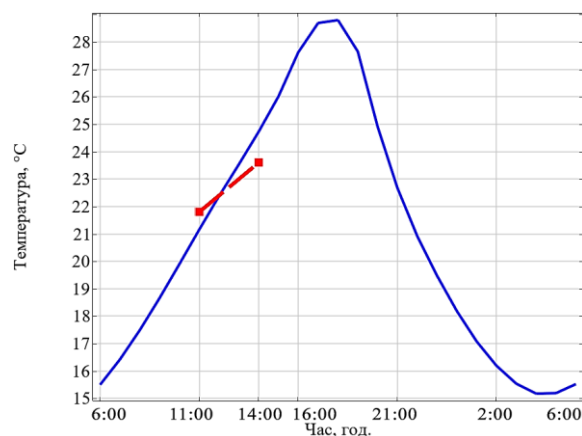
а)



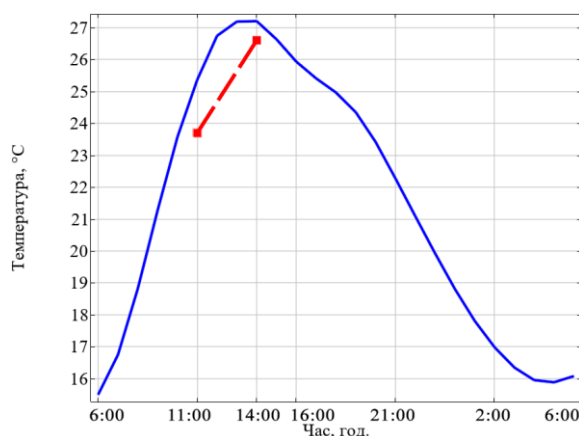
б)



в)



г)



д)

а) проїзна частина (Т18);	г) бічна грань П-подібної балки (Т14);
б) низ монолітної прогонової будови (Т4);	д) бічна грань монолітної прогонової будови (Т2).
в) низ плитних балок (Т8);	

Рисунок 9 — Зміна температури з часом в точках перерізу мосту, заміряна (червоним кольором) та отримана теоретично (синім кольором)

Отримані результати теоретичного моделювання температури, що виникає на поверхні прогонової будови при порівнянні з польовими вимірами показує непогану точність. По більшості точок похибка між теоретичними та експериментальними даними не перевищує 10 %. Найбільша відмінність виникає на боковій поверхні прогонової будови (до 20 %). Ця похибка пов'язана з точністю польових вимірів, а також з дещо узагальненим підходом до моделювання кліматичних факторів, зокрема хмарності. Температура в деяких точках, як теоретична, так і заміряна наведена на **рис. 9**.

Заміряні та отримані теоретично температурні перепади по висоті прогонової будови, можна порівняти зі значеннями та виглядом температурних перепадів, що прийняті в Eurocode EN 1991-1-5 [21], а також з кривою п'ятого порядку Прістлі [11, 12] (формула 1). Значення температури прийняті на поверхні конструкції, тому у верхній частині прогонової будови використані значення температури, що встановлювалася в тротуарній консолі. Такий максимальний заміряний температурний перепад по висоті виник у 14:00, а змодельований у 12:00. Порівняння таких перепадів наведено для монолітної прогонової будови на **рис. 10**. Варто також зазначити, що температурні перепади були заміряні і відповідно змодельовані, хоч і в теплий, але травневий день. Тому значення перепаду температур у більш спекотні літні дні може бути значно більшим.

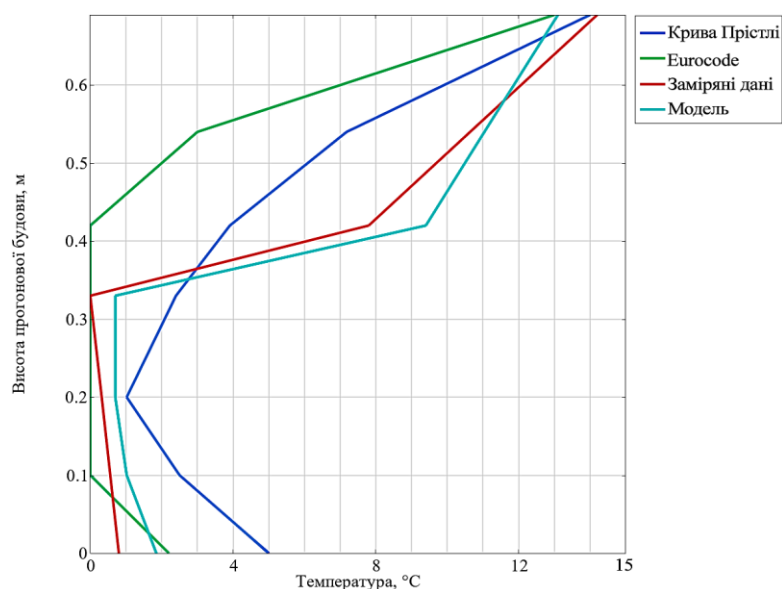


Рисунок 10 — Температурний перепад поверхні монолітної прогонової будови по висоті

Внутрішні напруження, що виникають від нерівномірного розподілу температури по перерізу прогонової будови протягом розрахункової доби коливаються від 2,07 МПа (в 4:00 ранку) до —3,51 МПа (в 14:00) і наведені на **рис. 11** та **рис. 12**.

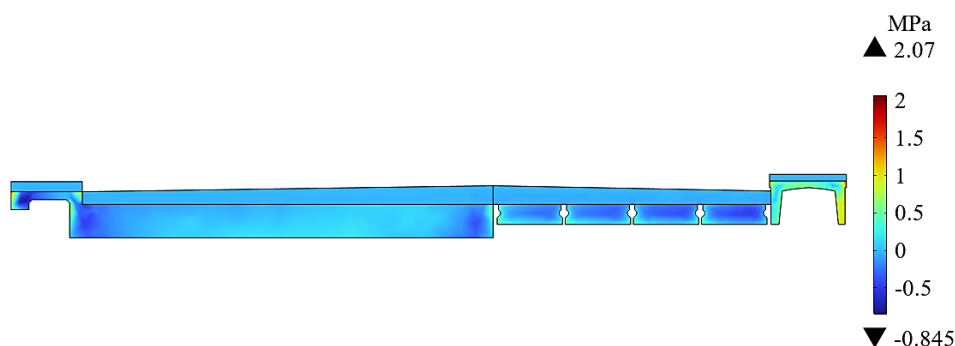


Рисунок 11 — Внутрішні напруження, що виникають у прогоновій будові від дії температури: в 4:00

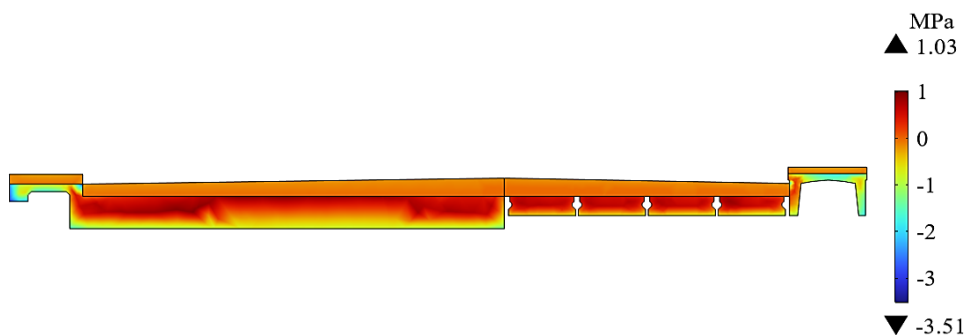


Рисунок 12 — Внутрішні напруження, що виникають у прогоновій будові від дії температури: в 14:00

Висновки

Дія температури є одним з чинників, що впливають на технічний стан залізобетонних мостів. З огляду на глобальні кліматичні зміни, його значущість може зростати. Результати моделювання

основних кліматичних чинників, які впливають на температурний режим мосту, свідчать, що зміни температури можна прогнозувати теоретично з достатньою точністю. Розподіл температури по перерізу прогонової будови, отриманий з розрахункової моделі побудованої методом скінченних елементів, добре узгоджуються з результатами натурних вимірювань, проведених на мосту через річку Марунька. Максимально зафіксована різниця температури по висоті прогонової будови становить 14,2 °C у теплий травневий день, однак у більш спекотні літні періоди це значення може бути суттєво вищим. Проведене порівняння отриманих результатів із поширеними моделями врахування температурних перепадів по висоті конструкції, вказує на необхідність їх адаптації до кліматичних умов України. Крім того, встановлено, що нерівномірний розподіл температури по висоті конструкції спричиняє виникнення значних внутрішніх напружень у прогоновій будові мосту, що може впливати на її довговічність та надійність. Таким чином, ця проблема потребує подальшого вивчення та дослідження.

Список літератури

1. Leonhardt F., Kolbe G., Peter J. Temperature differences endanger prestressed concrete bridges. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1965. Vol. 7, P. 157–163.
2. Leonhardt F., Lippoth W. Folgerungen aus Schäden an Spannbetonbrücken. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1970. Vol. 65(10), P. 231–244.
3. Zichner T. Thermal Effects on Concrete Bridges. *C. E. B. Enlarged Meeting—Commission 2*, Pavia, 1981. P. 292–313.
4. Memorandum: In-Depth Inspection of the Creeks and Spalls Developing in the Walls and Bottom Slabs of the F-11-AK, F-11-AL Structures over Miller Creek on I-70. *Colorado Department of Highways*, Denver, 1982.
5. Larsson O. Climate related thermal actions for reliable design of concrete structures. Doctoral Thesis, Lund, 2012. P. 159.
6. Лучко Й. Й., Кархут І. І., Кравець І. Б. Дослідження мостів, збудованих в Україні в 1998 і 2001 роках, що були зруйновані тривалою експлуатацією та повеннями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2021. № 20, С. 26-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/245313>.
7. Лучко, Й. Тріщиностійкість бетонних та залізобетонних конструкцій з позицій механіки руйнування. *Наука та будівництво*, Київ, 2024. Вип. 39(1). С. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-7>.
8. Сало В. Ю., & Сало О. Ю. До питання експлуатаційного стану залізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів у західних областях України. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*, Львів, 2018. Вип. 888, С. 123–126.
9. Wang Y. G., He X. J., Ouyang F., He J., Wu W. W., Wu C. New method for fine calculation of bridge temperature field based on BIM solar radiation analysis. *Advances in Civil Engineering, Hindawi*. 2023. Vol. 2023(1), 6855116, P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6855116>.
10. Raghav Mahto. Thermal stress analysis in pre-stressed concrete bridges using COMSOL Multiphysics. *International Journal of Surveying and Structural Engineering*. 2025; Vol. 6(1), P. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.22271/2707840X.2025.v6.i1a.36>.
11. Priestley M. Structural Model of a Prestressed Concrete Box Girder Bridge Phase 2: Thermal Loading. Vol 1- Model Description and Temperature Results. *MWD Central Labs*, 1972. Report No. 440.
12. Priestley, M. Linear Heat-Flow Analysis of Concrete Bridge Deck. Research Report. Department of Civil Engineering. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1976. 48 p.
13. NZ Transport Agency. Bridge Manual (3rd edition) (SP/M/022). Wellington, NZ, 2013. 374 p.
14. Australian Standard AS 5100.2:2017 Bridge design. Part 2: Design loads, Sydney 2017. 137 p.
15. Imbsen R. A., Vandershaf D. E., Schamber R. A., Nutt R. V. Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures. National Cooperative Highway Research Program Report, 276. Washington, 1985. 99 p.
16. Potgieter I. C., Gamble W. L. Response of Highway Bridges to Nonlinear Temperature Distributions. Civil Engineering Studies, Structural Research Series N. 505. Illinois, 1983. 320 p.
17. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 5th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C., 2010. 1822 p.

18. Emerson M. The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 561. Department of the Environment, Crowthorne, 1973. 33 p.
19. Emerson M. Temperature differences in bridges: basis of design requirements. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 765. Department of the Environment, Crowthorne, 1977. 39 p.
20. BRITISH STANDARD BS 5400-2:1978. Steel, concrete and composite bridges — Part 2: Specification for loads. London 1978. 48 p.
21. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions – Thermal actions. Brussels, 2003. 49 p.
22. ДСТУ-НБ EN 1991-1-5:2012 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-5. Загальні дії. Теплові дії (EN 1991-1-5:2003, IDT). Зміна № 1. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. 59 с. (Інформація та документація).
23. Athanasopoulou A., Sousa M.L., Dimova S., Rianna G., Mercogliano P., Villani V., Croce P., Landi F., Formichi P., Markova J. Thermal design of structures and the changing climate, EUR 30302 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. 70 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.2760/128894>.
24. Milić P., Kušter Marić, M. Climate change effect on durability of bridges and other infrastructure. *Građevinar Časopis Hrvat. Saveza Građevinskih Inženjera*, 2023. Vol. 75, P. 893–906. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.3756.2023>.
25. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. In *AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, p. 020033. DOI: <https://doi.org/10.1063/12.0038623>.
26. Liu C., DeWolf J. T. Effect of temperature on modal variability for a curved concrete bridge. In *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2006. Vol. 6174, P. 1050–1060. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.655811>.
27. Bian J., Wang Y., Li Y. Application of Thermodynamic Models in Bridge Temperature Field Simulation and Thermal Stress Analysis. *International Journal of Heat & Technology*, 2024. Vol. 42(4), P. 1317–1326. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420422>.
28. Лучко Й. Й., Ковальчук В.В. Розподіл температури у залізобетонних балкових конструкціях мостів. *Мости і тунелі: теорія, дослідження, практика*, 2012. Вип. 3, С. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2012/26483>.
29. Безбабічева О. І., Розенфельд М. В., Більченко А. В., Лукін О. М., Бойчук І. П. Науково-дослідна робота 0207U006841, 0107U004543. Звіт про науково-дослідну роботу розробити рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в мостових конструкціях з покриттям. Харків, ХНАДУ, 2007. 139 с.
30. Лучко Й. Й., Ковальчук В. В. Алгоритм визначення граничних умов, для дослідження температурних напружень та деформацій балкових конструкцій залізничних мостів від кліматичних впливів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*, 2012. Вип. 46, С. 233–243.
31. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, Київ, 2006. 359 с. (Інформація та документація).
32. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. Мінрегіонбуд України, Київ, 2009. 71 с. (Інформація та документація).
33. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Мінрегіонбуд України, Київ, 2009. 73 с. (Інформація та документація).
34. Zhou G. D., Yi T. H. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. Vol. 9(12), 217983. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/217983>.
35. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2020. 992 p.
36. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 936 p.

37. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Міністерство інфраструктури України, Київ, 2019. 62 с. (Інформація та документація).
38. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні правила. Проектування конструкцій на дії вогню. Мінрегіон України, Київ, 2013. 120 с. (Інформація та документація).
39. Mirzanamadi R., Johansson P., Grammatikos S. A. Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study. *Construction and Building Materials*, 2018. Vol. 158, P. 774–785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068>.
40. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. ДП "УкрНДНЦ", Київ, 2022. 156 с. (Інформація та документація).
41. Lu Y., Li D., Wang K., Jia S. Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges. *Applied sciences*, 2021, Vol.11, 6332. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11146332>.
42. Yang H., Zhao X., Fu L., Ruan X., Li Y., Chen D. Study of Periodical Temperature Change Induced Deformation of an Inclined Steel Arch Bridge Exposed to Actual Environment Based on Synchronous Multi-Member Thermal Simulation. *Sustainability*, 2022. Vol. 14(16), 10042. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610042>.
43. Rapti A. S. Atmospheric transparency, atmospheric turbidity and climatic parameters. *Solar Energy*, 2000. Vol. 69(2), P.99–111. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00053-0).
44. Sayigh, A. A. M. Solar energy engineering. Academic Press, London, 2012. 526 p.

References

1. Leonhardt F., Kolbe G., Peter J. Temperature differences endanger prestressed concrete bridges. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1965. Vol. 7, P. 157–163 [in English].
2. Leonhardt F., Lippoth W. Folgerungen aus Schäden an Spannbetonbrücken. *Beton-und Stahlbetonbau*, Berlin, 1970. Vol. 65(10), P. 231–244 [in English].
3. Zichner T. Thermal Effects on Concrete Bridges. *C. E. B. Enlarged Meeting—Commission 2*, Pavia, 1981. P. 292–313 [in English].
4. Memorandum: In-Depth Inspection of the Creeks and Spalls Developing in the Walls and Bottom Slabs of the F-11-AK, F-11-AL Structures over Miller Creek on I-70. *Colorado Department of Highways*, Denver, 1982 [in English].
5. Larsson O. Climate related thermal actions for reliable design of concrete structures. Doctoral Thesis, Lund, 2012. P. 159 [in English].
6. Luchko J. J., Karkhut I. I., Kravets I. B. Study of the bridges built in Ukraine in 1998 and 2001, that were destroyed by long-term operation and floods. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2021. № 20, P. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2021/245313> [in Ukrainian].
7. Luchko J. Trishchynostiikist betonnykh ta zalizobetonnykh konstruksii z pozytsii mekhaniky ruinuвання (Crack resistance of concrete and reinforced concrete structures from the standpoint of fracture mechanics). *Nauka ta budivnytstvo*, Kyiv, 2024. Vol. 39(1). P. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-7> [in Ukrainian].
8. Salo V., Salo O. To the questionnaire of the operating condition of span constructions of road bridges in western areas of Ukraine. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika». Teoriia i praktyka budivnytstva*, Lviv, 2018. Vol. 888, P. 123–126 [in Ukrainian].
9. Wang Y. G., He X. J., Ouyang F., He J., Wu W. W., Wu C. New method for fine calculation of bridge temperature field based on BIM solar radiation analysis. *Advances in Civil Engineering, Hindawi*. 2023. Vol. 2023(1), 6855116, P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6855116> [in English].
10. Raghav Mahto. Thermal stress analysis in pre-stressed concrete bridges using COMSOL Multiphysics. *International Journal of Surveying and Structural Engineering*. 2025; Vol. 6(1), P. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.22271/2707840X.2025.v6.i1a.36> [in English].

11. Priestley M. Structural Model of a Prestressed Concrete Box Girder Bridge Phase 2: Thermal Loading. Vol 1- Model Description and Temperature Results. *MWD Central Labs*, 1972. Report. No. 440 [in English].
12. Priestley, M. Linear Heat-Flow Analysis of Concrete Bridge Deck. Research Report. Department of Civil Engineering. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1976. 48 p. [in English].
13. NZ Transport Agency. Bridge Manual (3rd edition) (SP/M/022). Wellington, NZ, 2013. 374 p. [in English].
14. Australian Standard AS 5100.2:2017 Bridge design. Part 2: Design loads, Sydney 2017. 137 p. [in English].
15. Imbsen R. A., Vandershaf D. E., Schamber R. A., Nutt R. V. Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures. National Cooperative Highway Research Program Report, 276. Washington, 1985. 99 p. [in English].
16. Potgieter I. C., Gamble W. L. Response of Highway Bridges to Nonlinear Temperature Distributions. Civil Engineering Studies, Structural Research Series N. 505. Illinois, 1983. 320 p. [in English].
17. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 5th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C., 2010. 1822 p. [in English].
18. Emerson M. The Calculation of the Distribution of Temperature in Bridges. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 561. Department of the Environment, Crowthorne, 1973. 33 p. [in English].
19. Emerson M. Temperature differences in bridges: basis of design requirements. Transport and Road Research Laboratory TRRL Report LR 765. Department of the Environment, Crowthorne, 1977. 39 p. [in English].
20. BRITISH STANDARD BS 5400-2:1978. Steel, concrete and composite bridges Part 2: Specification for loads. London 1978. 48 p. [in English].
21. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions – Thermal actions. Brussels, 2003. 49 p. [in English].
22. DSTU-NB EN 1991-1-5:2012. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1-5. Zahalni dii. Teplovi dii (Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-5. General actions. Thermal actions (EN 1991-1-5:2003, IDT). Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. 59 p. [in Ukrainian].
23. Athanasopoulou A., Sousa M.L., Dimova S., Rianna G., Mercogliano P., Villani V., Croce P., Landi F., Formichi P., Markova J. Thermal design of structures and the changing climate, EUR 30302 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020. 70 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.2760/128894> [in English].
24. Milić P., Kušter Marić, M. Climate change effect on durability of bridges and other infrastructure. *Građevinar Časopis Hrvat. Saveza Građevinskih Inženjera*, 2023. Vol. 75, p. 893-906. DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.3756.2023> [in English].
25. Lukin D., Bezbabicheva O., Lukin O. Thermal stress calculation in concrete bridge girders. In *AIP Conference Proceedings*, 2025. Vol. 3428, No. 1, P. 020033. DOI: <https://doi.org/10.1063/12.0038623> [in English].
26. Liu C., DeWolf J. T. Effect of temperature on modal variability for a curved concrete bridge. In *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2006. Vol. 6174, P. 1050-1060. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.655811> [in English].
27. Bian J., Wang Y., Li Y. Application of Thermodynamic Models in Bridge Temperature Field Simulation and Thermal Stress Analysis. *International Journal of Heat & Technology*, 2024. Vol. 42(4), P. 1317–1326. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420422> [in English].
28. Luchko J. J., Kovalchuk V. V. Distribution temperature in reinforced concrete beam bridge structures. *Mosty i toneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 2012. Vol. 3, P. 111-119. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2012/26483> [in English].
29. Bezbabicheva O. I., Rozenfeld M. V., Bilchenko A. V., Lukin O. M., Boichuk I. P. Naukovo-doslidna robota 0207U006841, 0107U004543. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu: rozrobtyty rekomendatsii z rozrakhunku temperaturnykh poliv i napruzhen v mostovykh konstruktsiakh z pokryttiam (Research report:

development of recommendations for temperature field and stress calculation in bridge structures with deck surfacing). Kharkiv, KhNADU, 2007. 139 p. [in Ukrainian]

30. Luchko J. J., Kovalchuk V. V. Alhorytm vyznachennia hranichnykh umov dlia doslidzhennia temperaturnykh napruzhen ta deformatsii balkovykh konstruktsii zaliznychnykh mostiv vid klimatychnykh vplyviv (Algorithm for determining boundary conditions for the study of thermal stresses and deformations in railway girder bridges under climatic effects). *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, 2012. Vol. 46, P. 233–243 [in Ukrainian].

31. DBN V.2.3-14:2006. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravila proektuvannia (Transport structures. Bridges and culverts. Design rules). Kyiv: Ministry of Construction, Architecture and Housing of Ukraine, 2006. 359 p. [in Ukrainian].

32. DBN V.1.2-15:2009. Sporudy transportu. Navantazhennia ta vplyvy. Mosty ta truby (Transport structures. Loads and impacts. Bridges and culverts). Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 2009. 71 p. [in Ukrainian].

33. DBN V.2.3-22:2009. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Osnovni vymohy proektuvannia (Transport structures. Bridges and culverts. Basic design requirements). Kyiv: Minregionbud Ukrainy, 2009. 73 p. [in Ukrainian].

34. Zhou G. D., Yi T. H. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-the-art review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. Vol. 9(12), 217983. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/217983> [in English].

35. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2020. 992 p. [in English].

36. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes – 4th ed. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. 936 p. [in English].

37. HBN V.2.3-37641918-559:2019. Avtomobilni dorohy. Dorozhnii odiah nezhorstkyi. Proektuvannia (Automobile roads. Flexible pavement. Design). Kyiv: Ministry of Infrastructure of Ukraine, 2019. 62 p. [in Ukrainian].

38. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012. Yevrokod 2: Proektuvannia zalizobetonnykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni pravila. Proektuvannia konstruktsii na dii vohniu (Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design). Kyiv: Minregion Ukrainy, 2013. 120 p. [in Ukrainian].

39. Mirzanamadi R., Johansson P., Grammatikos S. A. Thermal properties of asphalt concrete: A numerical and experimental study. *Construction and Building Materials*, 2018. Vol. 158, P. 774–785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.068> [in English].

40. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osviltennia ta hariachoho vodosnabzhennia (Energy performance of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply). Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2022. 156 p. [in Ukrainian].

41. Lu Y., Li D., Wang K., Jia S. Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges. *Applied sciences*, 2021, Vol.11, 6332. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11146332> [in English].

42. Yang H., Zhao X., Fu L., Ruan X., Li Y., Chen D. Study of Periodical Temperature Change Induced Deformation of an Inclined Steel Arch Bridge Exposed to Actual Environment Based on Synchronous Multi-Member Thermal Simulation. *Sustainability*, 2022. Vol. 14(16), 10042. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610042> [in English].

43. Rapti A. S. Atmospheric transparency, atmospheric turbidity and climatic parameters. *Solar Energy*, 2000. Vol. 69(2), P. 99–111. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00053-0) [in English].

44. Sayigh, A. A. M. Solar energy engineering. Academic Press, London, 2012. 526 p. [in English].

Danylo Lukin, <https://orcid.org/0009-0003-9630-1085>

Kharkiv National Automobile and Highway University (KHNADU), Kharkiv, Ukraine

MODELING DAILY TEMPERATURE EFFECTS ON A CONCRETE BRIDGE IN THE UKRAINIAN CLIMATE CONDITIONS

Abstract

Introduction. Temperature effects on bridge superstructure are a constant factor influencing their performance. Due to low thermal conductivity of concrete, temperature gradients develop across cross-section of the structure, causing additional deformations and internal stresses. With global climate change and rising average annual temperatures, this issue has become especially important.

Problem statement. Underestimating temperature effects during bridge design and operation can lead to structural damage, reduced service life, and decreased reliability. Although European and American standards include models for temperature effects, Ukraine lacks comprehensive studies considering local climate conditions. A significant gap exists in experimental data, which complicates adapting or developing accurate design models.

Purpose. The main goal is to develop and validate a mathematical model for temperature distribution in concrete bridge superstructure over a daily cycle, specific to the Ukrainian climate. The model incorporates external climate parameters and material properties. It is validated by field measurements to improve accuracy in estimating temperature-induced stresses and enhancing structural reliability.

Materials and methods. The study analyzes the impact of climatic factors on the temperature of concrete bridge structure under Ukrainian climate conditions. Both analytical and numerical modeling were used. Experimental temperature measurements were taken on the span surface, combined with theoretical temperature modeling over a daily cycle using the finite element method. The stress-strain state of the span elements was also analyzed.

Results. The model, accounting for solar radiation, air temperature, and wind speed, showed good agreement with field data, with errors mostly below 10 %. The maximum temperature difference recorded in May was 14.2 °C, indicating potential increases during summer. Results confirm the importance of considering real temperature fields in the design and condition assessment of bridges in Ukraine.

Conclusions. Temperature effects have a significant impact on the stress-strain state of concrete bridge superstructure, causing notable internal stresses and temperature gradients. The proposed model, which includes solar radiation, air temperature, and wind speed, proved accurate and suitable for predicting temperature distribution. The findings highlight the need to incorporate real climate conditions in bridge design and maintenance to ensure durability and reliability.

Keywords: road, thermal stress, concrete bridge, concrete superstructure, temperature field, temperature gradient, temperature difference, solar radiation, mathematical modeling, finite element method, stress-strain state, climatic conditions.

УДК 625.746.5

Нагребельна Л. П., д-р філос. з транспортних технологій, <https://orcid.org/0000-0002-5615-9075>

Кострульова Т. Є., <https://orcid.org/0000-0002-9554-1285>

Шпінь Д. М., <https://orcid.org/0000-0003-0779-5558>

Корчевська А. А., <https://orcid.org/0000-0001-8245-9891>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

ЗВУЖЕННЯ ШИРИНИ СМУГ РУХУ, ЯК ЗАХІД ЗАСПОКОЄННЯ РУХУ

Анотація

Вступ. У прагненні підвищити безпеку дорожнього руху та покращити якість міського середовища проєктувальники дедалі частіше використовують стратегії так званого «заспокоєння руху». Одним з найпоширеніших прийомів у цьому контексті є звуження ширини смуги руху. Ідея полягає в тому, що вузьчі смуги змушують водіїв інтуїтивно знижувати швидкість, що потенційно зменшує ризик виникнення дорожньо-транспортних пригод.

Згідно з психологією поведінки водіїв, ширина проїзної частини впливає на сприйняття швидкості та відчуття безпеки. Вузьчі смуги руху викликають вищий рівень стресу, що змушує водіїв бути обережнішими, у той же час широкі смуги сприяють вищим швидкостям, навіть у міському середовищі.

Проблематика. Одним із найбюджетніших і найгнучкіших інструментів зниження швидкості руху транспорту є звуження смуги руху. Однак дискусії щодо оптимальної ширини точаться вже багато десятиліть. До 2015 року більшість інженерів та науковців рекомендували смуги шириною від 3,3 м до 3,6 м навіть у містах. Сучасні дослідження пропонують зменшувати ширину смуги руху до (2,7 – 3,0) м, але досі не всі погоджуються, покликаючись на «ризик зіткнень».

Мета. Дослідити вплив ширини смуги руху на безпеку дорожнього руху.

Матеріали та методи: у роботі використовувалися емпіричні та теоретичні методи.

Результати. Було проведено дослідження щодо впливу ширини смуг руху на швидкість транспортного потоку та на виникнення ДТП. Проаналізовано ширину смуг руху на автомобільних дорогах України та інших країн світу. Доведено, що вона є ідентичною у більшості країн Європи, а також в Україні. Значення ширини смуги руху коливається в межах 3,75 – 3,00 м.

Висновки. Встановлено, що, оптимальним варіантом під час вибору ширини смуги руху є смуга шириною 3 м. Саме ця ширина, в даному випадку, забезпечить безпечний рух транспортних засобів. Доведено, що зменшувати ширину смуги руху для того, щоб заставити водія зменшити швидкість є актуальним та дієвим лише у межах міста. На автомобільних дорогах загального користування державного значення, де є постійний рух великовагових транспортних засобів звужувати ширину смуг руху є недоречним.

Ключові слова: аварійність, автомобільна дорога, дорожньо-транспортна пригода, швидкість, ширина смуги руху.

Вступ

Ширина смуги руху є важливим елементом проєктування дорожньої мережі. Занадто вузькі або занадто широкі смуги можуть створювати ризики для водіїв, пішоходів і велосипедистів. Оптимальна ширина смуги забезпечує комфортне керування транспортом засобом, адекватні інтервали між транспортними засобами та сприяє передбачуваній поведінці учасників дорожнього руху.

Зменшення ширини смуги руху (наприклад, з 3,5 м до 3,0 м чи навіть 2,75 м) може мати позитивний вплив на безпеку в умовах міського середовища. Дослідження показують, що вузьчі смуги знижують швидкість руху, а отже — ймовірність виникнення дорожньо-транспортних пригод (далі — ДТП) з тяжкими наслідками. Крім того, звільнений простір можна використати для створення

велосипедних доріжок, пішохідних зон або острівців безпеки. Проте, надмірне зменшення ширини може ускладнити рух великогабаритного транспорту та підвищити ризик бокових зіткнень, особливо на дорогах з інтенсивним рухом.

Збільшення ширини смуги понад 3,5 м, зазвичай, спонукає водіїв до підвищення швидкості, що може призводити до тяжких наслідків у разі виникнення ДТП. Широкі смуги також можуть створювати ілюзію безпечного простору, знижуючи увагу водія. Водночас на автомобільних дорогах за межами міст та на магістральних дорогах і вулицях із високою пропускну здатністю більші смуги можуть бути виправданими, особливо якщо там рухається вантажний транспорт.

Основна частина

Європейська практика показала, що дороги у межах міст з меншою шириною смуг руху (3 м – 3,25 м) підсвідомо спонукають водіїв їхати обережніше та з меншою швидкістю. Тому кількість ДТП на таких дорогах набагато менша. На вивільнених після перепланування площах облаштовують велосипедні доріжки або додаткові смуги, зокрема, для громадського транспорту.

На офіційному сайті Національної поліції України можна побачити найчастіші порушення правил дорожнього руху, які впливають на виникнення ДТП, це — перевищення швидкості. Зменшення ширини смуги руху є засобом, який змушує водія зменшити швидкість. Але такий засіб доцільно впроваджувати у містах. Так, за даними дослідників World Research Institute (WRI Ross Center for Sustainable Cities), найбільш небезпечними є дороги, ширші за 3,6 метра. Такі, приміром, як у Пекіні, Форталезі або Ченнаї, де на 100 тисяч населення в ДТП гине понад 15 людей. Дещо вужчі вулиці Нью-Йорка, Сан-Паулу або Нью-Делі, зазначають експерти, безпечніші — 6 – 12 смертей у ДТП на 100 тисяч населення. Найбезпечнішими ж вважаються ще «стрункіші» дороги Амстердама, Берліна, Парижа, Токію, Торонто або Копенгагена — на них гине не більше 3 людей на 100 тисяч населення [1].

Дослідники WRI Субха Банерджі та Бен Велле пояснюють, що широкі дороги будували для безпеки і зручності автомобілів, думаючи так, що ширші дороги, то вища пропускна здатність. Згодом з'ясувалось, що просторіші смуги генерують більше трафіку з усіма його наслідками. Банерджі та Велле додають, що навіть незначне звуження смуг не надто ускладнює міський рух, тоді як безпековий ефект відчувається добре. Пропускна здатність смуги руху шириною 3 метра становить 93 % від показників смуги у 3,6 метра. А зменшення швидкості лише на 1,6 км на годину на міських вулицях – це «мінус 6 % смертності в ДТП», зазначають дослідники [1].

У Німеччині ширина смуг руху у місті — 2,75 – 3,5 метра. Регламентується не лише типом дороги — магістраль безперервного руху або дорога в житловому кварталі, а й кількістю смуг руху транспортного потоку. Приміром, для односторонніх вулиць із найвужчими смугами — у 2,75 метра — інтенсивність не може перевищувати трьох тисяч автомобілів на день. Коли кількість автомобілів перевищує 20 тисяч автомобілів за добу, а дорога має державне значення, ширина смуги має бути не меншою ніж 3,5 м. Ширші смуги (від 3,25 м) передбачені для вулиць із двостороннім рухом, а 3,75 м. — для найбільш швидкісних ділянок — автобанів. Ці норми діють у Німеччині з 1996 року. Смертність на дорогах Німеччини, як свідчить офіційна статистика, зменшується [1].

У Німецькому клубі автомобілістів (ADAC) зазначають, що дороги навіть із шириною смуг 3,25 – 3,50 метра — завузькі. У клубі пояснюють, що такі ширини смуг малі для безпечного руху автобусів шириною 2,95 м зокрема тоді, коли вони повинні розминутися. Проблеми виникають і у власників приватних автомобілів. За даними того ж клубу німці почали купувати більше великих автомобілів — з 1996 по 2015 рік частка позашляховиків зросла з 2 % до 20 %. Ширшими стали й звичайні легкові автомобілі і стандартні паркомісця шириною 2,3 метра для багатьох «мерседесів» і BMW просто затісні і на найвужчих вулицях міст вони часто залишаються без дзеркал.

Експерти зазначають, що ці проблеми — дрібниці порівняно з вартістю життя, яке втрачається у ДТП, коли водій рухається на великих швидкостях. Вужчі смуги так чи інакше змушують водіїв бути обережнішими. Як пояснює професор Технічного університету Дрездена Тібор Петцольдт (Tibor Petzoldt) коли вулиця настільки широка, що водій ніби почувається в безпеці або не відчуває

великого ризику, то автоматично збільшує швидкість, таким чином наближається до рівня ризику. Він додав, що на поведінку водія впливає те, як він сприймає своє завдання за кермом і він сам обирає швидкість з якою йому їхати, якщо це дозволяє ширина смуг руху. Якщо ж смуги вузькі, то водій змушений їхати з нижчою швидкістю.

На думку Петцольдта, найефективніше з вуличними «гонщиками» боротися — зробивши вулиці менш безпечними, принаймні з точки зору водіїв. Серед таких ознак небезпеки, додає психолог, зелені напрямні островці або звуження смуг, але таке рішення не скрізь можливе.

У Нідерландах задумалися про зниження смертності на дорогах ще у 1990-тих роках. Вони розробили концепцію «Сталої безпеки», яка передбачала системне запобігання виникнення ДТП особливо із загиблими. Як зазначає експертка Інституту з вивчення дорожньої безпеки SWOV Летті Аартс, нідерландські спеціалісти й чиновники вирішили зробити ставку на те, що люди реагують підсвідомо. У 1997 році концепцію запустили в дію, а вже у 2007 в Нідерландах підсумували, що «Стала безпека» допомогла знизити рівень дорожньої смертності на 30 відсотків. Дослідивши поведінку за кермом, фахівці з'ясували, що водії підсвідомо обирають стиль водіння, залежно від типу вулиці. А на вибір швидкості — впливає низка аспектів зокрема наявність над дорогою дерева, наскільки віддалені будівлі, чи є додаткові смуги для громадського транспорту, велосипедні доріжки, чи є розділювальні смуги, огорожі, забезпечена видимість, чи є примикання, наявні перешкоди, дорожні знаки та розмітка.

Фахівці з'ясували, що лише глянувши на дорогу, водії здатні зрозуміти швидкісний режим. Ще одна особливість доріг у Нідерландах — їх оформили таким чином, щоб на максимально довгих відрізках підтримувати рівномірну швидкість, такий підхід також допоміг зменшити кількість смертельних ДТП.

Досить важливим показником є те, що зменшення ширини смуг руху доцільним є лише на дорогах та вулицях у населених пунктах. На автомобільних дорогах загального користування державного значення, які проходять за межами населених пунктів звужувати ширину смуг руху є недоцільним.

Ширина смуги руху є фундаментальним елементом проєктування і має незначні відмінності в специфікаціях по всьому світу, враховуючи поведінку водія, психологічні чинники та положення. Відповідно до вимог Американської асоціації державних дорожніх службовців та транспортних службовців (AASHTO), рекомендована ширина смуги руху для автомагістралей становить 3,66 м, тоді як для доріг нижчого класу рекомендована ширина смуги руху становить 2,74 м [2]. Міністерство транспорту Китаю вимагає, щоб ширина смуги руху на автомагістралях становила 3,75 м. Однак, коли більшість транспортних засобів на дорозі є легковими, ширина смуги руху зменшується до 3,5 м. Німецька асоціація досліджень доріг та транспорту (RTRA) вимагає ширину смуги руху 3,75 м для смуг зі змішаним рухом, тоді як ширина смуги руху 3,5 м використовується для смуг, призначених переважно для руху легкових автомобілів. Велика Британія вимагає, щоб ширина смуги руху на автомагістралях становила 3,65 м або 3,7 м [3]. У випадку Канади рекомендується використовувати ширину смуги руху від 3,5 м до 3,7 м [4]. Вищезазначені правила щодо ширини смуг руху здебільшого сформульовані для традиційного змішаного руху, і досліджень щодо ширини смуг руху для виділених смуг для автомобілів проведено мало. Однак, важливо розуміти характеристики бічних коливань автомобілів, щоб визначити ширину смуги руху для виділених смуг для цих транспортних засобів.

Кілька досліджень, заснованих на симуляторі водіння, досліджували вплив ширини смуги руху на положення транспортного засобу під час утримання смуги руху на дорозі [5]. Результати послідовно вказують на те, що звуження або зменшення смуги руху призводить до концентрації робочих траєкторій транспортного засобу. Положення транспортного засобу має різні характеристики залежно від ширини смуги руху або щільності руху. Дослідження для чотирьох різних смуг шириною (3,00 м, 2,75 м, 2,50 м, та 2,25 м) показало, що збільшення зустрічного руху від низької до високої щільності призвело до бічного зміщення транспортного засобу до правого боку смуги руху. Найбільший вплив дорожніх умов був виявлений на смузі шириною 2,75 м. Звуження смуги руху

вважається потужним способом контролю поведінки водіїв, враховуючи прийнятний рівень, який знижує швидкість руху та зменшує бічні коливання [5].

Дослідження, які було проведено у США показують, що вплив ширини смуги руху на показники безпеки різняться в міському та сільському середовищі. Дослідження в сільських регіонах продемонстрували значну кореляцію між ризиком аварій та особливостями конструкції доріг, включаючи ширину смуг руху, узбіччя та роздільну смугу [6 – 8]. Тим не менш, інші дослідження показують, що ширина смуг руху та узбіччя має незначний вплив на тяжкість наслідків від ДТП, тоді як тип узбіччя відіграє більш важливу роль, зменшуючи кількість аварій на 30 – 70 % [9]. Ці результати суперечать попереднім дослідженням двосмугових сільських доріг, які пов'язували ширші узбіччя з підвищеною тяжкістю наслідків від ДТП [10].

Аналогічно, дослідження, що вивчали кореляцію між шириною смуг руху та безпекою в міських середовищах, дають непереконливі результати. Дослідження, які було проведено на міських дорогах, виявило зв'язок між ширшими смугами руху транспортних засобів, вузькими узбіччями та зниженням кількості ДТП [11]. Також кілька досліджень на міських вулицях показали, що вузьчі смуги руху зменшують кількість виникнення такого виду ДТП як зіткнення [12 – 14].

У більшості країн світу зокрема Європи, ширина смуг руху коливається у межах 3,75 – 3,50 м — для міжнародних та національних доріг, а для доріг місцевого значення та у містах у межах 3,50 – 2,25 (табл. 1).

Таблиця 1

Ширина смуги руху на автомобільних дорогах країн світу [15]

Країна		Ширина смуги руху на автомобільних дорогах, м		
		Автомобільні дороги загального користування державного значення	Магістральні дороги та вулиці	Вулиці та дороги місцевого значення
Європа	Великобританія	3,65	3,65	3,00 – 3,65
	Нідерланди	3,50	2,75 – 3,25	3,10 – 3,25
	Греція	3,50 – 3,75	3,25 – 3,75	3,00 – 3,25
	Данія	3,50	3,00	3,00 – 3,25
	Іспанія	3,50 – 3,75	3,00 – 3,50	3,00 – 3,25
	Німеччина	3,50 – 3,75	3,25 – 3,50	2,75 – 3,25
	Польща	3,50 – 3,75	3,00 – 3,50	2,50 – 3,00
	Португалія	3,75	3,75	3,00
	Угорщина	3,75	3,50	3,00 – 3,50
	Франція	3,50	3,50	3,50
	Чехія	3,50 – 3,75	3,00 – 3,50	3,00
	Швейцарія	3,75 – 4,00	3,45 – 3,75	3,15 – 3,65
Америка	Бразилія	3,75	3,75	3,00
	Канада		3,00 – 3,70	3,00 – 3,30
	США	3,60	3,30 – 3,60	2,70 – 3,60

У більшості країн Європи (і у Польщі в тому числі), де щільність мережі автомобільних доріг у 5 разів більша, ніж в Україні, дороги поділяють за функціональним призначенням і на дорогах де є рух великогабаритних транспортних засобів, **обов'язкова** ширина смуги руху становить 3,75 м [16].

Параметри поперечного профілю автомобільних доріг Німеччини (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри поперечного профілю автомобільних доріг Німеччини

Типовий поперечний профіль	Кількість смуг руху	Ширина, м					
		Проїзна частина	Крайові смуги (узбіччя)	Центральна розділювальна смуга	Зупинкова смуга	Узбіччя	Бокові розділювальні смуги
RQ 35,5	6	3,75 / 3,5	0,75 / 0,50	3,50	2,50	1,5	3,00
RQ 33	6	3,5	0,50	3,00	2,00	1,5	3,00
RQ 29,5	4	3,75	0,75	3,50	2,50	1,5	3,00
RQ 26	4	3,5	0,50	3,00	2,00	1,5	3,00
RQ 20	4	3,5	0,50	2,00	-	1,5	1,75
RQ 15,5	2 + 1	3,75 / 3,25 / 3,50	0,250	-	-	2,50 ² / 1,05	1,75
RQ 10,5	2	3,50	0,25 ³	-	-	1,5	1,75
RQ 9,5	2	3,00	0,25	-	-	1,5	1,75
RQ 7,5	2	2,75	-	-	-	1,0	1,25

1 — розмежування проїзної частини на ділянці: двох смугові з можливістю обгону на них і одно смугові в зустрічному напрямку без обгону в їх межах виконують подвійною лінією розмітки шириною 0,50 м, яка служить для поділу зустрічного руху;

2 — узбіччя поруч з одно смуговими ділянками повинне бути укріплене;

3 — за інтенсивності руху великогабових автомобілів більше 900 авт./добу крайові смуги слід передбачати завширшки 0,5 м.

Параметри поперечного профілю на сільських і міських автомобільних дорогах США наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Параметри поперечного профілю на сільських та міських автомобільних дорогах США [19]

Класифікація (тип) доріг	Сільська а/д		Міська а/д	
	Фути	Метри	Фути	Metric
Автомобільні / магістральні дороги	12	3.6	12	3.6
Під'їзні дороги	12 – 30	3.6 – 9.2	12 – 30	3.6 – 9.2
Регіональні дороги	11 – 12	3.3 – 3.6	10 – 12	3.0 – 3.6
Колекторні дороги	10 – 12	3.0 – 3.6	10 – 12	3.0 – 3.6
Місцеві дороги	9 – 12	2.7 – 3.6	9 – 12	2.7 – 3.6

В Україні параметри поперечного профілю автомобільних доріг потрібно визначати відповідно до ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги [17] (табл. 4).

Таблиця 4

Параметри поперечного профілю автомобільних доріг

Ч.ч.	Показник		Категорії доріг

		Одиниця вимірювання	I-а	I-б	II	III	IV	V
1	Кількість смуг руху	шт.	4; 6; 8	4; 6	2; 3**	2	2	1
2	Ширина смуги руху	м	3,75; 3,5*	3,75; 3,5*	3,75	3,50	3,00	4,50

Кінець таблиці 4

Ч.ч.	Показник	Одиниця вимірювання	Категорії доріг					
			I-а	I-б	II	III	IV	V
3	Ширина узбіччя, у тому числі:	»	3,75	3,75	3,75	2,50	2,00	1,75
	– ширина зупиночної смуги разом з укріпленою смугою;	»	3,00	3,00	3,00			
	– ширина укріпленої смуги.	»	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
4	Ширина розділювальної смуги	»	6,00	3,00				
5	Ширина укріпленої смуги на розділювальній смузі	»	0,75	0,50				
* Ширина смуги руху 3,50 м застосовується для 3-ї і 4-ї смуг руху при новому будівництві. ** Рекомендовано влаштовувати при інтенсивності у транспортних одиницях більше 7000 авт./добу.								

Ширина смуг руху на автомобільних дорогах України відповідає європейським нормам. Оскільки рух великогазового транспорту в основному здійснюється цими дорогами, то ширина смуг руху повинна забезпечувати безпечний їх рух.

Що ж стосується доріг у межах міста, то в Україні параметри основних елементів вулиць визначають відповідно до ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів [18] (табл. 5).

Ширина смуг руху у межах міста в основному становить 3 м, лише на магістральних дорогах ширина смуги становить 3,75 м. Така ширина залежить від розрахункової швидкості руху.

Таблиця 5

Параметри основних елементів вулиць

Категорія вулиць		Розрахункова швидкість руху, км/год	Ширина смуги руху, м	Кількість смуг руху в обох напрямках, шт	Найбільший поздовжній похил, ‰	Мінімальна ширина пішохідної зони тротуару, м
Найкрупніші, крупні міста	Магістральні дороги					
	Безперервного руху	100	3,75	4; 6; 8	40	1,00*
	Регульованого руху	60	3,75	4; 6; 8	60	1,00*
	Магістральні вулиці					
	Загальноміського значення безперервного руху	80	3,75	4; 6; 8	50	3,00
	Загальноміського значення регульованого руху	60	3,00	4; 6; 8	60	3,00
	Районного значення	60	3,00	2; 4; 6	60	2,25
	Загальноміського значення регульованого руху	60	3,00	2; 4; 6	60	3,00

Великі міста	Районного значення	60	3,00	2; 4	60	2,25
Середні та малі міста	Загальноміського значення регульованого руху	60	3,00	2; 4	60	2,25
	Районного значення	60	3,00	2; 4	60	1,50

Кінець таблиці 5

Категорія вулиць		Розрахункова швидкість руху, км/год	Ширина смуги руху, м	Кількість смуг руху в обох напрямках, шт	Найбільший позовжній похил, %	Мінімальна ширина пішохідної зони тротуару, м
Усі групи міських та сільських населення	Вулиці та дороги місцевого значення					
	Житлові вулиці	50	3,00	2; 4	70	1,50
	Дороги в науково-виробничих, промислових і комунально-складських зонах	50	3,00	2	60	1,50
	Проїзди, паркові дороги	30	3,00	2	80	1,50
		30	4,00	1	80	1,50
	Дороги господарського призначення	30	4,50	1	80	—
	Пішохідні доріжки	—	1,80	—	—	—
* Технічний тротуар						
Примітка. В умовах горбистої та гірської місцевості або стислих умовах історичної та / або існуючої						

Проаналізувавши дослідження, які було проведено на дорогах США щодо зменшення ширини смуг руху та зменшення швидкості руху (табл. 6), впливає, що під час здійснення руху смугою шириною 3 м, він зменшує швидкість на 10 км/год.

Таблиця 6

Порівняння ширини смуги руху до зменшення швидкості руху [19]

Ширина смуги, м	Зменшення швидкості вільного потоку, км/год
3,6	0,0
3,5	1,0
3,4	2,1
3,3	3,1
3,2	5,6
3,1	8,1
3,0	10,6

З табл. 6 видно, що ширина смуг руху є дієвим засобом, який впливає на зниження швидкості, що у свою чергу впливає на кількість виникнення ДТП та на тяжкість їх наслідків.

Науковці Норвегії у своєму звіті [20] наводять результати досліджень у яких стверджують, якщо ширину дороги збільшити на 30 см, на двосмугових дорогах у малонаселених районах, аварійність знижується на 2,2 %. Ефект зростає зі збільшенням інтенсивності руху (понад 2 300 авт/добу). З іншого боку, за низьких інтенсивностей руху (менше ніж 1 500 авт/добу) збільшення ширини дороги в середньому призводить до більшої кількості аварій, тоді як інші фактори

залишаються незмінними. Також дослідники радять, що коли необхідно вибирати між ширшими узбіччями або ширшими смугами руху, ширше узбіччя в більшості випадків безпечніше.

Науковці [21] проводили дослідження на вибірці сільських двосмугових доріг у Пенсільванії (США). Згідно з їхніми результатами, ширина смуг руху від 3,0 м до 3,35 м показала найвищий рівень ризику виникнення ДТП, тоді як від 2,75 м до 3,5 м показала найнижчий. Їхні дослідження також включали дослідження впливу ширини узбіччя, за результатами встановлено, що зі збільшенням ширини узбіччя рівень ризику зменшувався.

Використовуючи модель перехресно-регресійного аналізу, дослідники [22] кількісно оцінили вплив горизонтальних кривих на безпеку на сільських двосмугових дорогах у Пенсільванії (США). Було виявлено, що загальна ширина двох смуг руху від 4,9 м до 6,0 м зменшує частоту аварій, тоді як ширина від 6,0 до 7,0 м збільшує її.

У [23] було проаналізовано ділянки дорожнього руху у Флориді (США) та виявлено, що рівень аварійності був найвищим для ширини смуги руху 3,65 м та нижче для ширини менше ніж 3,65 м.

У своєму дослідженні 3 594 двосмугових ділянок доріг в Ізраїлі [24] науковці виявили, що ширші смуги ($> 3,2$ м) пов'язані з вищим ризиком аварій за участю одного транспортного засобу. Щодо ширини узбіччя, дослідження показало, що за початкового розширення узбіччя до 2,2 м спостерігається збільшення ризику та зменшення кількості аварій за подальшого розширення узбіччя понад це значення.

У дослідженні [25] використовували вибірку з 71 999 сегментів дорожнього руху та 1 886 пов'язаних аварій, зареєстрованих поліцією за п'ятирічний період. Результати свідчать про те, що під час вивчення впливу ширини смуги руху та узбіччя на виникнення лобових зіткнень та аварій за участю одного транспортного засобу потрібно окремо розглядати аварії, що сталися у зимовий та незимовий період, а також аварії з тяжкими та легкими наслідками. Після проведених досліджень ширини смуги руху та узбіччя, для всіх пов'язаних аварій, було виявлено, що ширина смуги руху (1,50 – 2,50) м та ширина узбіччя (0,50 – 0,75) м були відносно безпечнішими, ніж інші ширини на двосмугових сільських нерозділених дорогах Норвегії [26].

Проведені дослідження у містах стверджують, що за результатами оцінювання ефекту реконструкції 4-смугової вулиці у 3-смугову — виникнення аварій зменшується на (20 – 40) %, особливо в невеликих містах за швидкості ≤ 45 миль/год.

Для вивчення зв'язку між шириною смуги руху та рівнем аварійності в дослідженні [27] було використано дві існуючі бази даних про аварійні ситуації з Токіо та Торонто. За результатами досліджень для обох міст встановлено, що як і вузькі (менше 2,8 м), так і широкі (понад (3,1 – 3,2) м) смуги руху збільшують ризики виникнення ДТП з однаковою величиною. Переваги для безпеки досягають мінімуму приблизно на 3,1 м (для Токіо) та 3,2 м (для Торонто). Ширші смуги руху (ширше 3,3 м) негативно впливають на загальну кількість бічних зіткнень. Також дослідники дійшли висновку, що пропускна здатність вузьких смуг вища. Не спостерігається різниці в безпеці та вантажопідйомності великих транспортних засобів між вузькими та ширшими смугами. Кількість пішоходів зменшується з розширенням смуг, а перехрестя з вузькими смугами забезпечують найбільшу пропускну здатність для велосипедистів. Нарешті, ширші смуги (понад (3,3 – 3,4) м), що є переважною практикою в регіонах Торонто, пов'язані на 33 % з вищими показниками швидкості зіткнень та вищими показниками аварійності, незважаючи на більшу інтенсивність руху та вдвічі меншу кількість населення, ніж у Токіо. Науковці стверджують, що підхід «ширше — безпечніше», заснований на особистій або інтуїтивній думці, слід раз і назавжди відкинути. Результати дослідження визнають, що на поведінку людини впливає вуличне середовище, а вузькі смуги в міських районах приводять до менш агресивного водіння та більшої можливості уповільнити або зупинити транспортний засіб на короткій відстані, щоб уникнути зіткнення. Проектувальники вулиць можуть використовувати «невикористаний простір» для забезпечення покращеного громадського простору, включаючи велосипедну інфраструктуру та ширші тротуари.

Висновки

Розглянувши та проаналізувавши ширину смуги руху на автомобільних дорогах та вулицях у різних країнах світу, можна стверджувати, що вона як і в Україні коливається у межах 3,75 – 3,00 м. Використання менших ширини смуг руху на вулицях міст (3 м), є засобом заспокоєння руху, оскільки така ширина лише зупиняє водія збільшувати швидкість, він стає більш уважним і їде повільніше. Отже, оптимальним варіантом при виборі ширини смуги руху є смуга шириною 3 м. Саме ця ширина, в даному випадку, забезпечить безпечний рух транспортних засобів.

Доведено, що зменшувати ширину смуги руху для того, щоб заставити водія зменшити швидкість є актуальним та дієвим лише у межах міста. На автомобільних дорогах загального користування державного значення, де є постійний рух великовагових транспортних засобів звужувати ширину смуг руху є недоречним.

Список літератури

1. Звуження доріг: як у світі скорочують смертність DW 20.08.2018ю URL: <https://www.dw.com/uk/%D0%B2%D1%83%D0%B6%D1%87%D1%96-%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D1%94-%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%96%D1%88%D1%96-%D1%8F%D0%BA-%D1%83-%D1%94%D1%81-%D1%96-%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%96-%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%8C-%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C-%D0%BD%D0%B0-%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D1%85/a-45109430> дата зверення: 01.10.2025.
2. URL: <https://www.scribd.com/document/619975894/AASHTO-2018-Greenbook> (дата зверення: 01.10.2025).
3. URL: <https://n-somerset.gov.uk/sites/default/files/2022-02/E12%20-%20highways%20development%20design%20guide.pdf> (дата зверення: 01.10.2025).
4. URL: <https://www.scribd.com/document/723292509/1999-Geometric-Design-Guide-for-Canadian-Roads-various-sections> (дата зверення: 01.10.2025).
5. Sami Mecheri, Florence Rosey, Régis Lobjois, The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. July 2017. *Accident Analysis & Prevention*. 104(6) P. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.04.019>. Електронний ресурс: URL: https://www.researchgate.net/publication/316780904_The_effects_of_lane_width_shoulders_width_and_road_cross-sectional_reallocation_on_drivers'_behavioral_adaptations (дата зверення: 01.10.2025).
6. Ahmed, M.; Huang, H.; Abdel-Aty, M.; Guevara, B. Exploring a Bayesian Hierarchical Approach for Developing Safety Performance Functions for a Mountainous Freeway. *Accident Analysis & Prevention*. 2011, 43, 1581–1589.
7. Pande, A.; Abdel-Aty, M. A Novel Approach for Analyzing Severe Crash Patterns on Multilane Highways. *Accident Analysis & Prevention*. 2009, 41, 985–994.
8. Zhu, H.; Dixon, K.K.; Washington, S.; Jared, D.M. Predicting Single-Vehicle Fatal Crashes for Two-Lane Rural Highways in Southeastern United States. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*. 2010, 2147, 88–96.
9. Nowakowska, M. Logistic Models in Crash Severity Classification Based on Road Characteristics. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*. 2010, 2148, 16–26.
10. Gårder, P. Segment Characteristics and Severity of Head-on Crashes on Two-Lane Rural Highways in Maine. *Accident Analysis & Prevention*. 2006, 38, 652–661.
11. Dumbaugh, E. Design of Safe Urban Roadsides. *Accident Analysis & Prevention. J. Transp. Res. Board*. 2006, 1961, 74–82.
12. Potts, I. B.; Harwood, D. W.; Richard, K. R. Relationship of Lane Width to Safety on Urban and Suburban Arterials. *Transp. Res. Rec.* 2007, 2023, 63–82.
13. Hauer, E.; Council, F. M.; Mohammedshah, Y. Safety Models for Urban Four-Lane Undivided Road Segments. *Transp. Res. Rec.* 2004, 1897, 96–105.

14. Strathman, J. G.; Dueker, K. J.; Zhang, J.; Williams, T. Analysis of Design Attributes and Crashes on the Oregon Highway System; Oregon Department of Transportation: Salem, OR, USA, 2001; Volume 2.
15. URL: <https://life.pravda.com.ua/society/2016/11/12/219942/> (дата зверення: 01.10.2025).
16. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина 1. Бдівництво. Частина 2. Проєктування. Київ, 2025. 53 с. (Інформація та документація).
17. ДБН В.2.3-5:2018 Вулиці та дороги населених пунктів. Вимоги до проєктування. Київ, 2022. 67 с. (Інформація та документація).
18. URL: https://safety.fhwa.dot.gov/geometric/pubs/mitigationstrategies/chapter3/3_lanewidth.cf. (дата зверення: 01.10.2025).
19. URL: https://www.toi.no/getfile.php/1367214-1630046228/Publikasjoner/T%C3%98I%20rapporter/2021/1831-2021/1831-2021_summary.pdf (дата зверення: 01.10.2025).
20. Gross, F., Donnell, E. T., 2011. Case – control and cross-sectional methods for estimating crash modification factors: comparisons from roadway lighting and lane and shoulder width safety effect studies. *J. Safety Res.* 42, 117–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2011.03.003>.
21. Gooch, J. P., Gayah, V. V., Donnell, E. T., 2016. Quantifying the safety effects of horizontal curves on two-way, two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*. 92, 71–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.03.024>.
22. Lee, Ch., Abdel-Aty, M., Park, J., Wang, J.-H., 2015. Development of crash modification factors for changing lane width on roadway segments using generalized nonlinear models. *Accident Analysis & Prevention*. 76, 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.007>.
23. Gitelman, V., Doveh, E., Carmel, R., Hakkert, S., 2019. The influence of shoulder characteristics on the safety level of two-lane roads: a case-study. *Accident Analysis & Prevention*. 122, 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.10.003>.
24. Petr Pokorný, Jan K. Jensen, Frank Gross, Kelly Pitera Safety effects of traff lane and shoulder widths on two-lane undivided rural roads: A matched case-control study from Norway. *Accident Analysis & Prevention*. Volume 144, September 2020, 105614 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457520303006?via%3Dihub>
25. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/10053/10053.pdf> (дата зверення: 01.10.2025).
26. URL: https://www.researchgate.net/publication/277590178_Narrower_Lanes_Safer_Streets (дата зверення: 01.10.2025).

References

1. Zvuzhennia dorih: yak u sviti skorochuiut smertnist (Road narrowing: how the world is reducing mortality) DW 20.08.2018iu URL: <https://www.dw.com/uk/%D0%B2%D1%83%D0%B6% D1%87%D1%96-%D0%BE%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B0%D1%94-%D0%B1%D0% B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%96%D1%88%D1%96-%D1%8F%D0%BA-%D1%83-%D1%94%D1%81-%D1%96-%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%96-%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%8C-%D1%81%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C-%D0%BD%D0%B0-%D0%B4%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D1%85/a-45109430> data zverennia: 01.10.2025) [in Ukrainian].
2. URL: <https://www.scribd.com/document/619975894/AASHTO-2018-Greenbook> (date of application: 01.10.2025) [in English].
3. URL: <https://n-somerset.gov.uk/sites/default/files/2022-02/E12%20-%20highways%20development%20design%20guide.pdf> (date of application) [in English]. (date of application: 01.10.2025) [in English].
4. URL: <https://www.scribd.com/document/723292509/1999-Geometric-Design-Guide-for-Canadian-Roads-various-sections> (date of application: 01.10.2025) [in English].
5. Sami Mecheri, Florence Rosey, Régis Lobjois, The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. July 2017. *Accident Analysis &*

Prevention. 104(6): 65–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.04.019>. Електронний ресурс: URL: https://www.researchgate.net/publication/316780904_The_effects_of_lane_width_shoulders_and_road_cross-sectional_reallocation_on_drivers_behavioral_adaptations (date of application: 01.10.2025) [in English].

6. Ahmed, M.; Huang, H.; Abdel-Aty, M.; Guevara, B. Exploring a Bayesian Hierarchical Approach for Developing Safety Performance Functions for a Mountainous Freeway. *Accident Analysis & Prevention*. 2011, 43, 1581–1589 [in English].

7. Pande, A.; Abdel-Aty, M. A Novel Approach for Analyzing Severe Crash Patterns on Multilane Highways. *Accident Analysis & Prevention*. 2009, 41, 985–994 [in English].

8. Zhu, H.; Dixon, K.K.; Washington, S.; Jared, D.M. Predicting Single-Vehicle Fatal Crashes for Two-Lane Rural Highways in Southeastern United States. *Accident Analysis & Prevention. J. Transp. Res. Board*. 2010, 2147, 88–96 [in English].

9. Nowakowska, M. Logistic Models in Crash Severity Classification Based on Road Characteristics. *Accident Analysis & Prevention. J. Transp. Res. Board*. 2010, 2148, 16–26 [in English].

10. Gårder, P. Segment Characteristics and Severity of Head-on Crashes on Two-Lane Rural Highways in Maine. *Accident Analysis & Prevention*. 2006, 38, 652–661 [in English].

11. Dumbaugh, E. Design of Safe Urban Roadsides. *Accident Analysis & Prevention. J. Transp. Res. Board*. 2006, 1961, 74–82 [in English].

12. Potts, I.B.; Harwood, D.W.; Richard, K.R. Relationship of Lane Width to Safety on Urban and Suburban Arterials. *Transp. Res. Rec.* 2007, 2023, 63–82 [in English].

13. Hauer, E.; Council, F.M.; Mohammedshah, Y. Safety Models for Urban Four-Lane Undivided Road Segments. *Transp. Res. Rec.* 2004, 1897, 96–105 [in English].

14. Strathman, J.G.; Dueker, K.J.; Zhang, J.; Williams, T. Analysis of Design Attributes and Crashes on the Oregon Highway System; Oregon Department of Transportation: Salem, OR, USA, 2001; Volume 2 [in English].

15. URL: <https://life.pravda.com.ua/society/2016/11/12/219942/> (date of application: 01.10.2025) [in English].

16. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna 1. Bdivnystvo. Chastyna 2. Proiektuvannia (DBN V.2.3-4:2015 Motorways. Part 1. Construction. Part 2. Design). Kyiv, 2025. 53 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

17. DBN V.2.3-5:2018 Vulytsi ta dorohy naselenykh punktiv. Vymohy do proiektuvannia (DBN V.2.3-5:2001 Streets and roads in populated areas. Design requirements). Kyiv, 2022. 67 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

18. URL: https://safety.fhwa.dot.gov/geometric/pubs/mitigationstrategies/chapter3/3_lanewidth.cf (date of application: 01.10.2025) [in English].

19. URL: https://www.toi.no/getfile.php/1367214-1630046228/Publikasjoner/T%C3%98I%20rapporter/2021/1831-2021/1831-2021_summary.pdf (date of application: 01.10.2025) [in English].

20. Gross, F., Donnell, E.T., 2011. Case – control and cross-sectional methods for estimating crash modification factors: comparisons from roadway lighting and lane and shoulder width safety effect studies. *J. Safety Res.* 42, 117–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2011.03.003> [in English].

21. Gooch, J. P., Gayah, V. V., Donnell, E.T., 2016. Quantifying the safety effects of horizontal curves on two-way, two-lane rural roads. *Accid. Anal. Prev.* 92, 71–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.03.024> [in English].

22. Lee, Ch., Abdel-Aty, M., Park, J., Wang, J.-H., 2015. Development of crash modification factors for changing lane width on roadway segments using generalized nonlinear models. *Accident Analysis & Prevention*. 76, 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.01.007> [in English].

23. Gitelman, V., Doveh, E., Carmel, R., Hakkert, S., 2019. The influence of shoulder characteristics on the safety level of two-lane roads: a case-study. *Accident Analysis & Prevention*. 122, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.10.003> [in English].

24. Petr Pokorny, Jan K. Jensen, Frank Gross, Kelly Pitera Safety effects of traff lane and shoulder widths on two-lane undivided rural roads: A matched case-control study from Norway. *Accident Analysis & Prevention*. Volume 144, September 2020, 105614 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001457520303006?via%3Dihub> [in English].

25. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/10053/10053.pdf> (date of application: 01.10.2025) [in English].

26. URL: https://www.researchgate.net/publication/277590178_Narrower_Lanes_Safer_Streets (date of application: 01.10.2025) [in English].

Liudmila Nahrebelna, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-5615-9075>

Tetiana Kostrulyova, <https://orcid.org/0000-0002-9554-1285>

Denis Shpin, <https://orcid.org/0000-0003-0779-5558>

Alina Korchevskaya, <https://orcid.org/0000-0001-8245-9891>

State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

LANE NARROWING AS A TRAFFIC CALMING STRATEGY

Abstract

Introduction. In an effort to improve road safety and enhance the quality of the urban environment, designers are increasingly using strategies known as «traffic calming». One of the most common techniques in this context is narrowing the width of traffic lanes. The idea is that narrower lanes force drivers to intuitively slow down, potentially reducing the risk of traffic accidents.

According to the psychology of driver behavior, the width of the roadway affects the perception of speed and the feeling of safety. Narrower lanes cause higher levels of stress, forcing drivers to be more cautious, while wide lanes encourage higher speeds, even in urban environments.

The problem. One of the most cost-effective and flexible tools is lane narrowing. However, discussions about the optimal width have been going on for decades.

Until 2015, most engineers and scientists recommended lanes between 3.3 m and 3.6 m wide, even in cities. Recent studies suggest reducing lane width to (2.7 – 3.0) m, but not everyone agrees, citing the «risk of collisions».

Objective. To investigate the impact of lane width on road safety.

Materials and methods. Empirical and theoretical methods were used in the study.

Results. A study was conducted on the impact of lane width on traffic flow speed and the occurrence of traffic accidents. The width of traffic lanes on motorways in Ukraine and other countries was analyzed. It was proven that it is identical in most European countries, as well as in Ukraine. The width of traffic lanes varies between 3.75 and 3.00 m.

Conclusions. Therefore, the optimal option when choosing the width of a traffic lane is a lane width of 3 m. It is this width, in this case, that will ensure the safe movement of vehicles. It has been proven that reducing the width of a traffic lane in order to force drivers to reduce their speed is relevant and effective only within city limits. On public highways of national importance, where there is constant traffic of heavy vehicles, narrowing the width of traffic lanes is inappropriate.

Keywords: accident rate, highway, road accident, speed, traffic lane width.

УДК 625.7

Попович Н. І., <https://orcid.org/0000-0001-5822-2501>

Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

ШВИДКІСТЬ РУХУ ЯК ФАКТОР БЕЗПЕКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

Анотація

Вступ. Безпека на дорогах справді є однією з найактуальніших проблем у сучасному світі, зокрема й в Україні. Щороку мільйони людей у всьому світі травмуються або втрачають життя внаслідок дорожньо-транспортних пригод (ДТП). Це не лише трагедії для сімей, а й серйозне навантаження на системи охорони здоров'я, економіку та соціальну сферу.

Проблематика. У сучасних умовах розвитку транспортної системи України забезпечення безпеки дорожнього руху набуває особливого значення. Щороку на автомобільних дорогах України відбувається значна кількість дорожньо-транспортних пригод основною причиною яких є перевищення швидкості та неправильний вибір швидкісного режиму у конкретних умовах руху, які визнані основними чинниками, що впливають і на кількість, і на тяжкість ДТП. Надмірна швидкість руху автомобільного транспорту є важливою проблемою дорожнього руху, що спричиняє тяжкі наслідки – людські жертви, травматизм та матеріальні збитки. Зростання рівня автомобілізації, недосконалість інфраструктури та недостатній контроль за дотриманням правил дорожнього руху створюють загрозу для всіх учасників дорожнього руху.

Мета. Підвищення рівня безпеки дорожнього руху на автомобільних дорогах України та зниження аварійності шляхом впровадження комплексу ефективних організаційно-технічних заходів.

Матеріали та методи. У статті було застосовано метод статистичної обробки даних для аналізу аварійності на автомобільних дорогах. Проаналізовано чинні нормативні документи щодо технічних засобів заспокоєння дорожнього руху.

Результат. Проаналізовано вплив швидкості на дорожню безпеку та методи для її зниження, особливо в населених пунктах, де існує більша імовірність наїзду на пішоходів. Завдяки комплексному підходу до вирішення проблем безпеки руху можливо суттєво знизити рівень аварійності, зменшити кількість загиблих і травмованих у ДТП, а також створити комфортні та безпечні умови для всіх учасників дорожнього руху.

Висновки. Причиною смертельних ДТП в Україні найчастіше стає перевищення швидкості. Варто зазначити, що швидкість впливає як на ризик того, що ДТП може статися, так і на серйозність результату аварії. Зв'язок між швидкістю і рівнем пошкоджень є критичним для незахищених учасників дорожнього руху, таких як пішоходи та велосипедисти. Тому необхідно застосовувати засоби заспокоєння дорожнього руху, які призначені для зниження швидкості, підвищення уваги водія, і як результат, зниження імовірності виникнення ДТП.

Ключові слова: автомобільна дорога, безпека дорожнього руху, дорожньо-транспортна пригода, ДТП, засоби заспокоєння руху, швидкість руху.

Вступ

Проблема безпеки дорожнього руху була і залишається однією з найгостріших соціально-економічних проблем в Україні. Щороку на дорогах країни гинуть і травмуються тисячі людей. За даними Національної поліції України лише у 2024 році на автомобільних дорогах загального користування державного значення всього сталося 15 579 дорожньо-транспортних пригод, із загиблими та / або травмованими зареєстровано 4 558 ДТП, в яких 1157 осіб загинуло та 6 679 осіб було травмовано (рис. 1).

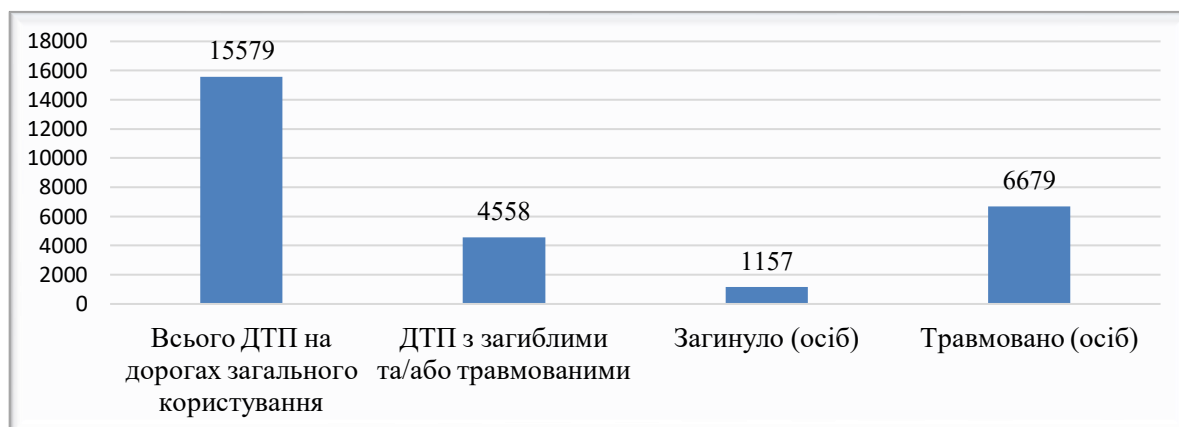


Рисунок 1 — Кількість ДТП на автомобільних дорогах загального користування державного значення України за 2024 рік

Серед найпоширеніших причин порушень правил дорожнього руху (далі — ПДР), зафіксованих під час скоєння ДТП у 2024 році на автомобільних дорогах загального користування державного значення, можна виділити «Перевищення безпечної швидкості» — 39,84 % (рис. 2).

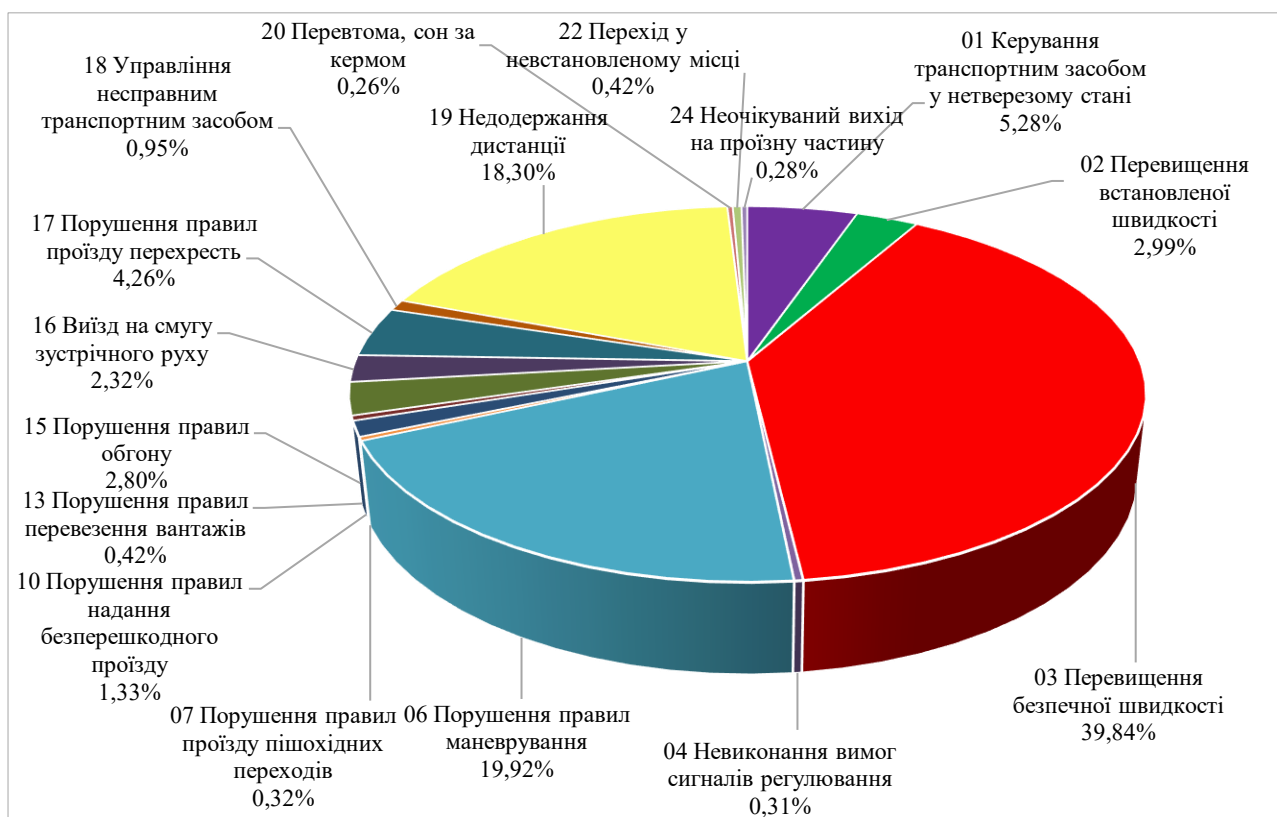


Рисунок 2 — Розподіл ДТП за видами порушень ПДР на автомобільних дорогах загального користування державного значення України за 2024 рік

Однією з ключових причин великої кількості дорожньо-транспортних пригод в Україні є перевищення швидкості. Надмірна швидкість істотно підвищує ризик виникнення ДТП та тяжкість їх наслідків. У зв'язку з цим впровадження ефективних заходів зі зниження швидкісного режиму є пріоритетним напрямком у забезпеченні безпеки дорожнього руху.

Статистика ДТП за останні три календарні роки показує, що нажаль, кількість аварій та осіб, що постраждали чи загинули в ДТП за видом порушень ПДР «Перевищення безпечної швидкості» на автомобільних дорогах загального користування державного значення з кожним роком лише збільшується (рис. 3).

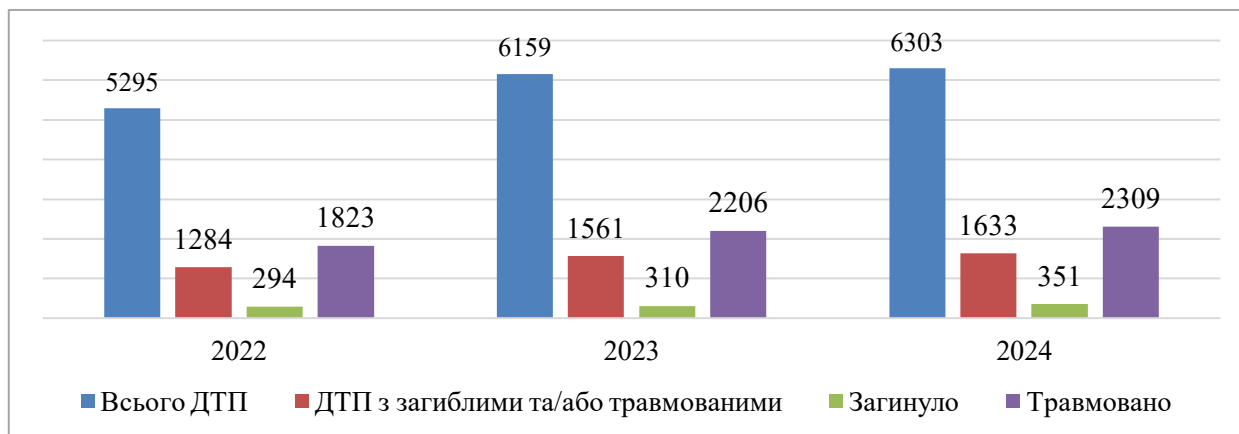


Рисунок 3 — Динаміка кількості ДТП та їх наслідків за 2022-2024 роки на автомобільних дорогах загального користування державного значення України за видом порушень ПДР «Перевищення безпечної швидкості»

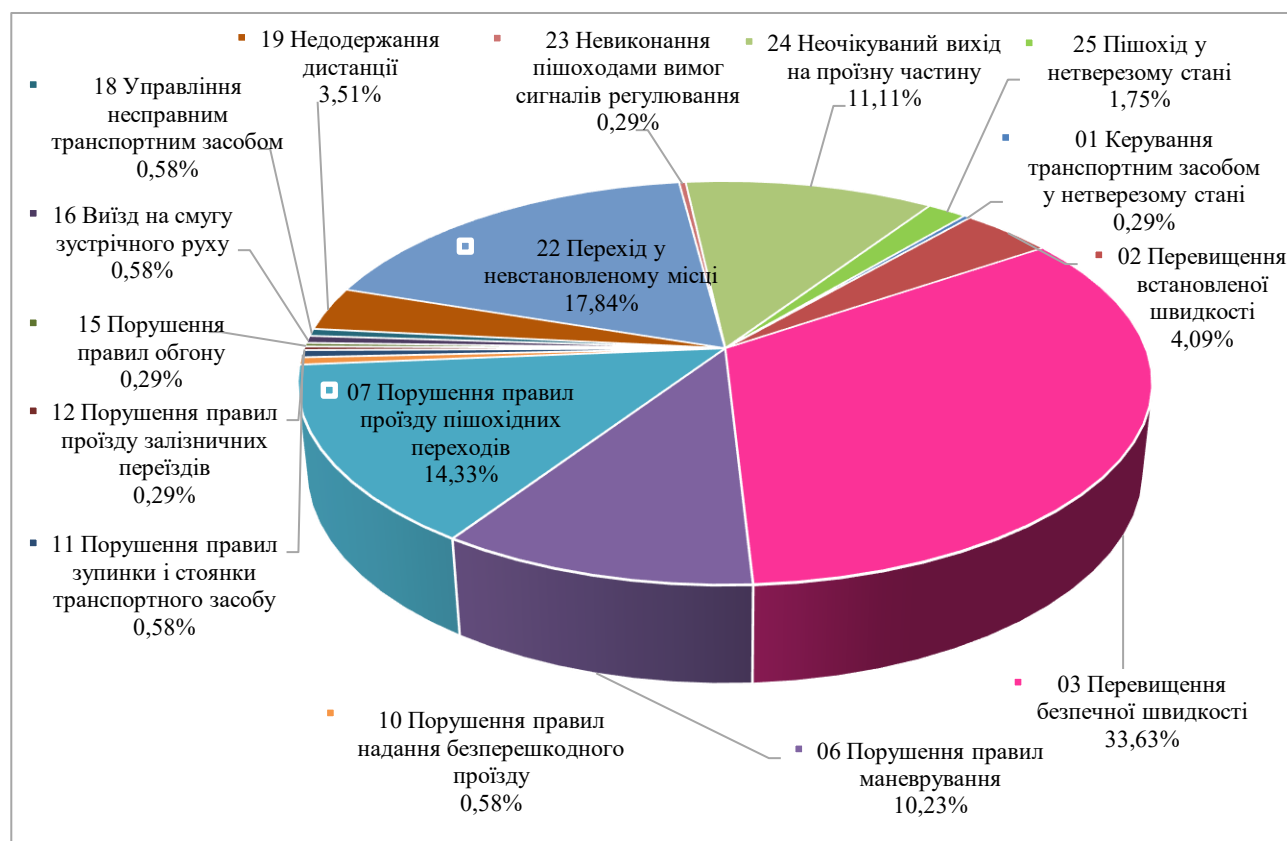


Рисунок 4 — Розподіл ДТП за видами порушень ПДР за видом пригод «наїзд на пішохода» за 2024 рік на автомобільних дорогах загального користування державного значення України

Однак перевищення швидкості є однією з головних причин дорожньо-транспортних пригод не лише на автомобільних дорогах загального користування державного значення, а й загалом в Україні, що підтверджується статистичними даними Національної поліції [1]. Такі ДТП мають особливо тяжкі наслідки, оскільки значно зростає ймовірність летальних випадків і важких травм як серед водіїв, так і серед пасажирів та пішоходів. Ризик аварії обумовлений головним чином наявністю кореляції між швидкістю і довжиною гальмівного шляху. Що вища швидкість, то менше у водія є часу, щоб зупинити авто і попередити виникнення ДТП, в тому числі й наїзд на пішохода. Перевищення швидкості в місцях, де можливий рух пішоходів, це пряма загроза їх життю. Водій, який нехтує обмеженням швидкості, наражає пішоходів на смертельну небезпеку (рис. 4).

Аналізування порушень правил дорожнього руху виявляє основні причини, що призводять до ДТП за участю пішоходів і вказує, що виникнення такого виду ДТП як «наїзд на пішохода», зумовлене насамперед перевищенням безпечної швидкості» — 33,63 % (рис. 4).

Велика частка і жертв в ДТП за видом «наїзд на пішохода». Кількість ДТП із загиблими за цим видом пригод в 2024 році на дорогах загального користування державного значення склала 20,4 % від загальної кількості (рис. 5). В темну пору доби частка ДТП з загиблими та/або травмованими за видом пригод «наїзд на пішохода» та за видом порушень ПДР «перевищення безпечної швидкості» склала 68,7 % (рис. 6).

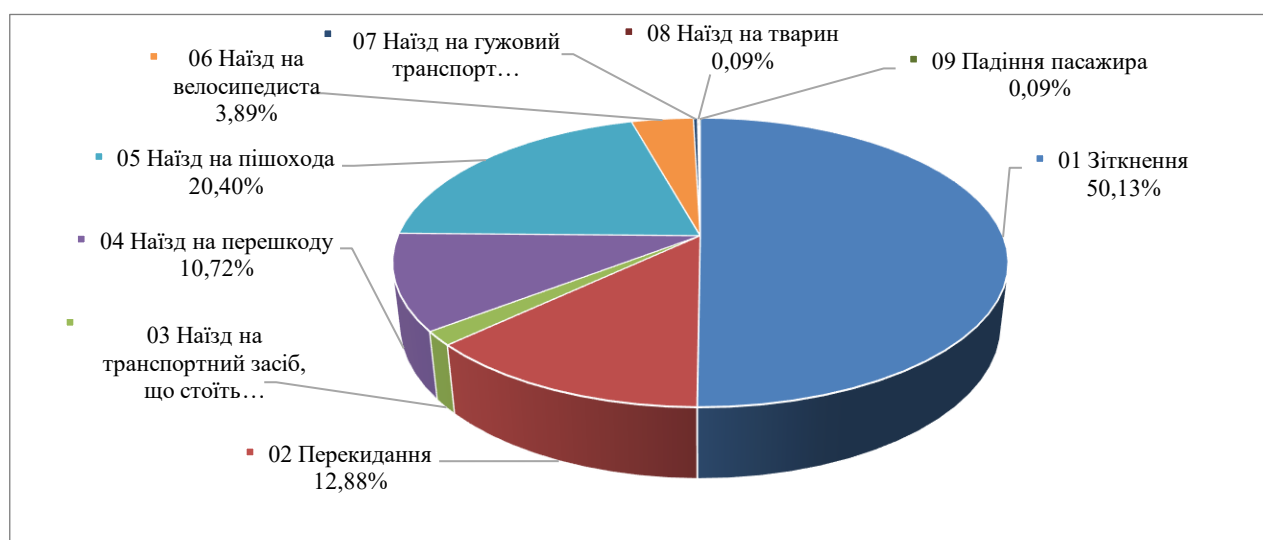


Рисунок 5 — Розподіл ДТП із загиблими за видами пригод за 2024 рік на автомобільних дорогах загального користування державного значення України

Розподіл ДТП із загиблими та/або травмованими за порою доби за видом пригод «наїзд на пішохода» за видом порушень ПДР «перевищення безпечної швидкості» за даними Баз даних ДТП ДП «НІРІ» наведено в табл. 1 та на рис. 6.

Таблиця 1

Розподіл ДТП із загиблими та/або травмованими за порою доби за видом пригод «наїзд на пішохода» та за видом порушень ПДР «перевищення безпечної швидкості»

Пора доби	Всього ДТП	ДТП з загиблими та/або травмованими	Загинуло	Травмовано
Сутінки ранкові	1	1	0	1
День	34	31	7	36
Сутінки вечірні	1	1	0	1
Ніч	79	72	41	39
Всього	115	105	48	77

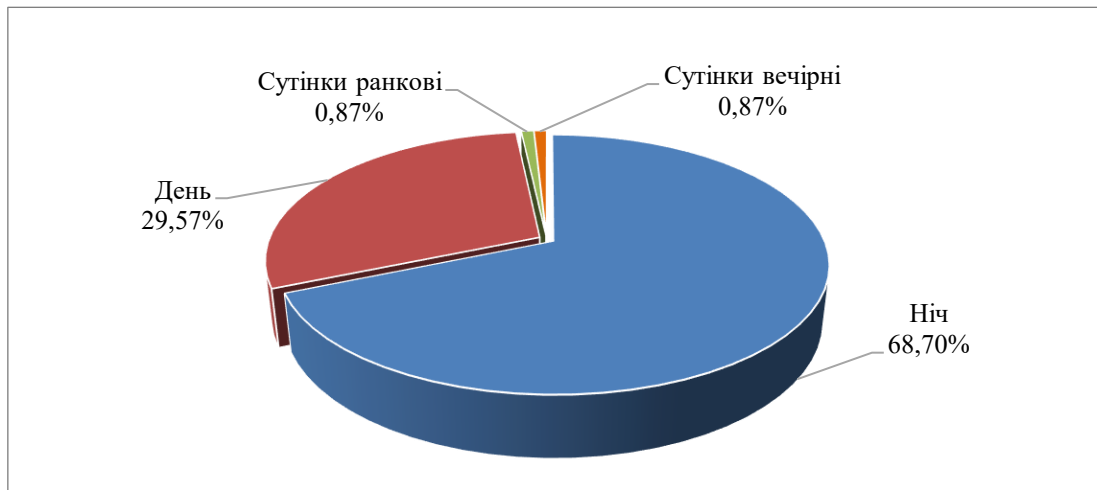


Рисунок 6 — Розподіл ДТП за видом пригод «наїзд на пішохода» та видом порушень ПДР «Перевищення безпечної швидкості» на автомобільних дорогах загального користування державного значення України за 2024 рік

За результатами аналізування аварійності можна зробити висновок, що перевищення швидкості є основною причиною наїздів на пішохода. Отже, для покращення безпеки пішоходів, насамперед, потрібно приділити увагу сучасним засобам заспокоєння руху.

Заспокоєння руху (traffic calming) — це один із найефективніших способів запобігання ДТП, особливо в місцях скупчення пішоходів, шкіл, лікарень та житлових зонах. Ці заходи змушують водія уповільнити рух. Їх використання показало ефективність у багатьох європейських країнах і цей досвід варто активно впроваджувати в Україні.

Основна частина

Надмірна швидкість істотно підвищує ризик виникнення ДТП та тяжкість їх наслідків. Керування швидкісними режимами є дуже важливим інструментом забезпечення безпеки дорожнього руху. На превеликий жаль, багато водіїв свідомо ігнорують можливі ризики і часто вважають, що задоволення від пересування на високій швидкості переважає ті негативні наслідки, до яких воно може призвести. Неправильний вибір швидкості руху або перевищення встановлених обмежень є найвагомішим чинником, який призводить до зростання травматизму на дорогах. Чим вища швидкість, тим більшим є гальмівний шлях, а, отже, і більшим є ризик виникнення ДТП. У зв'язку з цим впровадження ефективних заходів зі зниження швидкісного режиму є пріоритетним напрямком у забезпеченні безпеки дорожнього руху. Ось кілька причин, чому це так.

1. Зменшення часу на реакцію: чим вища швидкість, тим менше часу у водія залишається на те, щоб зреагувати на небезпеку або перешкоду на дорозі.
2. Збільшення гальмівного шляху: за високої швидкості автомобіль потребує значно довшої дистанції для повної зупинки.
3. Більша сила удару: у разі зіткнення енергія удару зростає пропорційно квадрату швидкості, що значно підвищує ризик тяжких травм або загибелі.
4. Втрати контролю: на високих швидкостях легше втратити контроль над автомобілем, особливо на поворотах, слизьких дорогах або під час раптових маневрів.
5. Наслідки для інших учасників руху: пішоходи, велосипедисти та інші водії стають більш уразливими, коли хтось їде з перевищенням швидкості.

Із цієї причини багато країн активно впроваджують обмеження швидкості. Одним із найефективніших способів зниження швидкості транспортних засобів є використання інженерних засобів заспокоєння руху, які фізично змушують водія зменшити швидкість. Такі заходи активно застосовуються у більшості країн ЄС. В Україні наразі чинний стандарт ДСТУ 4123:2020 «Безпека дорожнього руху. Засоби заспокоєння руху. Загальні технічні вимоги» [2], який регламентує використання на автомобільних дорогах загального користування та на вулицях і дорогах населених

пунктів засобів заспокоєння руху. До них відносяться дорожні пагорби, підвищені пішохідні переходи, підвищені перехрестя, шикани, міні-кільця, острівці безпеки, чокери, вставки по осі дороги, але даний перелік не є вичерпним.

Цей стандарт спрямований на застосування засобів для зниження швидкості руху як в населених пунктах, так і на автомобільних дорогах загального користування. За основу цього стандарту взято концепцію «Vision Zero» або «Нуль ДТП». Її мета — зменшення смертності на автомобільних дорогах до нуля завдяки продуманим заходам безпеки, таким як зменшення ширини смуг руху, чокерам (антикишенням), кільцевим транспортним розв'язкам тощо. Особлива увага приділяється ділянкам, де автомобільні потоки конфліктують з пішохідними і велосипедними.

Для зменшення аварійності, а особливо кількості загиблих осіб потрібно звертати увагу на безпечну швидкість, адже це швидкість, за якої водій має змогу безпечно керувати транспортним засобом та контролювати його рух у конкретних дорожніх умовах, і саме в ДСТУ 4123:2020 [2] запропоновано заходи, спрямовані на зниження швидкості та зменшення кількості ДТП та постраждалих в них (табл. 2).

Таблиця 2

Класифікація засобів заспокоєння дорожнього руху відповідно до ДСТУ 4123:2020 [2]

Група, відповідно до застосованого заходу заспокоєння дорожнього руху	Назва засобу
Улаштування 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

• Шикани

Це засіб заспокоєння дорожнього руху, який є бічним горизонтальним розширенням тротуару, що призводить до звуження ширини проїзної частини з одного чи двох боків дороги [3].

Шикани влаштовують для примусового уповільнення руху транспортних засобів в населених пунктах перед наземними пішохідними переходами чи перехрещенням вулиць (рис. 7).



Рисунок 7 — Приклад влаштування шикан

- **Дорожні пагорби**

У населених пунктах дорожні пагорби можна застосовувати в районі розташування дитячих та навчальних закладів, зон масового відпочинку, перед нерегульованими пішохідними переходами, розташованими поза межами перехресть.

Дорожні пагорби потрібно влаштовувати за відстані від 5 м до 6 м від місця, на якому необхідно обмежити швидкість руху (**рис. 8**).



Рисунок 8 — Дорожній пагорб

Стандартна мінімальна поперечна ширина дорожнього пагорбу становить 1,8 метра, як зазначено в документації для гумових пагорбів моделі ДП06 («берлінські подушки»), а довжина за напрямком руху може варіюватись залежно від умов застосування [4]. Хоча в ДСТУ 4123:2020 [2] не визначено вимог до поперечної ширини в числових значеннях, однак зазначено, що загальна довжина за напрямком руху повинна становити не менше ніж 1,85 м і не більше ніж 15 м. Однак можуть виникати обставини, коли забезпечити вимоги щодо мінімальної довжини за напрямком руху неможливо, тому під час перегляду цього нормативного документа варто розглянути питання зміни вимог до мінімальної довжини за напрямком руху цих ЗЗР та можливості застосування коротких дорожніх пагорбів (**рис. 9**). За умови застосування вузьких дорожніх пагорбів, для ступінчастого зниження швидкості руху дозволено послідовно встановлювати два чи три дорожні пагорби за напрямком руху на відстані від 10 м до 30 м один від одного.



Рисунок 9 — Короткий дорожній пагорб

«Берлінська подушка» — це засіб заспокоєння руху, який встановлюють перед нерегульованими пішохідними переходами або іншими ділянками, на яких потрібно обмежити швидкість руху. Принцип застосування цих конструкцій є таким, що легкові автомобілі змушені пригальмовувати й виїжджати на підвищення однією стороною. Однак спецтехніка й автобуси, що мають ширшу колісну базу, просто пропускають цю нерівність між колесами. Це не впливає на їхній рух. Такі штучні нерівності без зупинки також можуть об'їжджати люди на велосипедах, електросамокатах або моноколесах (рис. 10, 11).



Рисунок 10 — Приклад застосування «берлінської подушки» [5]



Рисунок 11 — Приклад застосування «берлінської подушки» [6]

• Підвищені пішохідні переходи та перехрестя

Підвищені пішохідні переходи — це пішохідні переходи, які підняті на рівень тротуару або вище рівня проїзної частини. Їх головна мета — примусове зниження швидкості транспортних засобів, що наближаються до переходу. Аналогічно до пішохідних переходів, підвищені перехрестя створюють підйом всієї площі перетину доріг.

Улаштування таких переходів змушує водіїв транспортних засобів знижувати швидкість перед ними по аналогії з пристроями примусового зниження швидкості, що значно зменшує вірогідність наїзду на пішоходів (**рис. 12**).



Рисунок 12 — Пішохідний перехід, підвищений над проїзною частиною

Підвищені пішохідні переходи та перехрестя застосовують на ділянках доріг у межах населених пунктів та вулицях:

- поблизу дитячих дошкільних навчальних закладів та шкіл;
- поблизу місць або зон масового відпочинку;
- у житлових зонах.

Підвищені наземні пішохідні переходи слід влаштовувати в населених пунктах на пішохідних переходах, що розташовані поблизу дошкільних та навчальних закладів, ринків тощо, де спостерігається висока інтенсивність руху пішоходів.

- **Чокери (звуження проїзної частини)**

Це засіб заспокоєння дорожнього руху, який є бічним горизонтальним розширенням тротуару, бордюру чи острівця безпеки на проїзну частину, що призводить до звуження ширини проїзної частини. Їх часто використовують на пішохідних переходах (так звані антикишені). В поєднанні із острівцями безпеки ми отримуємо звуження проїжджої частини, що призводить до зменшення часу, який потрібен для перетину проїзної частини, а також покращується оглядовість водіїв, адже пішоходів не затуюють припарковані автомобілі (**рис. 13**).



Рисунок 13 — Приклад улаштування чокера [7]

Чокери влаштовують:

- на дорогах та вулицях з двома смугами руху, якщо середньорічна добова інтенсивність руху не перевищує 5000 авто/добу, а обмеження швидкості руху становить не більше 50 км/год;
- на дорогах та вулицях з двома смугами руху, що мають ширину смуги руху понад 4,5 м.

• **Кільцеві розв'язки**

Для зменшення кількості ДТП та тяжкості їх наслідків на транспортних розв'язках в одному рівні необхідно застосовувати засоби заспокоєння руху на підходах до них з метою зниження швидкості руху транспортних засобів. Однак можна розглядати можливість застосування кільцевих транспортних розв'язок з малим діаметром центрального острівця як засобів заспокоєння руху (рис. 14).



Рисунок 14 — Приклад міні-кільцевої транспортної розв'язки

Кільцеві розв'язки мають менше конфліктних точок порівняно з нерегульованими перехрестями і тому зменшують ризики виникнення ДТП на перехресті (рис. 15).

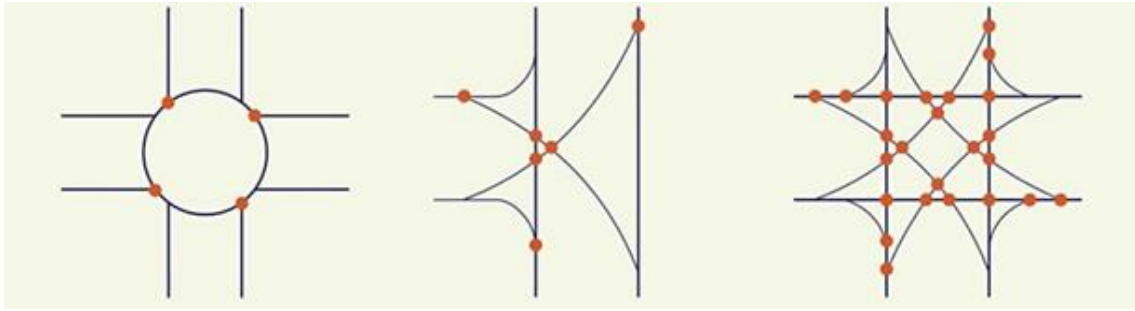


Рисунок 15 — Порівняння кількості конфліктних точок на кільцевих і лінійних транспортних розв'язках в одному рівні [8]

Кільцеві транспортні розв'язки малого радіуса — одні з найбільш ефективних засобів заспокоєння руху. Вони змушують водіїв знижувати швидкість на під'їздах до перехресть, завдяки чому значно знижується аварійність і наслідки ДТП на таких ділянках. Міні-кільцеві розв'язки не мають світлофорного регулювання і тому не потребують витрат на їх встановлення та обслуговування. Їх рекомендується влаштовувати на перехрещеннях з невисокою інтенсивністю руху, а також в міських, приміських умовах і сільській місцевості, де проєктні рішення залежать від наявної площі та обумовлені необхідністю зменшити швидкість руху.

Ураховуючи світовий досвід можна рекомендувати влаштування в Україні малих і міні-кільцевих транспортних розв'язок, які спонукають до уповільнення руху, що сприятиме підвищенню безпеки руху на наших автомобільних дорогах, оскільки ДТП, якщо і виникають на розв'язці кільцевого типу з малим діаметром центрального острівця, не приводять до серйозних наслідків (тяжких поранень та загибелі людей), оскільки швидкість на кільці незначна.

- **Каналізування руху**

Каналізування руху транспортних потоків — це організування руху транспортних засобів у межах проїзної частини окремими смугами руху за допомогою технічних засобів організування дорожнього руху та елементів вулично-дорожньої мережі. Це засоби, які унеможливають зміну траєкторії руху і подальшого перелаштування у сусідню смугу через розділення смуг руху розміткою, напрямним острівцем малої ширини, бордюрами або делініаторами. Основною метою каналізування руху є забезпечення безпечного та впорядкованого руху транспортних засобів і пішоходів шляхом спрямування транспортних потоків у чітко визначені траєкторії за допомогою технічних засобів організування дорожнього руху. Це дозволяє мінімізувати конфліктні ситуації, знизити аварійність, покращити перепускальну здатність транспортної мережі та підвищити комфорт усіх учасників дорожнього руху (рис. 16).



Рисунок 16 — Приклад каналізування руху

• **Вставки по осі дороги (напрямні острівці та острівці безпеки)**

Вставки по осі дороги, що звужують проїзну частину – це спеціальні ділянки дороги, де ширина проїзної частини зменшується за рахунок вставок (перехідних елементів або острівців), щоб організувати рух, сповільнити транспорт, або створити безпечні умови для маневрів (рис. 17).



Рисунок 17 — Приклад вставок по осі дороги

Під час проектування центрального напрямного острівця, що звужує проїзну частину, згідно з ДСТУ 4123:2020, потрібно враховувати такі особливості:

- центральний напрямний острівець повинен мати ширину 1,8 м та довжину 6 м;
- підхід до острівця має бути зміщено ліворуч;
- центральна вісь острівця має створювати конус відгону, щоб відокремити рух праворуч;
- мінімальна звужена ширина проїзної частини має становити 2,75 м.

Основними функціями вставок по осі дороги є:

- розділення зустрічних потоків руху — зменшення ризику зіткнень;
- звуження проїзної частини, що призводить до примусового зниження швидкості транспортних засобів;
- покращення безпеки пішоходів — створення центральних острівців безпеки для зручного переходу проїзної частини пішоходами.

Якщо центральні напрямні острівці є водночас острівцями безпеки та розташовані в зоні пішохідних переходів, вони мають відрізнятися за типом покриття, структурою чи кольором, бути піднятими над проїзною частиною з можливістю безперешкодного руху пішоходів та пристосовані для проходження маломобільних груп населення. Влаштування острівців безпеки на пішохідному переході підвищує безпеку пішоходів, зокрема, скорочує зону конфлікту пішоходів і автомобілів, є прихистком для пішоходів і змушує водіїв бути обачнішим та знизити швидкість руху [9] (рис. 18).



Рисунок 18 — Приклад улаштування острівця безпеки на пішохідному переході

Висновки

Для зниження швидкості руху транспортних засобів, зменшення кількості ДТП та тяжкості їх наслідків рекомендовано застосовувати засоби заспокоєння дорожнього руху, такі як чокери, шикани, підвищені пішохідні переходи, кільцеві транспортні розв'язки з малим діаметром центрального острівця.

Засоби заспокоєння дорожнього руху рекомендовано застосовувати:

- у місцях з інтенсивним рухом транспортних засобів у житлових зонах та прилеглих до дороги територіях;
- на ділянках доріг і вулиць поблизу місць масового скупчення людей, наприклад, навчальних закладів, торгівельних центрів, торгових площ, розважальних закладів (стадіони, кінотеатри, театри тощо), місць масового відпочинку (парки, дитячі майданчики, зони відпочинку тощо), лікувальних закладів, оздоровчих закладів і великих підприємств;
- на ділянках доріг і вулиць з рухом пішоходів інтенсивністю не менше ніж 150 осіб за годину в одному напрямку згідно з 7.10 ДСТУ 4092;
- на ділянках доріг і вулиць з особливими умовами землекористування (історичні, туристичні, торгівельні, громадські, адміністративні тощо);
- на ділянках доріг на підходах до населених пунктів;
- на дорогах і вулицях, де автомобільні потоки конфліктують з пішохідними та велосипедними.

Впровадження запропонованих засобів дасть змогу зменшити кількість ДТП з тяжкими наслідками, кількість загиблих і травмованих внаслідок ДТП.

Досвід європейських країн свідчить, що завдяки комплексним і цілеспрямованим підходам можна досягнути суттєвого зниження рівня аварійності та загибелі і травмування пішоходів, зменшити тяжкість травм, які отримують найбільш уразливі користувачі доріг.

Список літератури

1. Статистичні дані про аварійність за 2024 рік. Сайт Департаменту патрульної поліції Національної поліції України. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (дата звернення 03.09.2025)
2. ДСТУ 4123:2020 «Безпека дорожнього руху. Засоби заспокоєння руху. Загальні технічні вимоги».
3. Для чого потрібні засоби заспокоєння дорожнього руху. Оксана Дудар, Дивись Інфо, 13.05.2021 URL: <https://dyvys.info/2021/05/13/dlya-chogo-potribni-zasoby-zaspokoyennya-dorozhnogo-ruhu/> (дата звернення 03.09.2025).

4. Каталог товарів. URL: <https://zustrich.com.ua/doroga-i-trotuari/sredstva-uspokoenija-dvizhenija/> (дата звернення 03.09.2025).
5. У Києві встановили першу «берлінську подушку» для сповільнення автівок. Вероніка Масенко, 23.11.2023 URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/345427-u-kievi-vstanovili-pershu-berlinsku-podushku-dlya-zaspokoennya-ruhu-avtivok> (дата звернення 03.09.2025).
6. «Берлінські подушки» проти «лежачих поліцейських»: навіщо Україні нові обмежувачі швидкості. Ярослав Куліш. 10.09.2023. URL: <https://kp.ua/ua/life/a675976-berlinski-podushki-proti-lezhachikh-politsejskikh-navishcho-ukrajini-novi-obmezhuвачi-shvidkosti> (дата звернення 03.09.2025).
7. На дорогах України почнуть встановлювати нові засоби розподілу — острівці безпеки, розширення та чокери. Станіслав Троянов. 06.10.2020. URL: <https://nachasi.com/city/2020/10/06/road-area/> (дата звернення 03.09.2025).
8. Беленчук О. В., Попович Н. І., Теплюк Є. Ф. Підвищення безпеки руху на транспортних розв'язках в одному рівні. *Дороги і мости*. Київ, 2023. Вип. 28. С. 234–241 DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.234>.
9. Вирожемський В. К., Беленчук О. В., Безпека пішоходів на дорогах. *Дороги і мости*. Київ, 2015. Вип. 15. С. 110–114.

References

1. Statystychni dani pro avariinist za 2024 rik [Statistical data on accidents in 2024]. Website of the Patrol Police Department of the National Police of Ukraine. URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (Last accessed: 03.09.2025) [in Ukrainian].
2. DSTU 4123:2020. Bezpeka dorozhnoho rukhu. Zasoby zaspokoiennia rukhu. Zahalni tekhnichni vymohy [Road safety. Traffic calming measures. General technical requirements] Kyiv. 2020. Informatsiia ta dokumentatsiia [in Ukrainian].
3. Dudar O. Dlia choho potribni zasoby zaspokoiennia dorozhnoho rukhu [Why traffic calming measures are needed]. Dyvys Info, 13.05.2021. URL: <https://dyvys.info/2021/05/13/dlya-chogo-potribni-zasoby-zaspokoyennya-dorozhnoho-ruhu/> (Last accessed: 03.09.2025) [in Ukrainian].
4. Katalog tovariv [Product catalog]. URL: <https://zustrich.com.ua/doroga-i-trotuari/sredstva-uspokoenija-dvizhenija/> (Last accessed: 03.09.2025) [in Ukrainian].
5. Masenko V. U Kyievi vstanovyly pershu «berlinsku podushku» dlia spovilnennia avtivok [The first «Berlin cushion» to slow down cars was installed in Kyiv]. The Village Ukraine, 23.11.2023. URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/345427-u-kievi-vstanovili-pershu-berlinsku-podushku-dlya-zaspokoennya-ruhu-avtivok> (Last accessed: 03.09.2025) [in Ukrainian].
6. Kulish Ya. «Berlinski podushky» proty «lezhachykh politseiskykh»: navishcho Ukraini novi obmezhuвачi shvydkosti [«Berlin cushions» vs. «speed bumps»: why Ukraine needs new speed limiters]. KP.ua, 10.09.2023. URL: <https://kp.ua/ua/life/a675976-berlinski-podushki-proti-lezhachikh-politsejskikh-navishcho-ukrajini-novi-obmezhuвачi-shvidkosti> (Last accessed: 03.09.2025) [in Ukrainian].
7. Troianov S. Na dorohakh Ukrainy pochnut vstanovliuvaty novi zasoby rozpodilu — ostrivtsi bezpeky, rozshyrennia ta chokery [New traffic calming measures to be installed on Ukrainian roads — safety islands, curb extensions and chokers]. Nachasi, 06.10.2020. URL: <https://nachasi.com/city/2020/10/06/road-area/> (Last accessed: 03.09.2025) [in Ukrainian].
8. Olha Belenchuk, Natalia Popovych, Yevhen Tepluk. Improving traffic safety at intersections. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2023. Issue 28. P. 234–241. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.234> [in Ukrainian].
9. Valerii Vyrozhemskiyi, Olga Belenchuk Pedestrian safety on the roads. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2015. Issue 15. P. 110–114 [in Ukrainian].

Nataliya Popovych, <https://orcid.org/0000-0001-5822-2501>

State enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

VEHICLE SPEED AS A FACTOR OF ROAD
TRAFFIC SAFETY

Abstract

Introduction. Road safety is one of the most pressing global challenges, particularly in Ukraine. Every year, millions of people worldwide are injured or lose their lives as a result of road traffic accidents (RTAs). These are not only personal tragedies for families but also a serious burden on healthcare systems, the economy, and the social sphere.

Problem statement. In the current conditions of Ukraine's transport system development, ensuring road traffic safety is of particular importance. Each year, a significant number of RTAs occur on Ukrainian roads, the main causes of which are speeding and inappropriate choice of speed under specific traffic conditions. These factors are recognized as the primary contributors to both the frequency and severity of accidents. Excessive vehicle speed poses a critical problem, leading to fatalities, injuries, and material losses. The growing level of motorization, inadequate infrastructure, and insufficient enforcement of traffic regulations further exacerbate risks for all road users.

Purpose. To improve road traffic safety on Ukrainian roads and reduce accident rates by implementing a set of effective organizational and technical measures.

Materials and methods. The study applies statistical data processing to analyze accident rates on public roads. Current regulatory documents on traffic calming measures were also examined.

Results. The article analyzes the impact of speed on road safety and methods to reduce it, particularly in urban areas where the likelihood of pedestrian collisions is higher. A comprehensive approach to addressing road safety issues can significantly reduce accident rates, lower the number of fatalities and injuries, and create safer and more comfortable conditions for all road users.

Conclusions. Speeding is the most common cause of fatal RTAs in Ukraine. Speed not only affects the likelihood of an accident occurring but also the severity of its consequences. The relationship between speed and injury severity is especially critical for vulnerable road users such as pedestrians and cyclists. Therefore, it is necessary to apply traffic calming measures aimed at reducing speed, increasing driver attention, and ultimately lowering the probability of accidents.

Keywords: road, road safety, road traffic accident, RTA, traffic calming measures, vehicle speed.

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ДОРОЖНЬОГО РУХУ

Анотація

Вступ. Технічні засоби організації дорожнього руху (ТЗОДР) — насамперед дорожні знаки та розмітка — визначають зрозумілість дорожньої обстановки і рівень безпеки руху. Традиційні інспекції залишаються «золотим стандартом», однак вони трудомісткі, витратні та нерегулярні, що призводить до збільшених часових інтервалів між погіршенням стану знаків і їхнім відновленням. Останні здобутки комп'ютерного зору та глибинного навчання дають змогу автоматизувати виявлення, класифікацію та оцінювання стану знаків на основі відео та фото даних, доповнених вимірюванням коефіцієнту світлоповернення [1 – 6].

Проблематика. Нині детектори на основі глибоких нейромереж демонструють високу точність на стандартних наборах даних, проте їхня робота у складних умовах (вицвітання, забруднення, вандалізм, сніг, туман, косі кути огляду) деградує; крім того, оцінювання стану потребує не лише класифікації «норма / пошкоджено», а кількісної оцінки (зміна кольоропередачі, контрасту, світлоповернення).

Мета. Систематизувати підходи до автоматизованої інспекції ТЗОДР, узагальнити їхні переваги й обмеження, порівняти ефективність типових конвеєрів та запропонувати гібридну архітектуру «edge-cloud» для реального впровадження з мінімізацією людських витрат.

Матеріали й методи. Розглянуто лінійку методів — від правил за кольором / формою та класичних ознак (HOG-SVM, SIFT-SVM) до одноетапних моделей виявлення об'єктів (YOLOv8, SSD), двоетапних моделей (Faster R-CNN, Mask-RCNN), багатозадачних та мультимодальних підходів із залученням глибинних карт (LiDAR/стерео). Для кількісної оцінки стану описано перехід до кольорового простору CIE LAB після сіро-світлового або Shades-of-Grey балансування, використання фізично обґрунтованих мереж для оцінювання світлоповернення та порівняльні метрики (mAP для розпізнавання, RMSE для регресії стану, FPS на Jetson-NX) [7 – 9].

Результати. За узагальненими даними, одно- та двоетапні глибокі детектори забезпечують mAP на рівні 0,95 – 0,97, а багатозадачні/мультимодальні конвеєри – найменшу помилку оцінки стану (RMSE 0,05 – 0,08). На edge-пристроях можливо досягти 18 – 35 fps (залежно від архітектури), що уможливорює обробку на місці з подальшим вивантаженням кадрів для важкої сегментації у хмарі. Запропонована архітектура поєднує легкий детектор YOLOv8-Nano (~28 fps) на борту та хмарні модулі для сегментації й фотометричного аналізу; контрастивне попереднє навчання на 20 000 неанотованих фрагментах зменшує потребу в розмітці приблизно на 60 %, а дешевий твердотільний LiDAR покращує точність класифікації пошкоджень і дає змогу вимірювати крен/нахил із точністю до $\pm 2^\circ$.

Висновки. Автоматизована інспекція знаків суттєво підвищує частоту та об'єктивність оцінювання, скорочує витрати ручних обстежень і створює основу для керованого життєвого циклу активів. Подальші кроки: розширення відкритих наборів даних зі сценами деградації, удосконалення фізично обґрунтованих мереж для безпосередньої оцінки світлоповернення та довготривалі дослідження впливу на безпеку і економіку.

Ключові слова: автомобільна дорога, глибинне навчання, інспекція дорожніх знаків, інтелектуальні транспортні системи, комп'ютерний зір, оцінювання стану, управління активами.

Вступ

Дорожні знаки, розмітка та інші технічні засоби організації дорожнього руху несуть нормативну інформацію, знижують когнітивне навантаження на водія та мінімізують неоднозначність у складних дорожніх ситуаціях. Коли знаки вицвітають, деформуються або перекриваються рослинністю, підвищується ймовірність помилок та тяжкість наслідків ДТП. У сучасних умовах цифровізації та обмежених ресурсів муніципалітетів потрібні інструменти, які б поєднували точність «польових» вимірювань з регулярністю та масштабованістю автоматизованої аналітики. Тільки в Україні за офіційними документами Агентства відновлення у 2023 році було **замінено та встановлено 43,1 тис. дорожніх знаків** [10]. Поточна стратегія інспекції базується на дворічних ручних аудитах, які коштують приблизно 7 мільйонів євро на рік і охоплюють лише 35 % запасів через обмеженість ресурсів. Системи інспекції на основі штучного інтелекту пропонують зміну парадигми, дозволяючи безперервний збір даних по всьому автопарку за допомогою відеореєстраторів, мобільних картографічних фургонів і навіть краудсорсингових відеозаписів зі смартфонів. Тим не менш, розгортання таких систем у великих масштабах створює технічні та організаційні проблеми, які виходять за рамки традиційних завдань розпізнавання дорожніх знаків (ТЗРДЗ), що розгортаються в передових системах допомоги водієві. На відміну від ТЗРДЗ, яке видає семантичний клас знака, оцінка стану вимагає кількісної оцінки відповідності кольору, світловідбивної здатності, геометричного спотворення та пошкодження поверхні, кожен з яких обмежений законодавчими допусками. У наступних розділах розглядаються існуючі підходи, виявляються прогалини та пропонуються вдосконалення, адаптовані до українського та ширшого європейського контекстів.

Основна частина

Основні підходи до автоматизованої інспекції дорожніх знаків і подано їхні типові конвеєри, сильні сторони та обмеження наведено у **табл. 1**. Порівняння ґрунтується на вимогах до даних, точності розпізнавання (mAP), здатності локалізувати пошкодження, ресурсомісткості виконання моделі та стійкості до складних умов (оклюзії, туман, сніг). Це дозволяє обрати архітектуру під конкретні обмеження — від легкого «edge» виконання моделі на периферійних GPU до високоточних мультимодальних конвеєрів.

Таблиця 1

Порівняльний огляд автоматизованих методів оцінки дорожніх знаків з типовими конвеєрами, ключовими перевагами та обмеженнями

Підхід	Типовий конвеєр	Переваги	Обмеження
Правила за кольором та формою	Сегментація за кольором у просторі HSV → розпізнавання геометричних фігур (перетворення Гафа або контурний аналіз) → порівняння з еталонним зразком	Легкий; не потребує навчальних даних; прозорі правила	Чутливість до освітлення; слабка узагальненість; не кількісна оцінка пошкоджень
Класичне ML (HOG-SVM, SIFT-SVM)	Попередня обробка зображення → виділення ручних ознак (HOG-SVM / IFT-SVM) → класифікатор (SVM / Softmax), бінарний або багатокласовий	Невеликі вимоги до даних; проста реалізація; швидке навчання	Роздільні розпізнавання та класифікація; важке масштабування
Одноетапні DL-детектори (YOLOv8, SSD)	Одна CNN за один прохід знаходить об'єкт і визначає його тип, тобто прогнозує обмежувальні прямокутники (bounding boxes) та класи об'єктів (end-to-end)	Високий mAP (> 0,95); обробка в реальному часі на edge-GPU; проста експлуатація	Високі вимоги до даних; вразливість до оклюзій, туману, снігу

Підхід	Типовий конвеєр	Переваги	Обмеження
Двоетапні DL-детектори (Faster R-CNN, Mask R-CNN)	Мережа пропозицій регіонів (RPN) формує області-кандидати → CNN класифікує об'єкт і уточнює рамки / сегментує маску (Mask R-CNN)	Краща повнота для дрібних об'єктів; маски допомагають локалізувати пошкодження	Важче виконання моделі; потребує більшого об'єму пам'яті; складне налаштування
Багатозадачні та гібридні моделі	Спільний backbone (базовий екстрактор ознак) навчається одночасно для розпізнавання та оцінки стану (регресія / сегментація)	Менше параметрів; спільна оптимізація підвищує узгодженість	Дефіцит даних із мітками пошкоджень; складне балансування втрат

Починаючи приблизно з 2019 року, глибокі згорткові нейромережі (CNN) витіснили класичні підходи з інженерією ознак завдяки вищій точності, кращій узагальнюваності та можливості навчання «edge-to-edge». Останні огляди відзначають систематичну перевагу DL-методів у задачах виявлення/розпізнавання дорожніх знаків [11, 12].

Разом із цим, практичні системи спираються на **стандартизовані бенчмарки**: German Traffic Sign Detection Benchmark (GTSDB) для розпізнавання знаків та Mapillary Vistas Dataset (MVD) для складних вуличних сцен із піксельно-точними анотаціями для семантичної сегментації/розпізнавання у складних умовах [13, 14]. На цих наборах сучасні одноетапні детектори (зокрема родина YOLO) досягають дуже високої точності за реального часу обчислень. Водночас двоетапні архітектури (Faster/Mask R-CNN) зазвичай краще відпрацьовують малі та частково закриті об'єкти завдяки мережі пропозицій регіонів і пірамідам ознак (FPN), що підвищує повноту виявлення дрібних знаків, хоч і за більшої обчислювальної ціни. Схожу тенденцію щодо малих об'єктів описано у базових роботах по FPN/Mask R-CNN та спеціалізованих дослідженнях зі знаками [15–18]. Це задає природний перехід від виявлення до **оцінювання стану**: детектор формує первинні рамки та класи, а далі потрібні **кількісні показники придатності** самого знака.

Оцінювання стану доповнює розпізнавання кількісними показниками, що безпосередньо пов'язані з експлуатаційною придатністю:

- стабільність/відхилення кольору;
- механічні пошкодження полотна (вигин, вандалські написи);
- написи та піктограми (відповідність стандарту);
- світлоповернення (ретрорефлексійні властивості).

Для коректних вимірювань кольорів спершу нормалізують баланс білого (Grey-World / Shades-of-Grey / Grey-Edge), після чого переводять зображення в CIELAB і оцінюють різницю кольору $\Delta E/\Delta E_{00}$ (CIEDE2000): що менше значення — то краща збереженість фарби. У польових умовах похибку зменшують **еталонні колірні мішені** (color-checker) та калібрування перед інспекцією [7 – 9, 19].

Механічні пошкодження (вигини, корозія, графіті) ефективно локалізуються методами **семантичної сегментації**. Ефективною базою є encoder-decoder архітектури класу U-Net. На репрезентативних вибірках для інфраструктури такі мережі демонструють високі значення IoU [20].

Читабельність **написів та піктограм** оцінюють за **CER/WER** (OCR, укр./латиниця), **контрастом** гліфів до фону (Weber/Michelson), **товщиною штриха, x-height та різкістю** (MTF-подібні показники). Маски гліфів, отримані сегментацією, дають змогу окремо оцінювати забруднення/сколи **в межах знаків-літер**, а не лише по всьому полотну. **Відповідність** піктограм і шрифтів перевіряють зіставленням з еталонними шаблонами (ДСТУ 4100:2021) за **SSIM/Chamfer/Hausdorff-відстанню** або за ключовими орієнтирами [11, 12, 19, 21].

Нормативною величиною також є **коефіцієнт світлоповернення RA**. Прямі вимірювання потребують ретрорефлектометрів / мобільних комплексів; тому використовують **фотометричні проксі-методи**: нічні знімки зі спалахом, денне **HDR** з реконструкцією «нічної видимості», а також

LiDAR або **стереофотометрію**. За великих кутів спостереження похибка різко зростає, тож практичні системи дотримуються наближено нормативної геометрії вимірювань [1 – 6].

Але навіть ретельно скориговане RGB-зображення не завжди дозволяє надійно виміряти фізичні параметри матеріалу (світлоповернення, деламінація плівок). Це мотивує перехід до мультимодальних схем, де зображення підкріплюють глибиною, тепловізією чи радаром. Мультимодальні дані також допомагають у відокремленні знака від фону та виявленні деформацій полотна. Щоб подолати обмеження монокулярного зору за складного освітлення, відблисків та часткових закриттів, дедалі частіше додають глибину (стерео/LiDAR), теплове ІЧ-зображення та інші сенсори. Такі комбінації підвищують достовірність оцінювання стану без суттєвої втрати продуктивності в польових умовах. Карти глибини дають змогу стійко підганяти площину знака, автоматично оцінювати нахил і викривлення (warp), а також відсікати хибні спрацьовування за геометрією. Для дорожніх знаків добре себе показали підходи, що поєднують LiDAR-інтенсивність та RGB, як у методах вилучення / класифікації знаків з мобільних хмар точок, так і в LiDAR↔камера-злитті для 3D-детекції; зокрема, злиття використовують для усунення помилок виявлення недоліків за рахунок 3D-перевірок відповідності 2D-пропозицій [22–25].

Щоб обрати архітектуру під конкретні обмеження даних та апаратури, доцільно порівнювати підходи за єдиною системою показників. Для цього будемо використовувати: **точність виявлення** (*mAP*), **точність оцінювання стану** (RMSE нормованих показників — ΔE_{00} для кольору, метрики маски/геометрії, RA для світлоповернення), **потребу в розмічених даних**, **пропускну здатність на edge-пристрої** (FPS на Jetson-NX) та **пояснюваність** (зручність інтерпретації результатів). Такий підхід дозволяє порівнювати як «легкі» конвеєри з виконанням на борту, так і більш точні, але ресурсомісткі мультимодальні рішення.

Правила за кольором / формою та класичні ознаки (HOG/SIFT з SVM) майже не потребують розмітки і дають максимальну швидкість та пояснюваність, проте поступаються точністю й стійкістю до складних умов. Одноетапні детектори (родина YOLO) забезпечують високу точність у реальному часі; двоетапні схеми з FPN (Faster/Mask R-CNN) краще утримують **малі / частково закриті** об'єкти ціною більшого навантаження на обчислення. Сегментаційні моделі (U-Net-подібні) потрібні, коли важлива локалізація пошкоджень по пікселях. Мультимодальні конвеєри здатні зменшувати хибні спрацьовування й стабілізувати оцінювання стану, але вимагають додаткових сенсорів і синхронізації. Узагальнені значення в літературі підтверджують цю картину: **mAP $\approx$ 0,95–0,97** для сучасних DL-детекторів і найменші RMSE для мультимодальних конвеєрів [11–18, 20, 22–24, 26].

У **табл. 2** наведено типові діапазони потреб у даних, точності й швидкості для кожного класу підходів. Це дозволяє обирати рішення базуючись на потребах: якщо критичні **швидкість та простота впровадження**, виправдані rule-based / класичні рішення; якщо потрібні **висока точність розпізнавання** — одно-/двоетапні DL; якщо ключова **якість оцінювання стану** за складних умов — доцільно розглядати **сегментацію та мультимодальність** з прийнятною ціною за обчислення і сенсори.

Таблиця 2

**Ключові показники ефективності для типових конвеєрів
автоматизованої інспекції**

Показник	Правила за кольором та формою (rule-based)	Класичне ML	Глибоке виявлення	Глибока сегментація	Мультимодальний підхід
Потреба в наборі розмічених даних	—	≤ 500 масок	5 тис. – 50 тис. масок	≈ 5 тис. масок	RGB+Depth
Середній mAP розпізнавання	0,55	0,72	0,95	0,96	0,97

Кінець таблиці 2

Показник	Правила за кольором та формою (rule-based)	Класичне ML	Глибоке виявлення	Глибока сегментація	Мультиmodalний підхід
RMSE оцінки стану	—	0,20	0,12	0,08	0,05
FPS на краю (Jetson-NX), кадр/сек	80	55	35	18	22
Пояснюваність	Висока	Середня	Низька	Низька	Середня

Удосконалений підхід

На **рис. 1** показано гібридну архітектуру «edge-cloud», яка вирішує вищезазначені проблеми. Конвеєр працює у два рівні. Відео з відеореєстратора спочатку аналізується на борту транспортного засобу легким детектором YOLOv8-Nano, який витягує кадри-кандидати зображень засобів керування дорожнім рухом. Тільки ці компактні кадри передаються до хмарного кластера, де важчі моделі виконують сегментацію пошкоджень на рівні пікселів, аналіз кольору та світловідбивної здатності, а також 3D-планарну апроксимацію з використанням даних LiDAR, коли вони доступні. Результати надходять на панель активного навчання, яка позначає невизначені випадки для перевірки людиною та зрештою заповнює базу даних управління активами на основі ГІС.

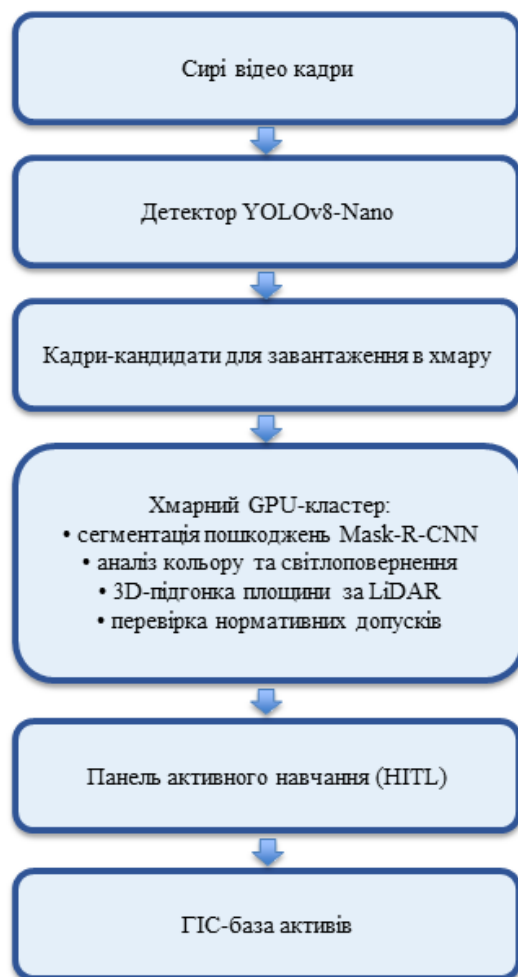


Рисунок 1 — Запропонований гібридний конвеєр обробки даних «edge-cloud»

Ключові іновачії включають:

- самостійне попереднє навчання. Контрастне навчання на 20 000 годин немаркованого відео з відеореєстратора зменшує потребу в маркованих даних на 60 %;
- синтетичне доповнення. Фізично коректний рендеринг (PBR) генерує керовані візерунки згасання, бруду та графіті, що призводить до безперервних міток стану;
- мультимодальне злиття. Низькобюджетний твердотільний LiDAR додає глибини, покращуючи класифікацію пошкоджень та дозволяючи вимірювати нахил у межах $\pm 2^\circ$;
- розділення «edge-cloud». Легкий YOLOv8-Nano працює зі швидкістю 28 кадрів/с на базі Jet-son-Nano 2GB, надсилаючи до хмари лише кадрівання 256×256 для інтенсивної сегментації та фотометричного аналізу;
- активне навчання. Панель керування з функцією людина-в-циклі (HITL) вибірково аналізує неоднозначні випадки (достовірність $< 0,6$) для ручного перегляду, що забезпечує 10-кратне підвищення ефективності анотацій;
- механізм відповідності нормативним вимогам. Модуль правил перетворює піксельні вимірювання на метричні допуски, посиляючись на ДСТУ 4100:2021, та автоматично генерує звіти у форматі PDF [21].

Висновки

Останні дослідження та польові випробування свідчать, що гібридний конвеєр «edge-cloud» органічно інтегрується у регулярний моніторинг і експлуатаційне утримання ТЗОД. Автоматизовані інспекції забезпечують не гірші, а часто й вищі показники за частотою виявлення об'єктів, якістю сегментації та точністю оцінювання кольорових відхилень / світлоповернення, одночасно скорочуючи загальний цикл перевірки — від виявлення до прийняття рішення щодо відновлення.

На практиці дорожні служби отримують дві ключові переваги:

- частіші та об'єктивні оцінки стану дорожніх знаків, що зменшує час від появи деградації до її виявлення;
- зниження потреби в ручних обстеженнях, коли частина перевірок переноситься на автоматизовані процедури з вибірковою верифікацією.

Із фінансового погляду, початкові витрати зумовлені переважно обладнанням периферійної обробки та стартовими ресурсами хмарних обчислень, а поточні — зберіганням даних, періодичним перенавчанням моделей і цільовою перевіркою людиною. Інвестиції стають доцільними, щойно навіть невелику частку ручних перевірок замінено автоматизованою обробкою, а графіки технічного обслуговування уточнено завдяки більш насиченому потоку даних. Аналіз чутливості показує, що ці висновки зберігаються в реалістичних діапазонах точності моделей, ставок оплати праці та вартості обладнання.

Загалом, інспекція знаків на основі III вийшла за межі лабораторних демонстрацій. Хоча жоден окремих метод ще не покриває повністю вимоги точності, вартості та нормативів, раціональне поєднання контрастного попереднього навчання, мультимодального сенсорного супроводу та ієрархічної обробки дозволяє досягти необхідного балансу швидкості, точності та пояснюваності.

Наступні кроки до масштабованих, готових до промислового використання систем включають:

- розширення відкритих наборів даних із достатнім охопленням типових сценаріїв деградації;
- розвиток фізично обґрунтованих мереж для прямої оцінки коефіцієнта світлоповернення;
- масштабні поздовжні дослідження для кількісної оцінки ефектів на безпеку та економіку.

Разом ці зусилля прокладають шлях до надійного, керованого даними управління дорожніми активами в ініціативах розумного транспорту.

Список літератури

1. FHWA. Sign Retroreflectivity – Definitions and Units (R_A, cd/lux/m²). URL: <https://highways.dot.gov/safety/other/visibility/workshops-nighttime-visibility-traffic-signs-summary-workshop-findings-7> (дата звернення: 08.10.2025).
2. Khalilikhah M., та ін. Using Stationary Image-Based Method for Evaluation of Traffic Sign Condition. Case Studies in Transport Policy, 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016300429> (дата звернення: 08.09.2025).

3. Balali V., at all Image-Based Remote Measurement of Retro-Reflectivity of Traffic Signs (Daytime HDR → Nighttime). Mineta Transportation Institute Report 1878, 2021. URL: <https://transweb.sjsu.edu/sites/default/files/1878-Balili-Remote-Measurement-Road-Reflectivity.pdf> (дата звернення: 08.09.2025).
4. Oregon DOT (ODOT). Retroreflective Signs — Final Report. 2018. URL: <https://www.oregon.gov/odot/Programs/ResearchDocuments/SPR799LidarRetroFinalReport.pdf> (дата звернення: 08.09.2025).
5. Maerz N.H., at all Automated Mobile Highway Sign Visibility Measurement Using Nighttime Video. TRB, 2002. URL: https://www.mst.edu/~norbert/pdf/trb02_maerz_sign.pdf (дата звернення: 08.09.2025).
6. Cai H.Y., Li L.J. Measuring Light and Geometry Data of Roadway Environments using HDR Photogrammetry. J. Transportation Technologies, 2012. URL: <https://scispace.com/pdf/measuring-light-and-geometry-data-of-roadway-environments-1axhsejfv.pdf> (дата звернення: 08.10.2025).
7. Finlayson G.D., Trezzi E. Shades of Gray and Colour Constancy. IS&T Color Imaging Conf., 2004. URL: <https://library.imaging.org/admin/apis/public/api/ist/website/downloadArticle/cic/12/1/art00008> (дата звернення: 08.09.2025).
8. van de Weijer J., Gevers T., Gijsenij A. Grey-Edge Hypothesis and Color Constancy. Tech. Report CR-2542, INRIA/LEAR, 2007. URL: <https://lear.inrialpes.fr/people/vandeweijer/papers/cr2542.pdf> (дата звернення: 08.09.2025).
9. Sharma G., Wu W., Dalal E.N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes... *Color Research & Application*, 2005, 30(1):21–30. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.20070>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/col.20070> (дата звернення: 08.09.2025).
10. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. Звіт про виконання паспорта бюджетної програми на 2023 рік (КПКВК 3111020) [Електронний ресурс]. Київ, 2024. URL: https://restoration.gov.ua/4489/finansovo-ekonomichna_diialnist/59452/59540.pdf (дата звернення: 08.09.2025).
11. Lim X. R., Lee C. P., Lim K. M., Ong T. S., Alqahtani A., Ali M. Recent Advances in Traffic Sign Recognition: Approaches and Datasets. *Sensors*, 2023, 23(10):4674. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23104674>. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4674> (дата звернення: 08.09.2025).
12. Chen H., Li X., Zhou W., та ін. Computational methods for automatic traffic signs detection and recognition: a review. *Array*, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024017961> (дата звернення: 08.09.2025).
13. Houben S., Stallkamp J., Salmen J., Schlipsing M., Igel C. Detection of Traffic Signs in Real-World Images: The German Traffic Sign Detection Benchmark. *Proc. IJCNN*, 2013, 715–722. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2013.6706807>.
14. Neuhold G., Ollmann T., Rota Bulò S., Kotschieder P. The Mapillary Vistas Dataset for Semantic Understanding of Street Scenes. *ICCV*, 2017. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017/papers/Neuhold_The_Mapillary_Vistas_ICCV_2017_paper.pdf (дата звернення: 08.09.2025).
15. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. *CVPR*, 2017. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Lin_Feature_Pyramid_Networks_CVPR_2017_paper.pdf (дата звернення: 08.09.2025).
16. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN. *arXiv:1703.06870*, 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870> (дата звернення: 08.10.2025).
17. Zhang H., Wu C., Zhang Z., та ін. ResNeSt: Split-Attention Networks. *arXiv:2004.08955*, 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.08955> (дата звернення: 08.09.2025).
18. Li S., Zhang H., Wang B., та ін. A Small Object Detection Algorithm for Traffic Signs Based on the Improved YOLOv7. *Sensors*, 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10459082/> (дата звернення: 08.09.2025).
19. Huang X., та ін. Adaptive colour calibration for traffic-sign inspection. *IET Intelligent Transport Systems*, 2023.

20. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv:1505.04597, 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1505.04597> (дата звернення: 08.09.2025).
21. ДСТУ 4100:2021. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
22. Zhang F., та ін. Extracting Traffic Signage by Combining Point Clouds and Images. Remote Sensing, 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9964076/> (дата звернення: 08.09.2025).
23. Ahn Y., Munjy R., Li Z. Traffic Sign Extraction from Mobile LiDAR Point Cloud. ROSA P / NTL, 2024. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/75693> (дата звернення: 08.09.2025).
24. Cheng Y.-T., та ін. Image-Aided LiDAR Extraction, Classification, and Mapping. Remote Sensing, 2024. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/10/1668> (дата звернення: 08.09.2025).
25. Müller S., та ін. Multimodal damage detection for road-side assets. ITS World Congress, 2024.
26. Tomita K., та ін. A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection. Sensors, 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8779359/> (дата звернення: 08.09.2025).

References

1. FHWA. Sign Retroreflectivity – Definitions and Units (R_A, cd/lux/m²). URL: <https://highways.dot.gov/safety/other/visibility/workshops-nighttime-visibility-traffic-signs-summary-workshop-findings-7> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
2. Khalilikhah M., et al. Using Stationary Image-Based Method for Evaluation of Traffic Sign Condition. Case Studies in Transport Policy, 2016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2046043016300429> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
3. Balali V., et al. Image-Based Remote Measurement of Retro-Reflectivity of Traffic Signs (Daytime HDR → Nighttime). Mineta Transportation Institute Report 1878, 2021. URL: <https://transweb.sjsu.edu/sites/default/files/1878-Balili-Remote-Measurement-Road-Reflectivity.pdf> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
4. Oregon DOT (ODOT). Retroreflective Signs — Final Report. 2018. URL: <https://www.oregon.gov/odot/Programs/ResearchDocuments/SPR799LidarRetroFinalReport.pdf> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
5. Maerz N. H., et al. Automated Mobile Highway Sign Visibility Measurement Using Nighttime Video. TRB, 2002. URL: https://www.mst.edu/~norbert/pdf/trb02_maerz_sign.pdf (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
6. Cai H. Y., Li L. J. Measuring Light and Geometry Data of Roadway Environments using HDR Photogrammetry. Journal of Transportation Technologies, 2012. URL: <https://scispace.com/pdf/measuring-light-and-geometry-data-of-roadway-environments-laxhsejfv.pdf> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
7. Finlayson G.D., Trezzi E. Shades of Gray and Colour Constancy. IS&T Color Imaging Conference, 2004. URL: <https://library.imaging.org/admin/apis/public/api/ist/website/downloadArticle/cic/12/1/art00008> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
8. van de Weijer J., Gevers T., Gijsenij A. Grey-Edge Hypothesis and Color Constancy. Technical Report CR-2542, INRIA/LEAR, 2007. URL: <https://lear.inrialpes.fr/people/vandeweijer/papers/cr2542.pdf> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
9. Sharma G., Wu W., Dalal E. N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes... *Color Research & Application*, 2005, 30 (1). 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.20070>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/col.20070> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
10. State Agency for Restoration and Development of Infrastructure of Ukraine. Report on the Execution of the Passport of the Budget Program for 2023 (KPKVK 3111020) [in Ukrainian]. Kyiv, 2024. URL: https://restoration.gov.ua/4489/finansovo-ekonomichna_diialnist/59452/59540.pdf (Last accessed: 09.10.2025) [in English].
11. Lim X. R., Lee C. P., Lim K. M., Ong T. S., Alqahtani A., Ali M. Recent Advances in Traffic Sign Recognition: Approaches and Datasets. *Sensors*. 2023. 23(10):4674. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23104674>. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4674> (Last accessed: 08.10.2025) [in English].

12. Chen H., Li X., Zhou W., et al. Computational methods for automatic traffic signs detection and recognition: a review. *Array*, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024017961> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 13. Houben S., Stallkamp J., Salmen J., Schlipsing M., Igel C. Detection of Traffic Signs in Real-World Images: The German Traffic Sign Detection Benchmark. *Proc. IJCNN*, 2013. 715–722. DOI: <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2013.6706807> [in English].
 14. Neuhold G., Ollmann T., Rota Bulò S., Kotschieder P. The Mapillary Vistas Dataset for Semantic Understanding of Street Scenes. *ICCV*, 2017. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017/papers/Neuhold_The_Mapillary_Vistas_ICCV_2017_paper.pdf (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 15. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. *CVPR*, 2017. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Lin_Feature_Pyramid_Networks_CVPR_2017_paper.pdf (Last accessed: 08.10.2025) [in English].
 16. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN. *arXiv:1703.06870*, 2017. URL: <https://arxiv.org/pdf/1703.06870> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 17. Zhang H., Wu C., Zhang Z., et al. ResNeSt: Split-Attention Networks. *arXiv:2004.08955*, 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.08955> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 18. Li S., Zhang H., Wang B., et al. A Small Object Detection Algorithm for Traffic Signs Based on the Improved YOLOv7. *Sensors*, 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10459082/> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 19. Huang X., et al. Adaptive colour calibration for traffic-sign inspection. *IET Intelligent Transport Systems*, 2023 [in English].
 20. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *arXiv:1505.04597*, 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1505.04597> (Last accessed: 08.09.2025).
 21. DSTU 4100:2021. Road signs. General technical conditions. Kyiv: SE «UkrNDNC», 2021 [in Ukrainian].
 22. Zhang F., et al. Extracting Traffic Signage by Combining Point Clouds and Images. *Remote Sensing*, 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9964076/> (Last accessed: 08.10.2025) [in English].
 23. Ahn Y., Munjy R., Li Z. Traffic Sign Extraction from Mobile LiDAR Point Cloud. *ROSA P / NTL*, 2024. URL: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/75693> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 24. Cheng Y.-T., et al. Image-Aided LiDAR Extraction, Classification, and Mapping. *Remote Sensing*, 2024. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/10/1668> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
 25. Müller S., et al. Multimodal damage detection for road-side assets. *ITS World Congress*, 2024 [in English].
 26. Tomita K., et al. A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection. *Sensors*, 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8779359/> (Last accessed: 08.09.2025) [in English].
-

Roman Smolyanyuk, Ph.D., Sciences Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7087-7834>
Serhii Khalin, <https://orcid.org/0009-0009-6061-8498>

Kharkiv National Automobile and Highway University (KHNADU), Kharkiv, Ukraine

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR AUTOMATED IDENTIFICATION AND CONDITION ASSESSMENT OF TRAFFIC CONTROL DEVICES

Abstract

Introduction. Traffic control devices, primarily traffic signs and road markings make the roadway environment intelligible to drivers and have a major impact on safety. Manual inspections remain the benchmark for compliance, but they are labour-intensive, costly, and episodic, which creates long lag times

between deterioration and remediation. Recent advances in computer vision and deep learning enable automated pipelines that detect, classify and assess the condition of signs using video and images, optionally supported by photometric measurements of retroreflectivity.

Problem statement. Despite high accuracy on public benchmarks, deep models degrade in real-world edge cases: fading, dirt, graffiti, occlusions by foliage, snow or fog, and strong off-axis viewpoints. Moreover, condition assessment requires quantified metrics — colour difference, glyph legibility and contrast, geometric deformation and retroreflectivity — rather than a coarse «good / damaged» label.

Purpose. To consolidate approaches for automated inspection, compare their strengths and limitations under realistic constraints, and outline an edge–cloud architecture that minimizes manual effort while meeting regulatory tolerances.

Materials and methods. We consider a spectrum of methods — from color/shape rules and classical hand-crafted features (HOG-SVM, SIFT-SVM) to single-stage object detectors (YOLOv8, SSD), two-stage detectors (Faster R-CNN, Mask R-CNN), and multi-task as well as multimodal approaches that incorporate depth maps (LiDAR/stereo). For quantitative condition assessment, we describe conversion to the CIELAB color space after Gray-World or Shades-of-Grey white balancing, the use of physics-guided networks to estimate retroreflectivity, and the evaluation metrics employed (mAP for recognition, RMSE for condition regression, FPS on Jetson-NX).

Results. Based on aggregated data, single- and two-stage deep detectors deliver mAP of 0.95 – 0.97, while multi-task/multimodal pipelines achieve the lowest error in condition estimation (RMSE 0.05 – 0.08). On edge devices, 18 – 35 fps is attainable (architecture-dependent), enabling on-device processing with subsequent offloading of candidate frames for heavy segmentation in the cloud. The proposed architecture combines a lightweight on-board YOLOv8-Nano detector (~28 fps) with cloud modules for segmentation and photometric analysis; contrastive pretraining on 20,000 unlabeled patches reduces labeling needs by ~60%, and an inexpensive solid-state LiDAR improves damage-class accuracy and enables tilt/roll measurement with $\pm 2^\circ$ precision.

Conclusions. AI-assisted inspection substantially increases the frequency and objectivity of assessments, shortens maintenance cycles and creates the basis for data-driven asset management. Future priorities include expanding open datasets with authentic degradation patterns, improving physics-guided networks for direct retroreflectivity estimation, and conducting longitudinal studies to quantify safety and economic benefits.

Keywords: road, traffic sign inspection; computer vision; deep learning; condition assessment; intelligent transportation systems; asset management.

УДК 338.5:625.7/8

Стасюк Б. О.¹, д-р філос. з економіки, <https://orcid.org/0000-0003-2504-6577>Вознюк А. Б.¹, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-7611-9652>Гуков М. І., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0002-4241-1417>Дуля М. В.¹, <https://orcid.org/0000-0002-1916-8642>¹Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

СУЧАСНА ІСТОРІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОРОЖНЬОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

Анотація

Вступ. Ця стаття має на меті окреслити основні етапи створення системи інформаційного забезпечення дорожнього господарства України, задля подальшого створення ефективних механізмів обґрунтування та раціонального планування робіт з будівництва, реконструкції, ремонту та утримання доріг.

Проблематика. Без достовірної інформації про мережу автомобільних доріг та її завантаженості транспортними потоками, неможливе адекватне обґрунтування розподілу фінансів на утримання та ремонт доріг. Мережа автомобільних доріг постійно зазнає значних змін, як і через руйнування внаслідок повномасштабного вторгнення російської федерації, природну деградацію, так і в результаті змін логістичних маршрутів, що викликає потребу у опрацюванні інформації, що динамічно змінюється, для прийняття найбільш оптимальних рішень.

Мета. Узагальнити інформацію про стан інформаційного забезпечення дорожньої галузі охоплюючи період 2000 – 2024 років. А також, перспективи впровадження системи інформаційного забезпечення господарства та використання її в якості інформаційної підтримки для обґрунтування рішень щодо утримання та ремонтів доріг, подальшого розвитку мережі. Системне надання інформації (даних) про автомобільні дороги, споруди на них, об'єкти дорожнього сервісу, транспортні потоки, природні та техногенні явища, яка необхідна для планування та проведення робіт забезпечать максимально ефективне використання існуючого фінансового ресурсу.

Матеріали й методи. Методи комплексного і системного аналізу, абстрактно-логічний, графічний, статистичний.

Результати. Проведено аналізування сучасної історії інформаційного забезпечення дорожнього господарства України, нормативні та технічні аспекти інформаційного забезпечення.

Висновки. На поточний момент дорожнє господарство України теоретично підготовлено для широкомасштабного впровадження системи інформаційного забезпечення господарства та використання її в якості інформаційної підтримки для обґрунтування рішень щодо утримання та ремонтів доріг, подальшого розвитку мережі. Затримка викликана відсутністю необхідного фінансового ресурсу, який на поточний момент сконцентрований на відсічі військових загарбницьких дій російської федерації.

Ключові слова: автомобільна дорога, дані, інформація, лінійна прив'язка, нормативний документ, просторові дані, просторові координати.

Вступ

Мережа автомобільних доріг загального користування України, яка функціонує сьогодні, була сформована переважно до 1980-х років XX століття. Її структурне ядро закладалося в період інтенсивного дорожнього будівництва, що припадає на 1960 – 1970 роки, коли реалізовувалися масштабні інфраструктурні проєкти, спрямовані на забезпечення транспортного сполучення між ключовими промисловими, адміністративними та сільськогосподарськими регіонами.

Проектування дорожніх об'єктів у зазначений період здійснювалося відповідно до нормативно-технічної бази, актуальної на той час, з урахуванням експлуатаційних характеристик транспортних засобів середини XX століття. Це передбачало обмежені параметри поперечного профілю дороги, несучої здатності дорожнього одягу, а також рівня інженерного забезпечення (дренаж, водовідведення, узбіччя, елементи безпеки руху тощо).

У подальші десятиліття модернізація дорожньої мережі здійснювалася переважно в рамках реконструкції окремих ділянок, що включала підсилення конструктивних шарів дорожнього одягу (зокрема, основи та покриття), а також локальне розширення проїзної частини з метою адаптації до зростаючих транспортних навантажень. Проте такі заходи, як правило, не супроводжувалися комплексною ревізією геометричних параметрів дороги, оновленням інженерних мереж або впровадженням сучасних систем управління дорожнім рухом [1].

Уже на рубежі тисячоліть стало очевидним, що застосування поведінкових моделей прийняття рішень в умовах повної або часткової невизначеності має критичне значення для ефективного управління дорожньою інфраструктурою. Зокрема, відсутність достовірної та систематизованої інформації щодо просторової структури мережі автомобільних доріг, інтенсивності та напрямків транспортних потоків, а також обмежений доступ до повного спектра можливих альтернативних рішень, їх ймовірностей та прогнозованих наслідків, унеможлиблює формування раціональної стратегії розвитку дорожньої галузі.

Крім того, відсутність формалізованої системи ранжування пріоритетів за критерієм важливості — як у контексті інженерно-технічних параметрів, так і з точки зору соціально-економічної доцільності — призводить до неузгодженості управлінських рішень, що, у свою чергу, негативно впливає на технічний стан автомобільних доріг, їх експлуатаційну надійність та безпеку руху.

Цей дисбаланс між необхідністю системного планування та фактичною практикою інфраструктурного управління був підтверджений подальшими подіями, які набули характеру історичних — зокрема, через зростання аварійності, деградацію дорожнього полотна, неефективне використання бюджетних ресурсів та зниження рівня мобільності населення. Таким чином, досвід початку XXI століття чітко засвідчив потребу у впровадженні сучасних методів аналізу ризиків, цифрового моделювання транспортних систем та багатокритеріального прийняття рішень у сфері дорожнього проектування та управління.

Без достовірної інформації про мережу автомобільних доріг та її завантаженості транспортними потоками, неможливе адекватне обґрунтування розподілу фінансів на утримання та ремонт доріг. Метою інформаційного забезпечення дорожньої галузі є системне надання інформації (даних) про автомобільні дороги, споруди на них, об'єкти дорожнього сервісу, транспортні потоки, природні та техногенні явища, яка необхідна для планування та проведення робіт, які забезпечать максимально ефективне використання існуючого фінансового ресурсу. Розроблення варіантів рішень та прийняття раціонального рішення можливо тільки на основі комплексної інформації про стан автомобільної дороги/мережі доріг. Комплексна інформація буде достовірною лише за умови, що дані будуть об'єктивними та актуальними на момент прийняття рішення.

Виклад основного матеріалу

Інформаційні технології — сукупність методів, виробничих і програмно-технологічних засобів, об'єднаних у технологічний ланцюжок, що забезпечує збирання, зберігання, оброблення, висновки і поширення інформації. Початок залучення інформаційних технологій в дорожню галузь був покладений ще у 2001 році згідно [2]. У 2002 році була затверджена «Програма створення системи інформаційного забезпечення на автомобільних дорогах загального користування на 2002–2010 роки» [3]. У цьому ж році паспорти автомобільних доріг починають виконувати в електронному вигляді, який по своїй суті був спробою оформлення ще радянських форм обліку у вигляді електронних таблиць з доступними на той момент найпростішими інструментами фільтрування, пошуку, статистичних вибірок тощо, а також примітивним графічним відображенням плану та поздовжнього профілю дороги зображені на **рис. 1** та **рис. 2** [4].

Рік впровадження	Назва ПАК	Призначення ПАК
2008	Галузева база даних обліку ДТП	База даних (погоджена з УДАІ України) фактів скоєння ДТП, з фіксацією супроводжуючих фактів стану транспортних засобів, дорожніх умов та погодних факторів з аналітичною системою по кілометрового аналізу виникнення місць концентрації ДТП та їх причин.

Одним із етапів стало створення мережі автоматичних лічильників транспортних засобів та пунктів обліку візуального визначення інтенсивності руху, архіву електронних паспортів автомобільних доріг [7].

Створення вищевказаних баз даних та природне бажання поєднання цих даних показало волюнтаристичний підхід до розміщення кілометрових знаків, визначення довжини автомобільних доріг, лінійних прив'язок (км+) споруд, явищ тощо.

Приблизно в цей же період остаточно стає зрозуміло, що застосування відносної системи координат — лінійних прив'язок (км+) та картографічне відображення дороги у вигляді гіпертрофованого зображення лінійного графіку — гальмує подальший розвиток системи інформаційного забезпечення.

Тому, спираючись на світовий досвід використання сучасних систем керування, а також на власний досвід використання цифрових моделей при проектуванні та будівництві доріг, у 2008 році Укравтодор приймає ряд рішень про широке залучення геоінформаційних технологій, затверджує основні вимоги до «Геоінформаційної системи керування станом автомобільних доріг України» та реалізацію пілотного проєкту в Миколаївській області.

У 2009 наказом Державної служби автомобільних доріг України [8] було введено в дію Рішення колегії державної служби автомобільних доріг України від 25.06.2009 № 48 Про затвердження Концепції програми інформатизації дорожньої галузі. Вона базувалася на застосуванні геоінформаційних технологій. Метою програми було створення єдиного інформаційного простору на основі побудови телекомунікаційної інфраструктури дорожньої галузі і інтегрованого інформаційно-аналітичного забезпечення для забезпечення надійних механізмів збору та обробки інформації з дорожніх давачів та інших технічних засобів збору інформації дорожнього рівня; надійного, оперативного, захищеного процесу обміну інформацією між об'єктами дорожньої галузі; інформування та надання послуг учасникам дорожнього руху; інтеграції розрізнених інформаційних ресурсів; забезпечення технологічного зв'язку; оперативного управління дорожнім господарством України.

Реалізація програми передбачала створення єдиного середовища для роботи інформаційних систем, збору, обробки та передачі інформації з технологічних систем дорожнього рівня до єдиною системою керування, захисту, контролю та надання послуг.

Наприкінці 2009 року набуває чинності СОУ 45.2-00018112-038:2009 «Паспорт автомобільної дороги», норми якого застосовуються при технічному обліку автомобільних доріг, періодичному моніторингу стану доріг та штучних споруд на них, розробці паспорту автомобільної дороги та внесенні змін до нього з прив'язкою на основі просторових координат.

Період 2010-2018 років характеризується майже повною зупинкою паспортизації та поступовим згасанням супутніх аналітичних процесів, яким бракувало актуальних даних про автомобільні дороги та транспортні потоки. Значною мірою причиною цих явищ стали світова фінансова криза, політична нестабільність в Україні, збройна агресія російської федерації, тимчасова окупація АР Крим та окремих районів Донецької та Луганської областей.

Одним з небагатьох процесів, для фінансування якого в кризових умовах вдавалось віднайти кошти, став процес розроблення та подальшого удосконалення нормативної бази. Поступово окреслюється оптимальний набір складових Геоінформаційної системи автомобільних доріг України, вимоги до їх функціонування та взаємодії між собою, вдосконалюються програмно-аналітичні механізми для обґрунтування інженерних та управлінських рішень.

У 2016 році набуває чинності оновлений СОУ 42.1-37641918-038:2016 Паспорт автомобільної дороги, який запровадив винятково електронний формат документообігу при паспортизації автомобільних доріг та користуванні паспортом автомобільної дороги з використанням єдиного для галузі програмного забезпечення. На основі якого на замовлення Укравтодору було розроблено ряд прикладних програм для забезпечення потреб дорожнього господарства у сфері геоінформаційних систем.

Всупереч хронічному недофінансуванню доріг, в галузі виділялися кошти для розроблення та удосконалення нормативної бази інформаційного забезпечення дорожнього господарства (табл. 2).

Таблиця 2

Нормативна база інформаційного забезпечення дорожнього господарства

Рік прийняття	Назва документа
2009	СОУ 45.2-00018112-038:2009 Паспорт автомобільної дороги
2012	СОУ 45.2-00018112-084:2012 Норми часу на паспортизацію автомобільних доріг
2013	СОУ 42.1-37641918-109:2013 Норми часу на супроводження геоінформаційної системи Укравтодору
2014	СОУ 42.1-37641918-122:2014 Автомобільні дороги. Вимоги до комплексу робіт з інформаційного забезпечення
2016	СОУ 42.1-37641918-038:2016 Паспорт автомобільної дороги
2016	СОУ 42.1-37641918-063:2016 Геоінформаційна система автомобільних доріг Вимоги до складу, змісту та застосування
2016	Зміна №1 до СОУ 42.1-37641918-109:2013 Норми часу на супроводження геоінформаційної системи Укравтодору
2018	Зміна №1 до СОУ 42.1-37641918-038:2016 Паспорт автомобільної дороги
2018	Зміна № 1 до СОУ 42.1-37641918-122:2014 Автомобільні дороги. Вимоги до комплексу робіт з інформаційного забезпечення
2019	МРА.2.1-37641918-904:2019 Методичні рекомендації з обліку довжини автомобільних доріг загального користування в односмуговому обчисленні

Практичне втілення напрацювань було реалізоване у вигляді загальнодержавного проєкту з визначення просторових координат мережі автомобільних доріг міжнародного, національного та регіонального значень в 2016 – 2018 роках та територіального значення в 2020 – 2022 роках, результатом якого було створення бази даних географічних координат автомобільних доріг загального користування та їх лінійних прив'язок. Окрім того визначались просторові координати точок проєкції на осі місцеположення існуючих кілометрових знаків, початку та кінця мостів (шляхопроводів), перетину з залізничними коліями, місць примикання (перетину) інших доріг (або з'їздів транспортних розв'язок), зміни кількості смуг руху та додаткових смуг руху, початку та кінця населених пунктів, зон комунальної власності, або інших третіх осіб, інших визначних фактів. Під час проведення польових робіт використовували сучасну технологію визначення координат GPS зйомки в RTC режимі.

Зважаючи на те, що роботи з визначення просторових координат замовляли балансоутримувачі автомобільних доріг (Служб автомобільних доріг в областях) та здійснювали різні виконавці, була проведена глобальна перевірка отриманих результатів, зведення їх у єдину мережу за принципом просторової полігонометрії, з подальшим узгодженням меж між областями. У процесі робіт були визначені просторові координати осей правих проїздів прямого та зворотного напрямків руху для автомобільних доріг міжнародного значення — 9 197,11 км, національного — 7 277,14 км, регіонального — 9 477,14, територіального — 19 745,37 км та з'їздів їх транспортних розв'язок в одному та декількох рівнях.

У 2020 році Агентством відновлення спільно з Міністерством цифрової трансформації

та за підтримки проєкту USAID/UK aid «Прозорість та підзвітність в державному управлінні та послугах/TAPAS» був розроблений інструмент КМ+ «Дорожній геокалькулятор», що дозволяє користувачам отримати інформацію стосовно назви та лінійної прив'язки (км+) автомобільних доріг, меж обслуговування балансоутримувачів, а також знаходити лінійну прив'язку (км+) дороги відповідно до просторових координат та навпаки (рис. 3) [10].

Міжнародні дороги		Національні дороги		Регіональні дороги	
M-01	Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (на м. Гомель)	N-01	Київ – Знам'янка	P-01	Київ – Обухів
M-01-01	Східний підхід до м. Броварів	N-02	/М-06/ – Кременець – Біла Церква – Ржищів – Канів – Софіївка	P-02	Київ – Іванків – Овруч
				P-02-01	Підхід до до меморіального

Рисунок 3 — Приклад пошуку за просторовими координатами на порталі «Дорожній геокалькулятор»

Уточнення просторових координат осей правих проїздів прямого та зворотного напрямків руху планувалося під час подальшої паспортизації конкретних автомобільних доріг (рис. 4). Слід зазначити, що оцінка точності отриманих результатів була здійснена при порівнянні результатів паспортизації автомобільної дороги М-05 Київ – Одеса в межах Київської області у 2024 році. Таким чином, для прямого напрямку руху було отримано похибку у 1,831 м, а для зворотного напрямку руху — 1,974 м, на ділянці довжиною 75 243,280 м (похибка виникла за рахунок не дотримання руху автомобіля, що здійснював заміри, безпосередньо по осі смуги руху на кривих в плані). Результат — більш ніж задовільний [12].



Рисунок 4 — Приклад відображення зібраних даних у середовищі QGIS

У 2021 – 2022 роках Державним агентством Укравтодор були закуплені програмні продукти, які забезпечують функціонування Єдиної геоінформаційної бази даних автомобільних доріг України (рис. 5).

Оброблення значних масивів даних і подальша робота з ними потребували удосконалення нормативної бази інформаційного забезпечення дорожнього господарства (табл. 2). На основі результатів досліджень попередніх років та набутого досвіду у період 2022 – 2024 років було розроблено серію національних стандартів ДСТУ 9332 [16 – 18].

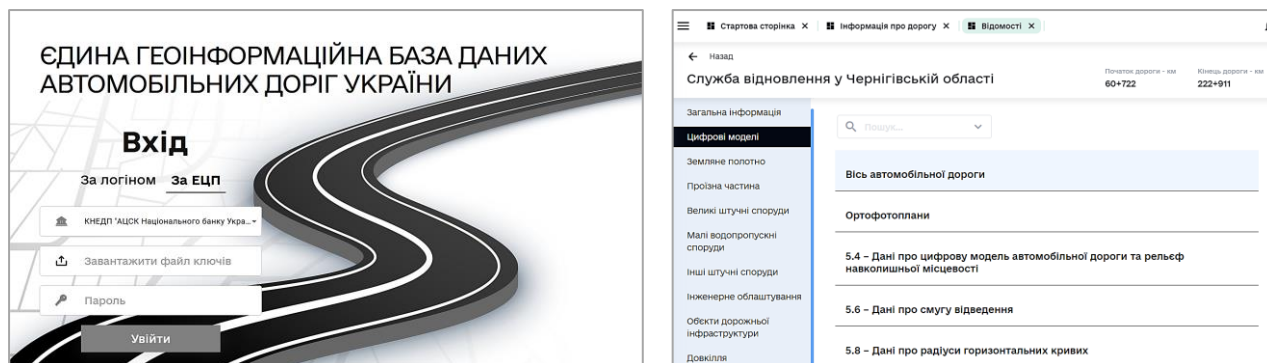


Рисунок 5 — Приклад екранних форм взаємодії з Єдиною геоінформаційною базою даних автомобільних доріг України

У результаті цієї роботи було унормовано:

- набори даних для опису цифрової моделі земляного полотна, проїзної частини дороги та оточуючого рельєфу; штучних споруд (тунелів, мостів, труб, підземних та надземних пішохідних переходів, підпірних стінок, лотків); автобусних зупинок та автопавільйонів; інженерного облаштування та інших споруд на дорозі; транспортно-експлуатаційних показників проїзної частини та дорожнього одягу та необхідні точності визначення даних;
- набори даних для опису навантаження доріг транспортними потоками та показників безпеки руху;
- періоди актуалізації інформації;
- принципи відображення зібраної інформації на картографії та в інших графічних контентах;
- перелік робіт, систематичне проведення яких забезпечить систему інформаційного забезпечення дорожнього господарства, починаючи з базисного наповнення Єдиної Базы Даних автомобільних доріг України, її актуалізації та аналітичної інформаційної підтримки для прийняття управлінських рішень на рівні всієї галузі та в окремих областях, інженерних рішень по утриманню та ремонту конкретних доріг.

Висновки

На поточний момент дорожня галузь України теоретично підготовлена для широкомасштабного впровадження системи інформаційного забезпечення господарства та використання її в якості інформаційної підтримки для обґрунтування рішень щодо утримання та ремонтів доріг, подальшого розвитку мережі.

Затримка викликана відсутністю необхідного фінансового ресурсу, який на поточний момент сконцентрований на відсічі військових загроз російської федерації.

Водночас, з огляду на стратегічну важливість дорожньої інфраструктури для економічного відновлення та мобільності населення, доцільним є наголошення на необхідності залучення додаткових інвестиційних і грантових коштів для розроблення та впровадження Системи обліку транспортного руху. Така система має забезпечити первинне отримання достовірних даних про інтенсивність руху та навантаження на дорожню мережу, а також створити умови для їх систематичного моніторингу.

Відсутність зазначеної інформації значно ускладнює проведення комплексного аналізу технічного стану доріг, прогнозування їхньої деградації та визначення пріоритетів у сфері ремонту й модернізації. Таким чином, впровадження Системи обліку руху є не лише актуальним, але й критично необхідним елементом для забезпечення науково-обґрунтованого управління дорожньою інфраструктурою України в умовах після воєнного відновлення.

Список літератури

1. Вознюк А. Б. Мережа доріг України та сучасні транспортні потоки. *Дороги і мости: Збірник наукових праць*. Київ, 2014. Випуск 14. С. 111–124.
2. Постанова Кабінету Міністрів України №1702 від 18.12.2021 «Про затвердження Порядку формування та виконання галузевої програми і проекту інформатизації». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1702-2001-%D0%BF#Text> (дата звернення: 24.08.2025).

3. Постанова Кабінету Міністрів України № 586 від 27.04.2002 «Про затвердження Програми створення системи інформаційного забезпечення на автомобільних дорогах загального користування на 2002-2010 роки». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/586-2002-%D0%BF#Text> (дата звернення: 24.08.2025).
4. Вознюк, Андрій. Use of the geographic information system of Ukrainian roads (GIS) to optimize road management in the lack of financial resource. October 2019. Conference: 26th World Road Congress At: Abu Dhabi, United Arab Emirates, PIARC.
5. Наказ Державної служби автомобільних доріг України № 268 від 02.07.2002 «Про впровадження електронного паспорта автомобільних доріг». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0268466-02#Text> (дата звернення: 24.08.2025).
6. Наказ Державної служби автомобільних доріг України № 121 від 05.04.2006 «Про забезпечення функціонування та розвитку СУСП». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0121466-06#Text> (дата звернення: 24.08.2025).
7. Наказ Державної служби автомобільних доріг України № 199 від 08.05.2007 «Про електронні паспорти автомобільних доріг та автоматичні лічильники транспортних засобів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0199466-07#Text> (дата звернення: 24.08.2025).
8. Наказ Державної служби автомобільних доріг України № 328 від 06.07.2009 «Про введення в дію рішення колегії від 25.06.2009 № 48». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0328466-09#Text> (дата звернення: 24.08.2025).
9. Постанова Кабінету Міністрів України №119 від 02.02.2024 «Деякі питання Національної програми інформатизації». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/119-2024-%D0%BF#Text> (дата звернення: 24.08.2025).
10. Геодані про дороги державного значення тепер доступні у відкритому доступі та у зручному форматі. URL: <https://www.facebook.com/agency.for.restoration/posts/pfbid02odALAr2phAGASSvxi3mAZ8G6Uf6b6vUkLc3cpsZjPKBdhacYEdhQqoC9E7FQ23dXI> (дата звернення: 24.08.2025).
11. Вознюк А. Б. Удосконалення методу прогнозування аварійно-небезпечних ділянок на мережі автомобільних доріг. : дис. канд. техн. наук : 05.22.01. Київ, 2021. 226 с.
12. Вознюк А. Б., Дуля М. В. Практичні аспекти перевіряння та аналізування наборів геопросторових даних про автомобільні дороги загального користування. *Дороги і мости*. Київ, 2025. Вип. 31. С. 149–162. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.149>.
13. Дуля М. В. Гресько І. Л. та ін. Звіт про науково-дослідну роботу «Узагальнити інформацію щодо просторових координат територіальних автомобільних доріг державного значення та доповнити базу даних географічних координат з ув'язкою їх в єдину мережу для уточнення протяжності і кілометрової прив'язки», Київ: ДерждорНДІ, 2023, 84 с.
14. СОУ 42.1-37641918-122:2014 Автомобільні дороги. Вимоги до комплексу робіт з інформаційного забезпечення (зі Зміною №1). Київ, 2014, 55 с. (Інформація та документація).
15. СОУ 42.1-37641918-038:2016 Паспорт автомобільної дороги (зі Зміною № 1). Київ, 2016, 34 с. (Інформація та документація).
16. ДСТУ 9332-1:2025 «Геоінформаційна система автомобільних доріг загального користування. Частина 1. Склад, зміст та вимоги до наборів даних». Київ, 2025. 56 С. (Інформація та документація).
17. ДСТУ 9332-2:2025 «Геоінформаційна система автомобільних доріг загального користування. Частина 2. Вимоги до збирання даних». Київ, 2025. 56 С. (Інформація та документація).
18. ДСТУ 9332-3:2025 «Геоінформаційна система автомобільних доріг загального користування. Частина 3. Вимоги до відображень». Київ, 2025. 56 С. (Інформація та документація).

References

1. Vozniuk A. B. Merezha dorih Ukrainy ta suchasni transportni potoky (Ukraine's Road Network and Modern Transport Flows). *Dorohy i mosty: Zbirnyk naukovykh prats*. Kyiv, 2014. Issue 14. P. 111–124 [in Ukrainian].
2. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy No. 1702 vid 18.12.2021 «Pro zatverdzhennia Poriadku formuvannia ta vykonannia haluzevoi prohramy i proektu informatyzatsii» (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1702 of 18.12.2021 «On approval of the Procedure for the formation and

implementation of the sectoral program and project of informatization). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1702-2001-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

3. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy No. 586 vid 27.04.2002 «Pro zatverdzhennia Prohramy stvorennia systemy informatsiinoho zabezpechennia na avtomobilnykh dorohakh zahalnoho korystuvannia na 2002-2010 roky» (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 586 of 27.04.2002 «On approval of the Program for the creation of an information support system on public roads for 2002-2010). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/586-2002-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

4. Vozniuk, Andrii. Use of the geographic information system of Ukrainian roads (GIS) to optimize road management in the lack of financial resource. October 2019. Conference: 26th World Road Congress At: Abu Dhabi, United Arab Emirates, PIARC [in Ukrainian].

5. Nakaz Derzhavnoi sluzhby avtomobilnykh dorih Ukrainy No. 268 vid 02.07.2002 «Pro vprovadzhennia elektronnoho pasporta avtomobilnykh dorih» (5. Order of the State Road Service of Ukraine No. 268 of 02.07.2002 «On the introduction of electronic passports for motor roads). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0268466-02#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

6. Nakaz Derzhavnoi sluzhby avtomobilnykh dorih Ukrainy No. 121 vid 05.04.2006 «Pro zabezpechennia funktsionuvannia ta rozvytku SUSP» (Order of the State Road Service of Ukraine No. 121 of 05.04.2006 «On ensuring the functioning and development of the SUSP»). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0121466-06#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

7. Nakaz Derzhavnoi sluzhby avtomobilnykh dorih Ukrainy No. 199 vid 08.05.2007 «Pro elektronni pasporty avtomobilnykh dorih ta avtomatychni lichylnyky transportnykh zasobiv» (Order of the State Road Service of Ukraine No. 199 of 08.05.2007 «On electronic passports of motor roads and automatic vehicle counters.») URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0199466-07#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

8. Nakaz Derzhavnoi sluzhby avtomobilnykh dorih Ukrainy No. 328 vid 06.07.2009 «Pro vvedennia v diiu rishennia kolehii vid 25.06.2009 № 48» (Order of the State Road Service of Ukraine No. 328 dated July 6, 2009, «On the implementation of the decision of the board dated June 25, 2009, No. 48»). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0328466-09#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

9. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy № 119 vid 02.02.2024 «Deiaki pytannia Natsionalnoi prohramy informatyzatsii» (Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 119 of 02.02.2024 «Some issues of the National Informatization Program.»). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/119-2024-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

10. Heodani pro dorohy derzhavnoho znachennia teper dostupni u vidkrytomu dostupi ta u zruchnomu formati (Geodata on roads of national importance is now available in open access and in a convenient format.). URL: <https://www.facebook.com/agency.for.restoration/posts/pfbid02odALAr2phAGASSvxi3mAZ8G6Uf6b6vUkLc3cpsZjPKBdhacYEdhQqC9E7FQ23dXl> (data zvernennia: 24.08.2025) [in Ukrainian].

11. Vozniuk A. B. Udoshkonalennia metodu prohnozuvannia avariino-nebezpechnykh dilianok na merezhi avtomobilnykh dorih : dys. kand. tekhn. nauk : 05.22.01 (Improvement of the method for predicting accident-prone sections on the road network : Cand. Tech. Sci. thesis : 05.22.01). Kyiv, 2021. 226 p. [in Ukrainian].

12. Vozniuk A. B., Dulia M. V. Praktychni aspekty pereviriannia ta analizuvannia naboriv heoprosorovykh danykh pro avtomobilni dorohy zahalnoho korystuvannia (Practical aspects of checking and analyzing geospatial data sets on public roads). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2025. Vyp. 31. P. 149–162. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2025.31.149> [in Ukrainian].

13. Dulia M.V. Hresko I.L. ta in. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «Uzahalnyty informatsiiu shchodo prostorovykh koordynat terytorialnykh avtomobilnykh dorih derzhavnoho znachennia ta dopovnyty bazu danykh heohrafichnykh koordynat z uviazkoiu yikh v yedynu merezhu dlia utochnennia protiazhnosti i kilometrovoi pryviazky» (Report on research work «Summarize information on the spatial coordinates of territorial public roads of national importance and supplement the database of geographic coordinates by linking them into a single network to clarify the length and kilometer reference»), Kyiv: DerzhdorNDI, 2023, 84 p. [in Ukrainian].

14. SOU 42.1-37641918-122:2014 Avtomobilni dorohy. Vymohy do kompleksu robot z informatsiinoho zabezpechennia (zi Zminoio No. 1) (SOU 42.1-37641918-122:2014 Motorways. Requirements for a set of works on information support (with Amendment No. 1)). Kyiv, 2014, 55 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

15. SOU 42.1-37641918-038:2016 Pasport avtomobilnoi dorohy (zi Zminoiu No. 1) (SOU 42.1-37641918-038:2016 Motorway passport (with Amendment No. 1)) Kyiv, 2016, 34 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

16. DSTU 9332-1:2025 «Heoinformatsiina systema avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia. Chastyna 1. Sklad, zmist ta vymohy do naboriv danykh» (DSTU 9332-1:2025 «Geographic information system for public motorways. Part 1. Composition, content, and requirements for data sets»). Kyiv, 2025. 56 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

17. DSTU 9332-2:2025 «Heoinformatsiina systema avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia. Chastyna 2. Vymohy do zbyrannia danykh» (DSTU 9332-2:2025 «Geographic information system for public roads. Part 2. Requirements for data collection»). Kyiv, 2025. 56 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

18. DSTU 9332-3:2025 «Heoinformatsiina systema avtomobilnykh dorih zahalnoho korystuvannia. Chastyna 3. Vymohy do vidobrazhen» (DSTU 9332-3:2025 «Geographic information system for public roads. Part 3. Requirements for displays»). Kyiv, 2025. 56 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

Bohdan Stasiuk¹, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0003-2504-6577>

Andrii Vozniuk¹, Ph.D., <https://orcid.org/0000-0002-7611-9652>

Mukola Hukov, Ph.D., <https://orcid.org/0009-0002-4241-1417>

Mykhailo Dulia¹, <https://orcid.org/0000-0002-1916-8642>

¹State Enterprise «National Institute for Development Infrastructure» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

MODERN HISTORY OF INFORMATION SUPPORT FOR THE ROAD TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE

Abstract

Introduction. This article aims to outline the main stages of creating an information support system for Ukraine's road infrastructure, with a view to further developing effective mechanisms for justifying and rationally planning road construction, reconstruction, repair, and maintenance works.

Problems. Without reliable information about the road network and its traffic congestion, it is impossible to adequately justify the allocation of funds for road maintenance and repair. The road network is constantly undergoing significant changes, both due to destruction caused by the full-scale invasion of the Russian Federation and natural degradation, as well as a result of changes in logistics routes, which necessitates the processing of dynamically changing information in order to make the most optimal decisions.

Purpose. Summarize information on the state of information support for the road industry covering the period 2000–2024. Also, the prospects for implementing an information support system for the industry and using it as information support for substantiating decisions on road maintenance and repair, and further development of the network. Systematic provision of information (data) on motorways, structures on them, road service facilities, transport flows, natural and man-made phenomena, which is necessary for planning and carrying out work, will ensure the most efficient use of existing financial resources.

Materials and methods. Methods of comprehensive and systematic analysis, abstract-logical, graphical, statistical.

Results. An analysis of the modern history of information support for Ukraine's road infrastructure, as well as regulatory and technical aspects of information support, was conducted.

Conclusions. At present, Ukraine's road sector is theoretically prepared for the large-scale implementation of an information support system and its use as information support for substantiating decisions on road maintenance and repair, as well as further development of the network. The delay is caused by the lack of necessary financial resources, which are currently concentrated on repelling the Russian Federation's military aggression.

Keywords: highway, regulatory document, spatial coordinates, linear reference, data, information, spatial data.

УДК 625.7/.8

Терещенко Т. А., канд. хім. наук, пров. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-7584-9031>Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»),
м. Київ, Україна

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОЄКТУВАННЯ ЗОН ВЗАЄМОДІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ У МЕЖАХ ЗОН ЗАБУДОВИ ЗГІДНО З ДОСВІДОМ КРАЇН ЄС

Анотація

Вступ. У вступі до статті висвітлено актуальність питань проєктування примикань / перехрещень автомобільних доріг та вулиць у межах зон забудови.

Проблематика. Тематика статті стосується переваг примикань / перехрещень в одному рівні з організацією руху по колу — ПРК (англ. *roundabout*, нім. *der Kreisverkehr*) порівняно з іншими типами примикань або перехрещень автомобільних доріг і вулиць у межах зон забудови, а також загальних питань проєктування і функціонування ПРК.

Мета. Метою статті є загальний аналіз досвіду країн ЄС щодо проєктування примикань/перехрещень автомобільних доріг і вулиць у межах зон забудови та виділення рішень, пріоритетних з точки зору безпеки користувачів доріг і ефективності функціонування таких примикань/перехрещень.

Результати. Виконано загальний порівняльний аналіз різних типів примикань / перехрещень автомобільних доріг і вулиць у межах зон забудови, охоплюючи ПРК, виділено загальновизнані переваги та основні вимоги до проєктування і особливості функціонування ПРК у межах зон забудови згідно з досвідом країн ЄС. Дотично розглянуто питання термінологічної сумісності понять у межах об'єкту аналізування.

Розглянуто прийняті підходи до визначення відповідності параметрів ПРК і траєкторії руху транспортних засобів, актуальні для проєктування ПРК і прокладання маршрутів руху окремих типів ТЗ (сідельних тягачів з напівпричепами великої довжини, автобусів, інших ТЗ з довгою базою) у межах зон забудови. Викладено приклад організування руху таких ТЗ на ПРК, що найбільш суттєво обмежують доступність мережі доріг у межах зон забудови для автоперевізників.

Висновки. Надано висновки щодо:

- реалізації, згідно з досвідом країн ЄС, сучасних рішень для примикань / перехрещень автомобільних доріг, вулиць у межах зон забудови через улаштування ПРК;
- переваг ПРК перед іншими типами примикань/перехрещень в одному рівні та доцільності удосконалення проєктування ПРК для підвищення доступності мережі доріг у межах зон забудови для автоперевізників;
- доцільності опрацювання, на національному рівні, розширених положень щодо ПРК у межах зон забудови.

Ключові слова: доступність для маневрування ТЗ, зона забудови, примикання/перехрещення автомобільних доріг / вулиць, примикання/перехрещення в одному рівні з організацією руху по колу, проєктування, функціонування.

Вступ

Зони взаємодії транспортних потоків спричиняють утворення значної кількості потенційних точок конфлікту для користувачів доріг — попри те, що такі зони становлять малу частку в мережі автомобільних доріг, вони є місцями концентрації значної частини ДТП [1]. Проєктуванню і влаштуванню зон взаємодії транспортних потоків у межах зон забудови приділяють особливу увагу.

Аналогічно до запропонованих раніше рівнів стратифікації систем перерозподілення транспортних потоків [2], зони взаємодії транспортних потоків автомобільних доріг і вулиць, що примикають чи перехрещуються, можуть бути реалізовані в одному рівні або влаштовані з розділенням

транспортних потоків за рівнями (переважно з частковим розділенням), через транспортні розв'язки (*interchanges*) [2 – 4]. Сучасним рішенням, економічно вигідним та здатним забезпечувати безпеку і комфорт усіх учасників дорожнього руху у межах зон забудови, є влаштування примикань / перехрещень автомобільних доріг (вулиць) в одному рівні з організацією руху по колу — ПРК (англ. *roundabout*, нім. *der Kreisverkehr*).

ПРК можуть бути визначені як примикання/перехрещення автомобільних доріг в одному рівні з кільцевою проїзною частиною, з забезпеченням циркуляції транспортного потоку навколо центрального острівця за напрямком проти годинникової стрілки¹ і з наданням переваги в русі ТЗ на кільцевій проїзній частині. Головним чинником організування руху є геометрія елементів ПРК. Згідно з даними [5] переваги ПРК як зони взаємодії транспортних потоків полягають у зменшенні кількості потенційних точок конфлікту (*conflict points*).

Ураховуючи актуальність питань розвитку транспортної інфраструктури і підвищення безпеки користувачів автомобільних доріг, у запропонованій статті на підставі даних першоджерел та в розширення тематики [2] проаналізовано досвід країн ЄС стосовно реалізації зон взаємодії транспортних потоків автомобільних доріг і вулиць у межах зон забудови і викладено основні питання, опрацювання яких сприятиме розширеному охопленню положень регуляторних актів ЄС і світового досвіду дорожнього будівництва за даним напрямком на національному рівні.

Порівняльний аналіз різних типів примикань / перехрещень автомобільних доріг, вулиць у межах зон забудови

Зони взаємодії транспортних потоків у межах зон забудови — на під'їздах до населених пунктів, у межах населених пунктів, особливо у великих містах — переважно становлять проблему розвитку інфраструктури, оскільки забудова, місцями щільна, уможливило лише екстенсивний розвиток мережі доріг. Примикання/перехрещення доріг і вулиць не тільки є місцями концентрації значної частини ДТП, але й спричиняють затримку транспортних потоків і суттєві економічні збитки (наприклад у США у 2019 році збитки склали 190 білйонів доларів [6]), а також призводять до підвищення витрат палива.

Вирішення відповідних проблем полягає у пошуку ефективних проектних і технічних рішень для зон взаємодії транспортних потоків: визнанням ефективним рішенням є влаштування ПРК, функціонування яких не тільки підвищує безпеку доріг і надає можливість підвищити пропускну здатність примикань/перехрещень в одному рівні, але й пов'язане зі зменшенням витрат палива і меншими, ніж для інших типів примикань/перехрещень, експлуатаційними витратами [6]. Поряд з цим у [7] визначено зниження шуму дорожнього руху на ПРК, що є надзвичайно актуальним для населених пунктів.

Згідно з [3] зони взаємодії транспортних потоків² у межах зон забудови реалізують переважно через примикання та перехрещення доріг і вулиць, де рух регулюють з застосуванням дорожніх знаків, разом з дорожньою розміткою, чи сигналів, або через елементи ПРК. Певний виняток становлять під'їзні дороги з переважно односмуговою проїзною частиною, які забезпечують прямий доступ до будівель, промислових об'єктів, резиденцій тощо.

На підставі [3] виділено такі категорії ПРК у межах зон забудови:

- міні – ПРК;
- малі ПРК;
- малі ПРК з елементами двосмугової кільцевої проїзної частини;
- великі ПРК із застосуванням сигналів.

У **табл. 1** наведено рекомендації щодо вибору типу примикань / перехрещень у межах зон забудови згідно з [3].

¹ Визначення наведено для правостороннього руху.

² У [3] вжито термін «*der Knotenpunkte*» (нім.) - вузлова точка, тому коректно буде також застосовувати визначення «вузол транспортних потоків». Поняття «*Knotenpunkte*» охоплює примикання/перехрещення, інші ніж ПРК (*Einmündungen/Kreuzungen*, Pl. нім.), ПРК (*Kreisverkehr*, m, нім.) та рішення з частковим розділенням транспортних потоків за рівнями (*Teilplanfreie Lösung*, f, нім.). Якщо звернутися до змісту [4], цим термінам, у межах класифікації об'єктів регламентування, будуть відповідати англомовні «*intersection*», «*junction*», «*roundabout*» та «*interchange*».

Таблиця 1

Рекомендації щодо вибору типу примикань / перехрещень за різних умов функціонування [3]

	Примикання / перехрещення інші, ніж ПРК			ПРК			Часткове розділення транспортних потоків за рівнями
	функціонують за правилом надання переваги в русі ТЗ, що рухаються праворуч	організування руху через застосування дорожніх знаків	організування руху через застосування дорожніх сигналів	міні - ПРК	малі ПРК	великі ПРК з застосуванням сигналів	
Примикання / перехрещення під'їзних доріг:							
одної категорії	++	+	-	++	++	-	-
різних категорій	+	++	+	++	++	-	-
Сполучення під'їзних доріг з іншими дорогами:							
з головною магістральною дорогою / вулицею з двома смугами наскрізного руху	-	++	++	+	++	-	-
з головною магістральною дорогою / вулицею з чотирма або більше смугами наскрізного руху	-	+	++	-	-	-	-
Примикання / перехрещення магістральних доріг / вулиць:							
головної магістральної дороги / вулиці з двома смугами наскрізного руху з головною магістральною дорогою / вулицею з двома смугами наскрізного руху	-	+	++	+	++	-	-
головної магістральної дороги / вулиці з двома смугами наскрізного руху з головною магістральною дорогою / вулицею з чотирма смугами наскрізного руху	-	-	++	-	+	++	+
головної магістральної дороги / вулиці з чотирма смугами наскрізного руху з головною магістральною дорогою / вулицею з чотирма смугами наскрізного руху	-	-	++	-	-	++	+
головної магістральної дороги із заїздами / виїздами міської магістралі	-	-	++	-	++	++	+
++ застосовні; + обмежено застосовні; - незастосовні.							

Згідно з даними **табл. 1** для всіх варіантів примикань / перехрещень доріг, вулиць у межах зон забудови є прийнятними ПРК певної категорії — за функціональністю ПРК незначно поступаються «традиційним» примиканням / перехрещенням з організуванням руху через застосування сигналів. У Настанові [3] наведено такі загальні рекомендації щодо влаштування ПРК. На під'їздах до населених

пунктів, коли параметри дороги змінюються — з прокладеної на відкритій місцевості на прокладену в зоні забудови — улаштовують, переважно як альтернативу транспортним розв'язкам, великі ПРК з застосуванням сигналів. Міні — ПРК на під'їздах до населених пунктів не влаштовують, також не влаштовують міні — ПРК, якщо немає можливості забезпечити чітке розрізнення ПРК як елемента дороги (міні — ПРК).

ПРК, у порівнянні з іншими формами примикань/перехрещень, здатні створювати максимальну безпеку учасників дорожнього руху. Згідно з [1] основними чинниками безпеки ПРК є зменшення кількості потенційних точок конфлікту, зниження швидкості руху і зменшення потенційного кута удару (*impact angle* — тжж. кут зустрічі) у разі зіткнення ТЗ. Порівняльні схеми утворення потенційних точок конфлікту на найбільш поширених типах примикань/перехрещень в одному рівні, охоплюючи ПРК, наведено на **рис. 1**.

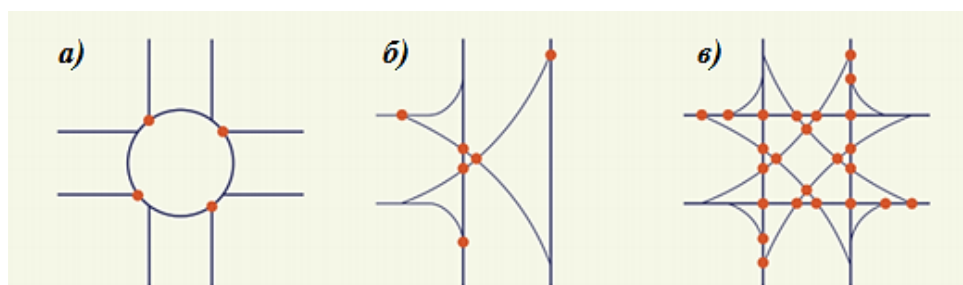


Рисунок 1 — Схеми потенційних точок конфлікту для різних типів примикань / перехрещень в одному рівні згідно з [1]

Кількість потенційних точок конфлікту на ПРК з однією смугою руху на кільцевій проїзній частині з чотирма відгалуженнями (**рис. 1 а**) є меншою, ніж на Т — подібному примиканні (**рис. 1 б**) і суттєво меншою, ніж на перехрещенні «традиційного» типу з чотирма відгалуженнями (**рис. 1 в**), де кількість таких точок сягає 24. Наведені на **рис. 1** схеми не охоплюють прилеглі ділянки з пішохідними переходами, також методології визначання потенційних точок конфлікту можуть різнитися в різних роботах, проте всі автори виділяють переваги ПРК у порівнянні з «традиційними» примиканнями / перехрещеннями — відповідно здійснення реконструкції із заміною «традиційного» примикання/перехрещення доріг з улаштуванням ПРК з однією кільцевою смугою руху дозволяє знизити кількість ДТП на значення орієнтовно до 78 %.

Кількість потенційних точок конфлікту на ПРК з кількома смугами руху на кільцевій проїзній частині є дещо більшою, також більшими є швидкість руху ТЗ на кільцевій проїзній частині і кути зустрічі у разі зіткнення ТЗ. Поряд з цим, згідно з даними [8], правила руху на таких ПРК дещо різняться на території різних країн ЄС. Автори [9] виділяють тип «турбо — ПРК», який можна розглядати як ПРК з кількома смугами руху на кільцевій проїзній частині, що розділено механічними засобами, або, згідно з визначенням [8], де унеможливають зміну смуг руху на кільцевій проїзній частині і перетинання траєкторії руху ТЗ на виїзді з ПРК, що забезпечує суттєве зменшення кількості потенційних точок конфлікту. У разі здійснення реконструкції «традиційного» примикання / перехрещення з улаштуванням турбо — ПРК досягається аналогічний до влаштування ПРК з однією кільцевою смугою руху ефект зниження кількості ДТП. У Німеччині, згідно з [8], турбо — ПРК улаштовують переважно на під'їздах до зон забудови.

За результатами виконаних німецькими колегами порівняльних досліджень стосовно безпеки зон взаємодії транспортних потоків визначено, що кількість ДТП на ПРК є приблизно вдвічі меншою, а кількість ДТП з тяжкими наслідками — приблизно втричі меншою, ніж у разі організування руху через застосування сигналів — на примиканнях / перехрещеннях, інших ніж ПРК; відрізняється також структура чинників та умов ДТП на ПРК — більшість ДТП на ПРК відбувається у темну пору доби, на відміну від екстремальної кількості ДТП під час виконання поворотів у другому випадку [5].

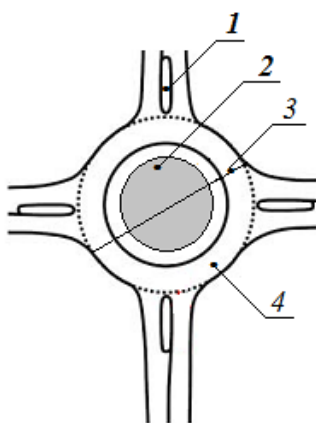
Особливості проєктування ПРК і функціонування ПРК у межах зон забудови на підставі досвіду країн ЄС

Нижче стисло проаналізовано загальні особливості проєктування і функціонування різних категорій ПРК у межах зон забудови на підставі даних [3].

Засадами забезпечення ефективного функціонування ПРК у межах зон забудови є:

- чітко визначувана траєкторія руху навколо центрального острівця для ТЗ, що рухаються в напрямку на в'їзд ПРК;
- одна смуга руху на виїзді з ПРК;
- забезпечення прямих або наближених до прямих кутів шляхом зцентрування осевих ліній доріг на відгалуженнях на підходах до ПРК із центром ПРК.

Головні елементи ПРК на підставі даних [3] наведено на **рис. 2**.



- 1 — розділювальний острівець;
2 — центральний острівець;
3 — зовнішній діаметр;
4 — кільцева проїзна частина.

Рисунок 2 — Схематичне зображення головних елементів ПРК на підставі [3]

Значення зовнішнього діаметра³ ПРК (**рис. 2, поз. 3**) приймають в інтервалі (13 – 22) м для міні — ПРК, (26 – 40) м для малих ПРК та (40 – 60) м для ПРК з елементами двосмугової проїзної частини. Зовнішній діаметр великих ПРК із застосуванням сигналів повинен становити не менше ніж 50 м. Для малих ПРК, улаштованих із непроїжджим центральним острівцем, зовнішній діаметр не повинен перевищувати 26 м.

Кільцеву проїзну частину ПРК (**рис. 2, поз. 4**) улаштовують переважно круглої форми (кільцева проїзна частина, — оскільки центральний острівець елементом проїзної частини не є [3]), проте проїзна частина може бути влаштована у вигляді двох півкіл однакового діаметра, сполучених прямолінійними сегментами за довжини такого сегмента більшої, ніж радіус півкола. Для великих ПРК рекомендованою є кругла форма кільцевої проїзної частини з метою дотримання її сталої ширини.

Основним елементом проєктування ПРК та функціонування ПРК є центральний острівець (**рис. 2, поз. 2**). Центральний острівець повинен створювати таку зміну траєкторії руху ТЗ, щоб забезпечувати мінімальну швидкість руху — радіус кривої руху ТЗ на кільцевій проїзній частині вздовж центрального острівця, охоплюючи, за потреби, проїзд ТЗ через перон вантажного автомобіля, повинен становити дві ширини відповідної смуги руху на в'їзді на відгалуженні ПРК. Міні — ПРК вказаного вище зовнішнього діаметра улаштовують з проїжджим центральним острівцем; конструкція центрального острівця має бути такою, щоб суттєво ускладнювати (за рідкими винятками) проїзд по ньому легкових автомобілів, та уможливлувати проїзд вантажних автомобілів та автобусів на малій швидкості; центральний острівець відділяють від кільцевої проїзної частини бордюром заввишки над

³ Зовнішній діаметр ПРК згідно з [3] та діаметр вписаного кола згідно з [11] доцільно розглядати як величини, що описують один параметр ПРК, оскільки в обох випадках ці значення вимірюють на відтинку між зовнішніми крайками кільцевої проїзної частини, а також ці діаметри вписано в контур для нанесення дорожньої розмітки на в'їзді на ПРК.

поверхнею проїзної частини (4 – 5) см. Центральний острівця міні — ПРК повинен забезпечувати чітке розрізнення ПРК як елемента дороги [3].

Елементом малих ПРК, охоплюючи ПРК з двосмуговою кільцевою проїзною частиною, є розділювальні острівці (**рис. 2, поз. 1**); за потреби розділювальні острівці влаштовують також на відгалуженнях на міні — ПРК. Параметри розділювальних острівців водночас із параметрами центрального острівця повинні забезпечувати потрібне вигинання траєкторії руху ТЗ на кільцевій проїзній частині. У межах зон забудови розділювальні острівці на всіх відгалуженнях ПРК мають бути споряджені елементами організування пішохідного руху і повинні мати відповідні параметри; розділювальні острівці можна не влаштовувати на відгалуженні з другорядною дорогою, або за малої ширини проїзної частини дороги на відгалуженні чи за низької інтенсивності руху на ній.

Перепускальну здатність ПРК може бути підвищено через улаштування правоповоротних об'їздів для перепуску ТЗ, що рухаються в об'їзд ПРК; об'їзди мають бути фізично відділені від смуг руху ПРК.

Стосовно перепускальної здатності великих ПРК із застосуванням сигналів у [3] вказано, що важливим чинником є алгоритм програмування роботи сигналів. Рух пішоходів, велосипедистів в зоні великих ПРК організують з улаштуванням доріжок (тротуарів) навколо зовнішнього периметра ПРК; якщо місцеві умови є стислими, розглядають альтернативне влаштування транспортної розв'язки — з частковим розділенням потоків за рівнями — або передбачають рух пішоходів, велосипедистів через центральний острівця — у цій частині ПРК згідно з [3] (Німеччина) принципово відрізняються від визначених положеннями [11] (США), де примикання/перехрещення в одному рівні кільцевого типу з доступом пішоходів, велосипедистів до центрального острівця як ПРК не класифікують.

Також, згідно з [3], всі типи примикань / перехрещень, охоплюючи ПРК, мають забезпечувати проїзд у всіх напрямках ТЗ, рух яких в даній локації не можна виключати, за потреби — проїзд із застосуванням зустрічної смуги руху; ПРК також повинні витримувати навантаження від проїзду, за низької швидкості руху, військової техніки.

Підходи до визначення відповідності параметрів ПРК і траєкторії руху ТЗ

Окремим питанням є дослідження відповідності параметрів ПРК вимогам щодо маневрування ТЗ, яке виконують як на початковому етапі проектування ПРК, так і під час прокладання маршрутів руху певних ТЗ, із застосуванням шаблонів трактрис (*die Schleppkurve*, нім.) сидельних тягачів з причепами, напівпричепами, автобусів, охоплюючи автобуси з шарнірно-зчленованою базою, та інших ТЗ, або за результатами натурних досліджень, та методів комп'ютерного моделювання *CAD (computer-assisted drifting)* [10, 12].

У процесі таких досліджень ураховують відповідні вимоги, установлені на регіональному / національному рівні. Так, у ЄС згідно з Директивою [13], разом зі Зміною [14], визначено, що будь-який ТЗ (або комбінація ТЗ) під час руху повинен виконувати поворот у межах кола зі значеннями внутрішнього та зовнішнього радіусів 5,3 м та 12,5 м відповідно; також додатково установлено, що жодна частина ТЗ під час виїзду з прямої траєкторії на кільце зазначених розмірів не повинна виходити за межі вертикальної площини більше ніж на 0,6 м; це значення, на регіональному рівні, нормовано для автобусів. Таку площину (за умови, що ТЗ не перебуває в русі) визначають як вертикальну площину, проведену тангенціально (дотично) боку ТЗ на зовнішньому контурі кільця та позначену лінією на перетині з горизонтальною поверхнею (на землі). Для шарнірно-зчленованих ТЗ співвіднесення з вертикальною площиною виконують для двох частин ТЗ.

Автори [12] (Німеччина), на етапі упровадження нових вимог щодо параметрів ТЗ, досліджували відповідність параметрів ПРК у межах зон забудови вимогам щодо маневрування сидельного тягача з напівприцепом Kögel лінійки Big Maxx — більшої, ніж це було нормовано раніше, довжини (за загальної довжини ТЗ 17,8 м) шляхом моделювання, зокрема, траєкторії повороту (**рис. 3**).

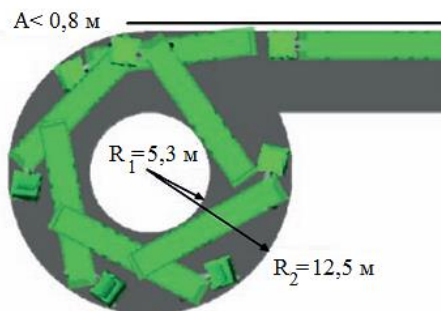
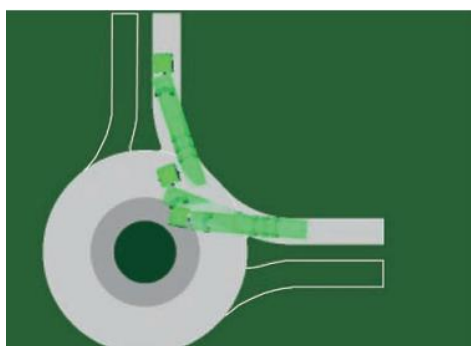


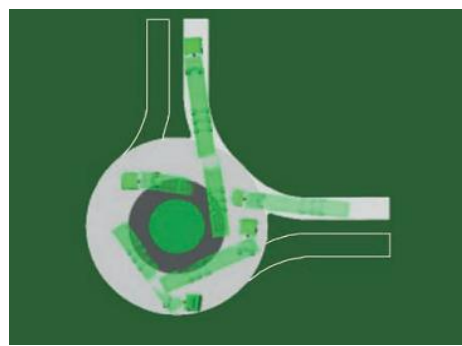
Рисунок 3 — Моделювання траєкторії повороту сідельного тягача з напівпричепом [12]

Було підтверджено дотримання установлених на національному рівні, на час виконання досліджень, вимог щодо виходу за межі вертикальної площини (згідно з [3] — нім. *das Ausschermaß*, розмір бічного заносу), обмеженого максимальним значенням 0,8 м (**рис. 3**, значення «А»).

Поряд з цим було досліджено придатність малих ПРК із зовнішнім діаметром 26 м для виконання маневрів зазначеного ТЗ (**рис. 4**), оскільки саме малі ПРК зазначеного діаметра, які влаштовують з непроїжджим центральним острівцем, потенційно є перешкодою руху ТЗ з великими розмірами (довжиною).



а)



б)

Рисунок 4 — Моделювання проїзду сідельного тягача з напівпричепом за загальної довжини ТЗ 17,8 м на малій ПРК із зовнішнім діаметром 26 м згідно з [12]

За результатами моделювання виконання правого повороту, яке в роботі [12] описано як проїзд $\frac{1}{4}$ частини ПРК, у даному випадку неможливе без виїзду за межі проїзної частини ПРК (**рис. 4 а**); поряд із цим проїзд з виконанням виключно лівоповоротних маневрів (або проїзд $\frac{5}{4}$ ПРК, (**рис. 4 б**)) забезпечує відповідність траєкторії руху досліджуваного ТЗ параметрам ПРК. Як підкреслюють автори, шляхом моделювання було підтверджено можливість, за умови дотримання певного порядку, проїзду досліджуваного ТЗ на малих ПРК.

Автори [12] досліджували також відповідність параметрів і траєкторії руху інших ТЗ з довгою базою (автопоїзд, автовоз загальної довжини ТЗ 20,00 м та 20,75 м відповідно) параметрам примикань / перехресть в одному рівні інших (ніж ПРК) типів. Попри те, що в цілому доступність національної дорожньої інфраструктури у межах зон забудови для застосування автоперевізниками було визначено як обмежену, де найбільші обмеження спричинено геометричними параметрами малих ПРК і проїзд певних типів ТЗ можливий лише у вузькому «коридорі», навіть незначні відхилення від якого можуть мати негативні наслідки, моделювання руху ТЗ може забезпечити пошук рішень для окремих маршрутів.

Висновки

Згідно з досвідом країн ЄС сучасним рішенням для автотранспортної мережі у межах зон забудови є реалізація примикань / перехресть в одному рівні з організацією руху по колу — ПРК (англ. *roundabout*), які за функціональністю не поступаються «традиційним» примиканням / перехрещенням в одному рівні з організуванням руху через застосування сигналів та в певних випадках можуть слугувати економічно вигідною альтернативою транспортним розв'язкам, з розділенням (частковим розділенням) транспортних потоків за рівнями.

Дослідження, виконані колегами в регіонах, де влаштування ПРК у межах зон забудови є усталеною практикою, вказують на зменшення кількості потенційних точок конфлікту і зниження кількості ДТП з тяжкими наслідками у порівнянні з примиканнями/перехрещеннями в одному рівні інших типів. Водночас дослідження на рівні країн ЄС вказують на можливу потребу в удосконаленні підходів до проектування ПРК, які в певних випадках обмежують доступність мережі автомобільних доріг у межах зон забудови для автоперевізників.

Доцільно, на національному рівні, з урахуванням положень регуляторних актів країн ЄС і світового досвіду в галузі дорожнього будівництва, опрацювати розширені положення стосовно ПРК як елемента автомобільної дороги з виокремленням загальних вимог щодо проектування і влаштування ПРК у межах зон забудови.

Список літератури

1. Roundabouts and other intersections. SWOV fact sheet, June 2022 SWOV Institute for Road Safety Research, The Hague. 22 p. URL: https://swov.nl/sites/default/files/bestanden/downloads/FS%20Roundabouts%20and%20other%20intersections_3.pdf (дата звернення: 18.06.2025).
2. Терещенко Т. А. Системи перерозподілення транспортних потоків. Транспортні розв'язки. Застосовувані терміни. *Дороги і мости*. Київ, 2024. Вип. 30. С. 398–406. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.398>.
3. Directives for the design of urban roads. English Version of «Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen», RAST 06, Edition 2006, Translation 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln. 131 p. URL: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/200_E_PDF.v.pdf (дата звернення 16.06.2025).
4. EUROPEAN AGREEMENT ON MAIN INTERNATIONAL TRAFFIC ARTERIES (AGR) Consolidated version ECE/TRANS/SC.1/384 14 March 2008. 57 p. URL: <https://unece.org/DAM/trans/conventn/ECE-TRANS-SC1-384e.pdf> (дата звернення 28.07.2023).
5. Spahn, V. Ist der Kreisverkehr sicherer als die Lichtsignalanlage? Vortrag zum Deutschen Straßen- und Verkehrskongress 2008 (FGSV 001/22), FGSV, Köln, 12 p. URL: https://verlag.fgsv-datenbanken.de/media/upload/tagungsbaende/FGSV_001_22/FGSV_001_22-7.pdf (дата звернення 20.06.2025).
6. Taglieri, D., Liu, H., Gayah, V. Network-Wide Implementation of Roundabouts Versus Signalized Intersections on Urban Streets: Analytical and Simulation Comparison. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2024, Vol. 2678(5), P. 719–735. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/03611981231192093> (дата звернення 18.06.2025).
7. Wirkung von Maßnahmen zur Umweltentlastung, Teil 2: Kreisverkehre, Ausgabe 2015. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 210/2. 7 p. URL: http://www.trc-transportation.com/cms/images/dokumente/FGSV_210_2_Kreisverkehre.pdf (дата звернення 20.06.2025)⁴.
8. Wachsmann, J., Riel, J. Internationale Verkehrsregelungen an zweistreifigen Kreisverkehren und deren Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit. HEUREKA 2021, 18 p. URL: https://verlag.fgsv-datenbanken.de/media/upload/tagungsbaende/FGSV_002_127/FGSV_002_127-51.pdf (дата звернення 20.06.2025).

⁴ Згідно з наведеною у першоджерелі інформацією [7] складено як одну з частин збірника; інформацію щодо завершення розроблення збірника в цілому не наведено.

9. Petru, J., Krivda, V. An Analysis of Turbo Roundabouts from the Perspective of Sustainability of Road Transportation. *Sustainability*. 2021, 13, 2119. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2119> (дата звернення 17.06.2025).
10. Robinson, B. V., Rodegerdst, L., Scarborough, W., Kittelson, W., Troutbeck, R., Brilon, V., et. al. Roundabouts: an informational guide. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No FHWA-RD-00-067. 2006. 284 p. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/00067/00067.pdf> (дата звернення 30.05.2025).
11. Hedges, C. J., Dekelbab, W., Hanna, A. N., Griswold, E., Barnes, N., DiAngelis, H. Guide for roundabouts. NCHRP research Report 1043. Transportation research Board, 2023. 426 p. URL: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/27069/guide-for-roundabouts> (дата звернення: 29.05.2025).
12. Friedrich, B., Hoffmann, S., Axer, S., Niemeier, W., Tengen, D., Adams, S., u.a. Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunkte mit Fahrzeugen des Schwerverkehrs. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Verkehrstechnik Heft V. 245, 2014. 117 p. URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/799/file/V245ELBA_Bericht_barrierefrei.pdf (дата звернення 20.06.2025).
13. COUNCIL DIRECTIVE 96/5 3/EC of 25 July 1996 Laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0053> (дата звернення 25.06.2025).
14. DIRECTIVE 2002/7/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 February 2002 Amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0007> (дата звернення 25.06.2025).

References

1. Roundabouts and other intersections. SWOV fact sheet, June 2022 SWOV Institute for Road Safety Research, The Hague. 22 p. URL: https://swov.nl/sites/default/files/bestanden/downloads/FS%20Roundabouts%20and%20other%20intersections_3.pdf (Last accessed: 18.06.2025) [in English]
2. Tatyana Tereshchenko. Interchange systems. Interchanges. Used terminology. *Dorogi i mosti* [Roads and bridges]. Kyiv, 2024. Issue 30. P. 398–406. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2024.30.398> [in Ukrainian].
3. Directives for the design of urban roads. English Version of «Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen», RASt 06, Edition 2006, Translation 2012. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln. 131 p. URL: https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/200_E_PDF.v.pdf (Last accessed: 16.06.2025) [in English].
4. EUROPEAN AGREEMENT ON MAIN INTERNATIONAL TRAFFIC ARTERIES (AGR) Consolidated version ECE/TRANS/SC.1/384 14 March 2008. 57 p. URL: <https://unece.org/DAM/trans/conventn/ECE-TRANS-SC1-384e.pdf> (Last accessed: 28.07.2023) [in English].
5. Spahn, V. Ist der Kreisverkehr sicherer als die Lichtsignalanlage? Vortrag zum Deutschen Straßen- und Verkehrskongress 2008 (FGSV 001/22), FGSV, Köln, 12 p. URL: https://verlag.fgsv-datenbanken.de/media/upload/tagungsbaende/FGSV_001_22/FGSV_001_22-7.pdf (Datum des letzten Besuchs: 20.06.2025) [auf Deutsch].
6. Taglieri, D., Liu, H., Gayah, V. Network-Wide Implementation of Roundabouts Versus Signalized Intersections on Urban Streets: Analytical and Simulation Comparison. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2024, Vol. 2678(5), P. 719–735. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/03611981231192093> (Last accessed: 18.06.2025) [in English].

7. Wirkung von Maßnahmen zur Umweltentlastung, Teil 2: Kreisverkehre, Ausgabe 2015. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 210/2. 7 p. URL: http://www.trc-transportation.com/cms/images/dokumente/FGSV_210_2_Kreisverkehre.pdf (Datum des letzten Besuchs: 20.06.2025)⁵ [auf Deutsch].
8. Wachsmann, J., Riel, J. Internationale Verkehrsregelungen an zweistreifigen Kreisverkehren und deren Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit. HEUREKA 2021, 18 S. URL: https://verlag.fgsv-datenbanken.de/media/upload/tagungsbaende/FGSV_002_127/FGSV_002_127-51.pdf (Datum des letzten Besuchs: 20.06.2025) [auf Deutsch].
9. Petru, J., Krivda, V. An Analysis of Turbo Roundabouts from the Perspective of Sustainability of Road Transportation. *Sustainability*. 2021, 13, 2119. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2119> (Last accessed: 17.06.2025) [in English].
10. Robinson, B. V., Rodegerdts, L., Scarborough, W., Kittelson, W., Troutbeck, R., Brilon, V., et. al. Roundabouts: an informational guide. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No FHWA-RD-00-067. 2006. 284 p. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/00067/00067.pdf> (Last accessed: 30.05.2025) [in English].
11. Hedges, C.J., Dekelbab, W., Hanna, A.N., Griswold, E., Barnes, N., DiAngelis, H. Guide for roundabouts. NCHRP research Report 1043. Transportation research Board, 2023. 426 p. URL: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/27069/guide-for-roundabouts> (Last accessed: 29.05.2025) [in English].
12. Friedrich, B., Hoffmann, S., Axer, S., Niemeier, W., Tengen, D., Adams, S., u.a. Überprüfung der Befahrbarkeit innerörtlicher Knotenpunkte mit Fahrzeugen des Schwerverkehrs. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Verkehrstechnik Heft V. 245, 2014. 117 p. URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/opus45-bast/frontdoor/deliver/index/docId/799/file/V245_ELBA_Bericht_barrierefrei.pdf (Datum des letzten Besuchs: 20.06.2025) [auf Deutsch].
13. COUNCIL DIRECTIVE 96/53/EC of 25 July 1996 Laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0053> (Last accessed: 25.06.2025) [in English].
14. DIRECTIVE 2002/7/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 February 2002 Amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0007> (Last accessed: 25.06.2025) [in English].

Tatyana Tereshchenko, Ph.D., Senior Research Officer, <https://orcid.org/0000-0001-7584-9031>

State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

CONTEMPORARY APPROACHES TO THE DESIGN OF TRAFFIC FLOW INTERACTION ZONES WITHIN BUILT-UP AREAS IN ACCORDANCE WITH THE PRACTICE OF EU COUNTRIES

Introduction. The introduction to the paper highlights the actuality of the issues of the design of roads/streets junctions within built-up areas.

Problem statement. The topic of the paper concerns the advantages, as well as general issues of design and performance of at-grade junctions including roundabouts — PRC (German: der Kreisverkehr) compared to other types of roads and streets junctions within built-up areas.

⁵ Згідно з наведеною у першоджерелі інформацією [7] складено як одну з частин збірника; інформацію щодо завершення розроблення збірника в цілому в першоджерелі не наведено.

The topic of the paper concerns the advantages of PRC (English: roundabout, German: der Kreisverkehr) compared to other types of roads / streets junctions within built-up areas, as well as general issues of the design and operation of PRC.

Purpose. The purpose of the paper is a general analysis of the experience of EU countries in design of roads / streets junctions within built-up areas and highlighting solutions that are priority in terms of road user safety and the operational efficiency of such junctions.

Results. A general comparative analysis of various types of roads/streets junctions within built-up areas, including the PRC, has been carried out and the recognized advantages and basic requirements for the design and features of the PRC's operation within built-up areas according to the experience of EU countries have been highlighted. The issue of compatibility of terms definition within the scope of the analysis was briefly reviewed.

The approaches accepted to determine the appropriateness of PRC parameters for vehicle swept paths relevant for the design of PRCs and the laying of routes for individual types of vehicles (tractor trucks with long-length semi-trailers, car carriers, other vehicles with a long base) within built-up areas have been considered. An example of organizing the route of such vehicles movement through PRCs that most significantly limit the accessibility of the road network within built-up areas for carriage vehicles has been presented.

Conclusions. Conclusions are provided on:

- realization, according to the experience of EU countries, of contemporary solutions for roads/streets junctions within built-up areas through the construction of PRC;
- advantages of PRC over other types of level junctions and the advisability of the PRC design evolution to increase the accessibility of the road network within built-up zones for carriage vehicles;
- advisability of developing, at the national level, adjusted regulations regarding roundabouts design and performance within built-up areas.

Keywords: built-up area, design, maneuverability with vehicles, motor roads / streets junctions, roundabout, performance.

УДК 504:625.7

Рутковська І. А.¹, канд. техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>Ярошук О. С.², <https://orcid.org/0000-0003-1550-0131>¹Національний транспортний університет (НТУ), м. Київ, Україна²Державне підприємство «Національний інститут розвитку інфраструктури» (ДП «НІРІ»), м. Київ, Україна

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ВПРОДОВЖ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ АВТОМОБІЛЬНОЇ ДОРОГИ

Анотація

Вступ. Мережа автомобільних доріг є ключовою складовою інфраструктури, яка надає багато можливостей та зручностей, дозволяє долати великі відстані для постачання товарів, перевезення людей. Від безперебійного пересування транспорту автомобільними дорогами залежить комфорт і добробут населення в різних місцях і віддалених куточках країни. Нажаль з плином часу та різних зовнішніх факторів конструкції автомобільних доріг зазнають руйнувань і потребують відновлення для збільшення тривалості їх терміну експлуатації.

Проблематика. Поряд із численними перевагами функціонування та розвиток мережі автомобільних доріг супроводжується негативним впливом на довкілля на всіх етапах життєвого циклу. З часом відбувається вплив кліматичних умов та зростаюче навантаження на конструкції автомобільних доріг, в результаті чого дорожній покрив зношується, руйнується і потребує ремонтування під час експлуатаційного утримування. Для проведення дорожніх робіт під час капітального ремонтування або реконструювання необхідно залучати багато техніки та великі об'єми матеріалів.

Мета. Виникає необхідність у пошуку нових наукових підходів та методів досліджень в напрямку мінімізації використання природних ресурсів, впливу на довкілля, який відбувається впродовж життєвого циклу автомобільної дороги.

Матеріали та методи. У статті запропоновано застосування методу системного аналізу. Цей метод допомагає комплексно оцінити стан існуючої автомобільної дороги, визначити оптимальні технології ремонту, забезпечити ефективне використання ресурсів, мінімізуючи економічні витрати, а також вплив на довкілля.

Результати. Узагальнені і систематизовані кілька відомих та нових методів системного аналізу в сучасних умовах та наведена перспектива їх комплексного використання в процесі дослідження життєвого циклу автомобільної дороги.

Висновки. Запропонований системний підхід дозволить виконувати оброблення великого обсягу даних, враховувати взаємозв'язані параметри і комплексно розглядати різні варіанти влаштування конструкцій автомобільних доріг, виконувати дорожні роботи з мінімальними витратами та впливом на довкілля.

Ключові слова: автомобільна дорога, будівельні матеріали, вплив на довкілля, дорожні роботи, життєвий цикл автомобільної дороги, забруднення атмосферного повітря, конструкція дорожнього одягу, системний аналіз.

Вступ

Методи системного аналізу надають можливість кількісного порівняння варіантів досліджуваних систем з врахуванням технічних, економічних та екологічних чинників [1].

Основні етапи системного аналізу:

- встановлення чітких цілей та завдань, які потрібно досягти в процесі аналізу;
- створення математичних або концептуальних моделей, що описують структуру та функціонування системи;
- збір необхідної інформації про систему та її компоненти;

- обробка та аналіз зібраних даних для виявлення закономірностей та взаємозв'язків;
- розгляд різних варіантів вирішення проблеми та їх оцінка з точки зору ефективності та ризиків;

- вибір найкращого варіанту вирішення проблеми на основі проведення аналізу;
- реалізація обраного рішення та моніторинг його виконання.

Життєвий цикл конструкції автомобільної дороги охоплює найважливіші етапи: планування, проектування, будування, експлуатування, капітальне ремонтування або реконструювання та ліквідування. На всіх етапах життєвого циклу автомобільної дороги відбуваються впливи на довкілля. Однак на кожному з етапів можливо передбачити заходи зменшення цих впливів.

Вплив на довкілля відбувається ще на етапі виробництва та видобування будівельних матеріалів. Під час планувальних і проєктувальних робіт фахівці замислюються звідки і яким чином буде виконуватись транспортування матеріалів на ділянку будування. Під час перевезення матеріалів на ділянку будування відбуваються викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря двигунами дорожньої техніки, потім ці викиди осаджуються на ґрунт і потрапляють у водні об'єкти прилеглої території.

Під час проведення дорожніх робіт (нове будування, капітальне ремонтування або реконструювання) відбувається вплив на довкілля від будівельної техніки та від виконання самих робіт (риття, переміщення та пересипання ґрунту, піску, щебню; влаштування шарів дорожнього одягу; влаштування покриття). Тривалість дії впливів залежить від обраної технології та задіяної техніки.

Під час експлуатування автомобільної дороги відбуваються викиди забруднюючих речовин від транспортних потоків, які рухаються автомобільною дорогою. Нерівний зруйнований з надмірною шорсткістю покриття автомобільної дороги веде до збільшення витрат палива [2, 3], що в свою чергу веде до збільшення викидів забруднюючих речовин. Невчасно або неякісно зроблений поточний ремонт елементів конструкцій автомобільної дороги або конструкцій для обслуговування автомобільної дороги може привести до зменшення періоду між капітальними ремонтами, що веде до додаткових економічних витрат та впливів на довкілля.

Основна частина

До початку дорожніх робіт фахівці планують задачі щодо мінімізації витрат часу і коштів, впливу на навколишнє середовище, зменшення незручностей для користувачів. Для цього спеціалісти збирають та аналізують вихідні дані. Якщо це існуюча автомобільна дорога, оцінюють її стан, аналізують ступінь зносу дорожнього покриття, інженерних конструкцій, рівень навантаження на дорогу за рахунок збільшення інтенсивності руху транспортного потоку, вплив автомобільної дороги на навколишнє середовище. Розглядають також можливість використання енергозберігаючих технологій (холодний чи гарячий ресайклінг, використання відходів в конструкції дорожнього одягу).

Тобто необхідно враховувати паралельно три складові однієї системи:

- технологічну (використання сучасних довговічних матеріалів та технологій для забезпечення стійкості конструкції);
- економічну (порівняння витрат для різних варіантів під час влаштування, ремонтування та експлуатування);
- екологічну (максимальне збереження природного середовища поряд з автомобільною дорогою, мінімізування викидів забруднюючих речовин).

Особливу увагу приділяють функціонуванню та аналізу складних систем [4, 5].

Найпростішою моделлю системи є модель «чорної скриньки», в якій розглядають призначення та поведінку системи, а її будову відображають у зв'язках із зовнішнім середовищем. Зв'язки з середовищем, що йдуть у систему — це входи, які впливають на неї, а зв'язки, що виходять із системи — виходи, це результати її функціонування, які впливають на зміни у середовищі. В якості «чорної скриньки» розглядаються об'єкти дослідження, внутрішня структура яких невідома або не береться до уваги. Іноді достатньо змістовного опису входів та виходів системи. Звісно, що за допомогою тільки моделі «чорної скриньки» неможливо вивчити внутрішню структуру системи. Необхідно більш докладно дослідити структуру системи, її функції, взаємозв'язки елементів, фактори впливу на систему та життєвий цикл системи. Суть методу «білої скриньки» полягає в повному розумінні та використанні внутрішньої структури, алгоритмів і логіки системи. Суть методу «сірої

скриньки» полягає в комбінації підходів, коли внутрішні процеси системи відомі частково, але не повністю. Процес будівництва автомобільної дороги найчастіше відноситься до методу «сірої скриньки», оскільки ми маємо достатньо інформації про властивості матеріалів, технічні нормативи, технологічні процеси, як влаштовані конструктивні шари дороги. Але не всі внутрішні процеси повністю відомі або контрольовані. Наприклад, точна взаємодія з ґрунтом у кожній конкретній місцевості, довготривала поведінка матеріалів у різних кліматичних умовах, вплив навантаження від кліматичних умов, транспортних потоків з часом. Тому оперують досвідом та випробуваннями.

Автомобільну дорогу можна представити як системний об'єкт, у якого є вхід, процес, вихід (рис. 1).

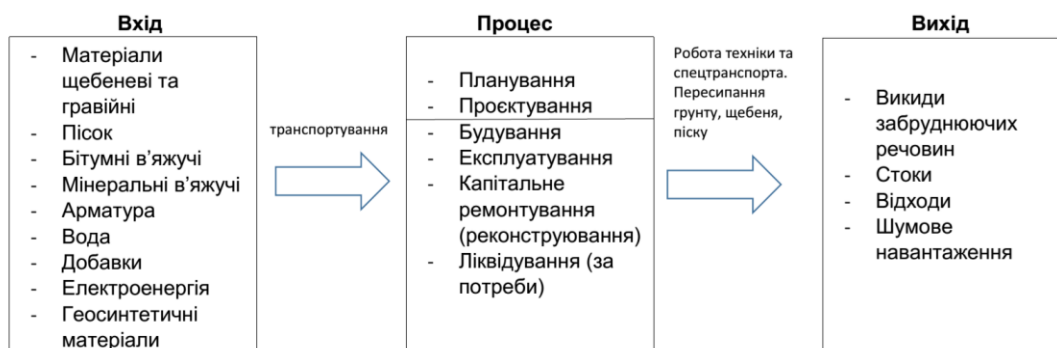


Рисунок 1 — Системний об'єкт «Вхід — процес — вихід»

Входом системи служать матеріали для влаштування конструкції автомобільної дороги (щебінь або гравій, пісок, в'язучі, арматура, добавки, геосинтетичні матеріали тощо), електроенергія, вода.

У результаті процесу влаштування та експлуатування автомобільної дороги утворюються викиди забруднюючих речовин, стоки, відходи, шумове навантаження.

За допомогою системного аналізу автомобільну дорогу розглядають як цілісну систему, яка складається з багатьох окремих елементів. Основним критерієм віднесення елемента до системи є його участь в процесах системи [6].

Одним з інструментів системного аналізу є морфологічна матриця, яка допомагає:

- перерахувати всі можливі варіанти системи;
- комбінувати різні варіанти елементів системи;
- оцінювати їх і вибирати найкращий варіант.

Пропонується морфологічна матриця для конструкції автомобільної дороги (рис. 2). Для цього задану систему (автомобільну дорогу) розділяють на функціональні елементи, які будуть наділені важливими характеристиками і параметрами об'єкту.

У вертикальних стовпчиках морфологічної матриці наведені етапи життєвого циклу (функціональні елементи) автомобільної дороги. Виділені чотири основних функціональних елементи: планування, проектування, дорожні роботи, експлуатування та ліквідування (за потреби). Для кожного з функціональних елементів виділяють основні морфологічні ознаки, від яких залежать економічні та екологічні показники.

Для функціонального елемента «планування» виділено чотири основні ознаки: 1 — маршрут траси, 2 — дорожньо-кліматична зона, 3 — географічні дані, 4 — геологія, гідрогеологія.

Для функціонального елемента «проектування» виділено три основні ознаки: 5 — категорія автомобільної дороги, 6 — матеріал покриття, 7 — матеріали конструкції дорожнього одягу.

Для функціонального елемента «дорожні роботи» виділено чотири основні ознаки: 8 — вид робіт, 9 — технологія, 10 — тривалість періоду дорожніх робіт, 11 — техніка.

Для функціонального елемента «експлуатування» виділено чотири основні ознаки: 12 — моніторинг, 13 — утримування, 14 — дрібне ремонтування, 15 — період між капітальним ремонтуванням.

Окремо винесено ознаку «ліквідування». Ліквідування відбувається у випадку, якщо автомобільна дорога втратила свою цінність і припинилось її експлуатування.

Конструкцію дорожнього одягу та матеріал покриття приймають виходячи з транспортно-експлуатаційних вимог, інтенсивності руху та складу автотранспортних засобів в його потоці, кліматичних ґрунтово-геологічних умов, санітарно-гігієнічних вимог, вимог безпеки та комфортності руху, забезпеченості місцевими будівельними матеріалами. Конструкцію дорожнього одягу розробляють для кожної ділянки дороги або ряду ділянок, якщо вони характеризуються схожими природними умовами та однаковими розрахунковими навантаженнями.

Для прикладу розглянемо нове будівництво автомобільної дороги II категорії з асфальтобетонним покритвом, конструкція дорожнього одягу така [7]:

ЩМА-20(15). БМПП 50/70-65 — 5 см;

Підґрунтовка ЕКШМ-50 — 0,40 л/м²;

АБ.Кр.Щ.А1.НП. БМПА 50/70-60 — 12 см;

Підґрунтовка ЕКШ-50 — 1,20 л/м²;

ЩПС-40, укріплена цементом, марка матеріалу М20 — 17 см;

ЩПС С5 — 21 м;

Пісок щільний природний або з відсівів дроблення гірських порід — 20 м;

ГТ.Н.Т-1.

Якщо позначити кожен варіант реалізації параметром x_{ij} , морфологічна формула такої конструкції дорожнього одягу буде мати вигляд:

$$x_{1.3} + x_{2.2} + x_{3.1} + x_{4.3} + x_{5.2} + x_{6.1} + x_{7.11} + x_{7.2} + (x_{7.1}; x_{7.2}) + (x_{7.1}; x_{7.2}; x_{7.4}) + x_{7.3} + x_{7.6} + x_{7.3} + x_{7.5} + x_{8.1} + x_{9.1} + x_{10.10} + 2x_{11.10} + 3x_{11.1} + 2x_{11.4} + x_{11.13} + x_{11.3} . \quad (1)$$

Автомобільна дорога запланована без обходу населених пунктів (пряма $x_{1.3}$), у II дорожньо-кліматичній зоні ($x_{2.2}$), у рівнинній зоні ($x_{3.1}$), на ділянці поширені глинисті ґрунти ($x_{4.3}$). Конструкція дорожнього одягу автомобільної дороги II категорії ($x_{5.2}$) з асфальтобетонним покритвом ($x_{6.1}$) складається з наступних шарів: геотекстиль ($x_{7.11}$), пісок ($x_{7.2}$), щебенево-піщана суміш ($x_{7.1} + x_{7.2}$), щебенево-піщана суміш укріплена цементом ($x_{7.1} + x_{7.2} + x_{7.4}$), бітумна емульсія ($x_{7.3}$), шар асфальтобетону крупнозернистого, щільного типу А1, непереривчастого зернового складу ($x_{7.6}$), бітумна емульсія ($x_{7.3}$), шар ЩМА ($x_{7.5}$). Заплановано нове будівництво автомобільної дороги ($x_{8.1}$). Передбачається технологія укотковування асфальтобетонної суміші ($x_{9.1}$). Тривалість періоду дорожніх робіт становить 12 місяців ($x_{10.10}$). Буде задіяна основна будівельна техніка: автомобілі бортові — 2 шт ($x_{11.10}$), екскаватори — 3 шт ($x_{11.1}$), катки дорожні — 2 шт ($x_{11.4}$), електростанція пересувна — ($x_{11.13}$), асфальтоукладальник — ($x_{11.3}$).

Розглянемо приклад нового будівництва автомобільної дороги II категорії із цементобетонним покритвом, конструкція дорожнього одягу:

Цементобетон дорожній В_б4,4; В30; F200; W8 — 26 см;

Плівка поліетиленова;

Цементобетон дорожній В_б1,2; В7,5; F75; W4 — 18 см;

ЩПС С5 — 21 м;

Пісок щільний природний або з відсівів дроблення гірських порід — 20 м;

ГТ.Н.Т-1.

Морфологічна формула такої конструкції дорожнього одягу буде мати вигляд:

$$x_{1.2} + x_{2.1} + x_{3.1} + x_{4.4} + x_{5.2} + x_{6.2} + x_{7.11} + x_{7.2} + (x_{7.1}; x_{7.2}) + 2x_{7.7} + x_{8.1} + x_{10.11} + 2x_{11.10} + 3x_{11.1} + x_{11.9} + x_{11.5} + x_{11.7} + x_{11.15} + x_{11.8} + x_{11.16} . \quad (2)$$

Автомобільна дорога запланована з обходом населеного пункту ($x_{1.2}$), у I дорожньо-кліматичній зоні ($x_{2.1}$), у рівнинній зоні ($x_{3.1}$), на ділянці поширені піщані ґрунти ($x_{4.4}$). Конструкція дорожнього одягу автомобільної дороги II категорії ($x_{5.2}$) із цементобетонним покритвом ($x_{6.2}$) складається з наступних шарів: геотекстиль ($x_{7.11}$), пісок ($x_{7.2}$), щебенево-піщана суміш ($x_{7.1} + x_{7.2}$), 2 шари цементобетону ($x_{7.7}$). Заплановано нове будівництво автомобільної дороги ($x_{8.1}$). Тривалість періоду дорожніх робіт становить більше 12 місяців ($x_{10.11}$). Буде задіяна основна будівельна техніка: автомобілі бортові — 2 шт ($x_{11.10}$), екскаватори — 3 шт ($x_{11.1}$), автомобіль-самоскид — ($x_{11.9}$),

бетонозмішувач — ($x_{11.5}$), бетоноукладач — ($x_{11.7}$), нарізувач швів у бетоні — ($x_{11.15}$), машина шліфувальна — ($x_{11.8}$), машина поливальна — ($x_{11.16}$).

Після створення таблиці морфологічної матриці розглядають усі можливі комбінації елементів, аналізують варіанти за критеріями: довговічність, вартість, швидкість будувannya, стійкість до навантажень, ремонтпридатність, екологічний вплив тощо.

Морфологічна матриця структуровано розкладає проблему на частини, дає змогу системно комбінувати рішення та обирати оптимальну конструкцію автомобільної дороги на основі комплексного аналізу всіх можливих варіантів.

Дослідження, які проводили для найбільш поширених типів дорожнього покриття — асфальтобетону та цементобетону показали, що початкова вартість цементобетонного покриття є більш висока порівняно з асфальтобетонним покритвом (за рахунок необхідності використання спеціалізованого комплексу машин; гіршої ремонтпридатності у порівнянні з нежорстким дорожнім одягом; складної технології) [8, 9]. Міцність цементобетонних доріг забезпечується особливою технологією, яка включає створення та накладення кількох шарів на ґрунт. Можемо бачити, що процес будувannya цементобетонних доріг значно складніший і довший за будувannya асфальтобетонних доріг. Звичайний цементобетон набирає міцність 28 діб, використання сучасних домішок дозволяє скоротити процес до 7 днів, але це підвищує вартість.

Однак асфальтобетонний покриття вимагає частішого ремонтування, відповідно частіше працює техніка і відбуваються викиди забруднюючих речовин від неї. Експлуатаційне утримання цементобетонних покриттів обмежується герметизацією та ремонтом швів протягом всього строку служби (від 35 до 40 років), за умови дотримання технології під час первинного влаштування покриття. Протягом цього періоду може відбутися два капітальних ремонти асфальтобетонного покриття та кілька поточних ремонтів з ліквідацією вибоїн. Термін експлуатації дорожнього одягу між капітальними ремонтами визначено у ДБН В.2.3-4:2015 [10]. Тобто, витрати на експлуатаційне утримання асфальтобетонних покриттів можуть бути значно вищі ніж цементобетонних. Хоча за недотриманням технології влаштування цементобетонного покриття тріщина в такому покритті може коштувати мільйони гривень, тому цементобетонні дороги жодних помилок не допускають. Також потребує уваги те, що під час проведення капітального ремонтування автомобільної дороги з асфальтобетонним покритвом достатньо перекрити одну смугу, а під час заміни покриття з асфальтобетонного на цементобетонний необхідно повністю перекривати дорогу та передбачати тимчасові об'їзди або використання інших шляхів руху транспортних потоків.

Слід відмітити, що під час виробництва цементу відбуваються значні викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря [11]. Виробництво цементу є високоенергетичним процесом, який передбачає випалювання клінкеру, в результаті чого викидається значна кількість вуглекислого газу, а також забруднюючі речовини, такі як діоксид сірки, оксиди азоту, оксид вуглецю та інші забруднюючі речовини. Точний склад викидів забруднюючих речовин залежить від типу та кількості палива, яке використовують для випалювання. Виробництво цементобетону — це процес приготування суміші на основі цементу, води, щебню або гравію, піску та хімічних добавок (за потреби) із подальшим укладанням, ущільненням і твердінням для створення жорсткого дорожнього покриття. Виробництво асфальтобетону передбачає нагрівання та змішування бітуму з щебнем чи гравієм, піском та мінеральними добавками. Під час цього процесу вивільняються летючі органічні сполуки та тверді частинки. Також під час експлуатування автомобільної дороги з асфальтобетонним покритвом відбуваються випаровування вуглеводнів за високих температур влітку [12, 13].

Якщо порівнювати різні технології влаштування нежорсткого покриття, то наприклад, використання технології теплового асфальтобетону (WMA) має ряд переваг порівняно з технологією гарячого асфальтобетону (HMA): можливість влаштування покриття в холодну погоду, легше досягти необхідної щільності за допомогою WMA, ніж за допомогою HMA, потрібно менше енергії для нагріву суміші, утворюється менше забруднюючих речовин. Незважаючи на це, дослідження показали, що довговічність такого покриття не висока (з причини високої водопроникності та невисокої адгезії). Тому такий тип покриття не придатний для використання на автомобільних дорогах з високою інтенсивністю транспортних потоків [14, 15].

Вибираючи між автомобільними дорогами з асфальтобетонним або цементобетонним покриттям, необхідно врахувати весь життєвий цикл матеріалів — від виробництва до утилізації. Незважаючи на те, що обидва матеріали мають впливи на навколишнє середовище, прогрес у галузі технологій та практичного досвіду допомагає зменшити ці впливи. Для капітального ремонтування асфальтобетонного покриття використовують екологічні технології (холодний чи гарячий ресайклінг), тоді як переваги цементобетонного покриття в його довговічності, що зменшує потреби в технічному обслуговуванні.

Висновки

Використання методів системного аналізу для обробки великих обсягів даних щодо стану доріг, погодних умов, дорожнього руху і навіть економічної активності у різних регіонах дозволить точно прогнозувати коли і на яких ділянках потрібно проводити капітальне ремонтування, а також визначати пріоритети для проведення ремонтування.

Системний аналіз дозволяє підходити до створення автомобільної дороги комплексно, враховуючи всі етапи її життєвого циклу, що забезпечує ефективне використання ресурсів, довговічність інфраструктури, мінімізацію впливу на довкілля.

Перспективи використання методу системного аналізу в Україні для автомобільних доріг є дуже обнадійливими, і якщо ці методи будуть впроваджені на масштабному рівні, це дозволить значно підвищити ефективність та зменшити витрати на дорожню інфраструктуру. Крім того, використання цих методів може забезпечити більшу стійкість і безпеку дорожньої мережі, покращити якість обслуговування та сприяти сталому розвитку транспортної інфраструктури з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Список літератури

1. Гандзюра В. П. Системний аналіз якості навколишнього середовища: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ, 2020. 180 с.
2. Fardzanela Suwanto, Tony Parry, Gordon D. Airey. Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 25(3). P. 1–27. November 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2278149>.
3. Otto Mora, Miguel Figueroa, Claudia Velosa, Daniel Alfonso. Effect of road quality on fuel consumption and the generation of externalities derived from transport. Case of study: Barranquilla, Colombia. *Espacios*. Year 2020. Vol. 41 (Issue 05).
4. Варенко В. М. Системні методи в аналітиці: практика і проблеми вибору. *Бібліотекознавство. Документознавство. Інформологія*. 2022. № 1. С. 48–54
5. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. Київ : Видавнича група BHV, 2007. 544 с.
6. Матейчик В. П. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Теорія технічних систем». Київ, 2005. 22 с.
7. Альбом конструкцій дорожнього одягу <https://forms.gle/W5FNhNvLgG45AUcd8> (дата звернення 09.09.2025).
8. Нагайчук В. М., Радовський Б. С. Світовий досвід та сучасні підходи до використання цементобетонного покриття. *Дороги і мости*. Київ, 2020. Вип. 21. С. 188–200. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.188>.
9. Mert Atakan, Arzuhan Burcu Gültekin, Kürşat Yıldız. A Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt and Rigid Pavements. Conference: 6th international Project and Construction Management Conference (IPCMC2020). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. November 2020.
10. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2015, 45 с. (Інформація та документація).
11. Salim Barbhuiya, Fragkoulis Kanavaris, Bibhuti Bhusan Das, Maria Idrees. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. February 2024. Volume 86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108861>.

12. Atef MF Mohammed, Inas A Saleh. A review of environmental emissions from asphalt plants and paving. *Material Science & Engineering International Journal*. April 2023. Volume 7, Issue 2. DOI: [10.15406/mseij.2023.07.00205](https://doi.org/10.15406/mseij.2023.07.00205).
13. Peeyush Khare. Asphalt-related emissions are a major missing source of secondary organic aerosol precursors. *Science Advances* 6(36). September 2020. DOI: [10.1126/sciadv.abb9785](https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9785).
14. Abdalrhman Milad, Ali Mohammed Babalghaith, Abdalnaser M. Al-Sabaei, Anmar Dulaimi, Abdulmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, Nur Izzi Md Yusoff. A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (IJERPH). November 2022. DOI: [10.3390/ijerph192214863](https://doi.org/10.3390/ijerph192214863).
15. Gilda Ferrotti, Enrico Mancinelli, Giorgio Passerini, Francesco Canestrari. Comparison of energy and environmental performance between warm and hot mix asphalt concrete production: A case study. *Construction and Building Materials*. Volume 418. 8 February 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135453>.

References

1. Handziura V. P. Systemnyi analiz yakosti navkolyshnoho seredovyscha: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchych navchalnykh zakladiv (Analysis of Environmental Quality: A Textbook for Students of Higher Education Institutions) Kyiv, 2020. 180 p. [in English].
2. Fardzanela Suwanto, Tony Parry, Gordon D. Airey. Review of methodology for life cycle assessment and life cycle cost analysis of asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design*. 25(3). P. 1–27. November 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2278149> [in English].
3. Otto Mora, Miguel Figueroa, Claudia Velosa, Daniel Alfonso. Effect of road quality on fuel consumption and the generation of externalities derived from transport. Case of study: Barranquilla, Colombia. *Espacios*. Year 2020. Vol. 41 (Issue 05) [in English].
4. Varenko V. M. Systemni metody v analitytsi: praktyka i problemy vyboru (Systemic methods in analytics: practice and problems of choice). *Bibliotekoznavstvo. Dokumentoznavstvo. Informolohiia*. 2022. No. 1. P. 48–54 [in Ukrainian].
5. Zghurovskyi M. Z., Pankratova N. D. Osnovy systemnoho analizu (Fundamentals of System Analysis). Kyiv : Vydavnycha hrupa VNV, 2007. 544 p. [in Ukrainian].
6. Mateichyk V. P. Metodychni vказivky do vykonannia praktychnykh robot z dystsypliny «Teoriia tekhnichnykh system» (Methodological guidelines for practical work in the discipline «Theory of Technical Systems»). Kyiv, 2005. 22 p. [in Ukrainian].
7. Albom konstrukttsii dorozhnoho odiahu (Album of road pavement structures) <https://forms.gle/W5FNhNvLgG45AUcd8> (data zvernennia 09.09.2025) [in Ukrainian].
8. Nahaichuk V. M., Radovskyi B. S. Svitovi dosvid ta suchasni pidkhody do vykorystannia tsementobetonnoho pokryttia (World experience and modern approaches to the use of cement concrete pavement). *Dorohy i mosty*. Kyiv, 2020. Issue 21. P. 188–200. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.1889> [in Ukrainian].
9. Mert Atakan, Arzuhan Burcu Gültekin, Kürşat Yildiz. A Comparative Life Cycle Assessment of Asphalt and Rigid Pavements. Conference: 6th international Project and Construction Management Conference (IPCMC2020). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. November 2020 [in English].
10. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo (Automobile roads. Part I. Design. Part II. Construction). Kyiv, 2015, 45 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
11. Salim Barbhuiya, Fragkoulis Kanavaris, Bibhuti Bhusan Das, Maria Idrees. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of Building Engineering*. February 2024. Volume 86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108861> [in English].
12. Atef MF Mohammed, Inas A Saleh. A review of environmental emissions from asphalt plants and paving. *Material Science & Engineering International Journal*. April 2023. Volume 7, Issue 2. DOI: [10.15406/mseij.2023.07.00205](https://doi.org/10.15406/mseij.2023.07.00205) [in English].

13. Peeyush Khare. Asphalt-related emissions are a major missing source of secondary organic aerosol precursors. *Science Advances*. 6(36). September 2020. DOI: [10.1126/sciadv.abb9785](https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9785) [in English].
14. Abdalrhman Milad, Ali Mohammed Babalghaith, Abdulnaser M. Al-Sabaei, Anmar Dulaimi, Abdualmtalab Ali, Sajjala Sreedhar Reddy, Munder Bilema, Nur Izzi Md Yusoff. A Comparative Review of Hot and Warm Mix Asphalt Technologies from Environmental and Economic Perspectives: Towards a Sustainable Asphalt Pavement. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (IJERPH). November 2022. DOI: [10.3390/ijerph192214863](https://doi.org/10.3390/ijerph192214863) [in English].
15. Gilda Ferrotti, Enrico Mancinelli, Giorgio Passerini, Francesco Canestrari. Comparison of energy and environmental performance between warm and hot mix asphalt concrete production: A case study. *Construction and Building Materials*. Volume 418. 8 February 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135453> [in English].
-

Inessa Rutkovska¹, Ph.D., Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7832-4222>

Lesya Yaroshchuk², <https://orcid.org/0000-0003-1550-0131>

¹National Transport University (NTU), Kyiv, Ukraine

²State Enterprise «National Institute for Infrastructure Development» (SE «NIDI»), Kyiv, Ukraine

SYSTEMATIC APPROACH TO ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT THROUGHOUT THE LIFE CYCLE OF A HIGHWAY

Abstract

Introduction. The road network is a key component of infrastructure, providing numerous opportunities and conveniences, enabling long-distance transportation of goods and passengers. The comfort and well-being of people in various regions and remote areas of the country depend on the uninterrupted movement of vehicles along highways. Unfortunately, over time and due to various external factors, road structures deteriorate and require restoration to extend their service life.

Problem statement. Along with the many advantages of road network operation and development, there is also a negative environmental impact at all stages of the life cycle. Over time, climatic conditions and increasing loads affect road structures, leading to pavement wear, damage, and the need for repairs during operational maintenance. Road works during major repairs or reconstruction require significant amounts of machinery and large volumes of materials.

Objective. There is a need to develop new scientific approaches and research methods aimed at minimizing the use of natural resources and reducing environmental impacts throughout the life cycle of a highway.

Materials and methods. The article proposes the use of the systems analysis method. This method helps to comprehensively assess the condition of existing highways, determine optimal repair technologies, ensure efficient resource use, and minimize both economic costs and environmental impact.

Results. Several known and new methods of systems analysis have been summarized and systematized under modern conditions, with a perspective on their integrated application in the study of the life cycle of a highway.

Conclusions. The proposed systematic approach will make it possible to process large volumes of data, account for interrelated parameters, comprehensively evaluate various options for road structure design, and carry out road works with minimal costs and environmental impact.

Keywords: highway, construction materials, environmental impact, road works, highway life cycle, air pollution, pavement structure, systems analysis.

РОЗВИТОК АРХІТЕКТУРИ ТА БУДІВНИЦТВА НА ТЕРЕНАХ ПРИКАРПАТТЯ

Анотація

Вступ. Архітектура та будівництво завжди були важливими чинниками формування культурного, економічного й соціального обличчя будь-якого регіону. Особливо це стосується Прикарпаття — території, що відзначається різноманітними природними умовами, багатою історією та унікальними традиціями. Розвиток архітектури на цих землях відбувався у постійному взаємозв'язку з природним середовищем, історико-політичними обставинами та суспільними потребами населення. Дослідження даної теми є актуальним, оскільки воно дає можливість простежити становлення архітектурної думки в регіоні, виявити її особливості, визначити впливи зовнішніх культурних факторів та зрозуміти роль Прикарпаття у загальному контексті розвитку української архітектури.

У статті розглядається широкий спектр питань, пов'язаних із формуванням та трансформацією архітектурного середовища Прикарпаття. Висвітлено етапи розвитку архітектури — від давньоруського часу, коли домінували дерев'яні сакральні споруди, до епохи бароко, класицизму та модерну, які принесли у регіон нові форми та стилістичні рішення. Значну увагу приділено народному будівництву, що формувалося під впливом природних умов та господарських потреб. Традиційне дерев'яне зодчество Прикарпаття — унікальне явище, яке увійшло до культурної спадщини не лише України, а й Європи. Характерними рисами є використання місцевих матеріалів, органічна інтеграція з ландшафтом, а також символічна наповненість архітектурних форм.

Мета. Особливе місце у дослідженні займає сакральна архітектура регіону. Церкви, монастирі та каплиці становлять вагомий частину архітектурної спадщини Прикарпаття. Вони не лише виконували релігійні функції, а й слугували осередками освіти, культури та національної самосвідомості. Дерев'яні церкви Гуцульщини та Бойківщини, що внесені до списку світової спадщини ЮНЕСКО, є прикладами унікального архітектурного феномену. Їхня оригінальна композиційна структура, декоративне оздоблення та гармонія з природним середовищем стали символом глибокої духовності та високої майстерності місцевих будівничих.

Окремо проаналізовано вплив історичних подій та соціально-економічних процесів на розвиток архітектури. Періоди зміни державної належності Прикарпаття (Русь, Річ Посполита, Австро-Угорщина, Польща, СРСР, сучасна Україна) принесли різні архітектурні традиції та стилі. У містах і містечках з'явилися нові форми житлової та громадської забудови, впроваджувалися інженерні інновації, змінювалося планування міського простору. Так, у період австрійського панування у містах регіону активно розвивалися стилі історизму, сецесії та модерну, що надавало їм європейського вигляду.

Результат. Сучасний етап розвитку архітектури на теренах Прикарпаття характеризується поєднанням традиційних та інноваційних тенденцій. З одного боку, відбувається активна реставрація та збереження пам'яток архітектури, що є важливим аспектом формування національної ідентичності та туристичної привабливості регіону. З іншого — сучасні архітектори намагаються впроваджувати нові матеріали, технології та концепції, що відповідають вимогам функціональності, енергоефективності та сталого розвитку. Значного поширення набувають ідеї гармонізації архітектури з природним середовищем, що є надзвичайно важливим для гірських і передгірських територій.

Висновки. Таким чином, архітектура та будівництво Прикарпаття є своєрідним відображенням історичного та культурного розвитку регіону. Вони поєднують у собі елементи народних традицій та європейських стилів, відображають духовність, творчий потенціал та прагнення населення до збереження своєї самотності. Дослідження цих процесів дозволяє не лише краще зрозуміти минуле, але й сформувані стратегічні орієнтири для сучасного архітектурного розвитку.

У результаті проведеного аналізу доведено, що архітектурна спадщина Прикарпаття є важливою складовою культурного надбання України. Вона становить основу для подальшого розвитку архітектурної науки, практики та туристичної індустрії. Збереження та популяризація цієї спадщини повинні стати одним із пріоритетних завдань сучасного суспільства.

Ключові слова: архітектура, будівництво, громадські споруди, дерев'яні храми, історико-культурна спадщина, регіональні особливості, сакральна архітектура, урбаністичний розвиток.

Вступ

Архітектура є одним із найвиразніших показників культурного розвитку народу, його соціальних і духовних потреб. Вона формує образ місцевості, зберігає пам'ять поколінь та відображає історичні етапи становлення суспільства. Прикарпаття — це регіон із багатою історією, розташований на стику різних культурних і політичних впливів, що наклало відбиток на його архітектурний розвиток. Територія сучасної Івано-Франківської області, частково Чернівецької та Львівської, у різні часи належала до Галицько-Волинського князівства, Речі Посполитої, Австро-Угорської імперії, міжвоєнної Польщі та Радянського Союзу. Кожен із цих періодів залишив архітектурні та будівельні пам'ятки, які сьогодні формують неповторний образ Прикарпаття. Архітектурний образ міста формується протягом століть. Кожна епоха залишає свій відбиток у вигляді сакральних споруд, житлових будинків, адміністративних будівель, громадських просторів. Івано-Франківськ, заснований у XVII ст. як фортеця Станиславів, має особливо багатшарову архітектуру, в якій переплелися риси бароко, класицизму, сецесії, радянського модернізму та сучасних тенденцій.

Одним із ключових явищ кінця XX — початку XXI ст. стало активне будівництво нових житлових комплексів і громадських споруд. Новобудови сьогодні визначають динаміку розвитку міського простору, змінюють силует Івано-Франківська та суттєво впливають на його архітектурне середовище.

Мета цієї статті — проаналізувати роль новобудов у сучасній архітектурі Івано-Франківська, виявити їхній внесок у формування урбаністичного середовища, окреслити проблеми та перспективи.

Метою цієї статті є комплексний аналіз розвитку архітектури та будівництва на теренах Прикарпаття — від давніх часів до сьогодення, визначення основних тенденцій, стилів та особливостей формування архітектурного середовища.

Історичні передумови архітектурного розвитку Прикарпаття

Перші поселення на території Прикарпаття з'явилися ще в добу неоліту та бронзи, однак саме в часи Київської Русі ця земля набула значення як частина Галицького князівства. У княжу добу архітектура розвивалася переважно у формах дерев'яних сакральних споруд та укріплень. На теренах регіону існували численні городища, земляні вали та дерев'яні замки.

Особливого розвитку набули традиції дерев'яної сакральної архітектури. Унікальні церкви й каплиці, споруджені без жодного цвяха, стали характерною ознакою Прикарпаття. Вони поєднували елементи візантійської архітектури з народними традиціями теслярства. Найбільш відомими пам'ятками є церкви у Коломиї, Косові, Яремчі та Рогатині. Церква Святого Духа в Рогатині (XVI ст.) сьогодні входить до списку Світової спадщини ЮНЕСКО.

Народне житло Прикарпаття традиційно було збудоване з дерева. Хати з високими двосхилими дахами вкривали соломою чи гонтом. Такі споруди були практичними в умовах гірського клімату та відповідали господарським потребам селян.



Рисунок 1

Архітектура Прикарпаття у часи Речі Посполитої та Австро-Угорської імперії

У XIV–XVII ст. на території Прикарпаття зводяться численні замки й оборонні споруди. Відомими є Пнівський замок біля Надвірної, Галицький замок, а також укріплення в Снятині та Коломиї. Ці споруди мали стратегічне значення, адже регіон постійно зазнавав нападів татар і турків.

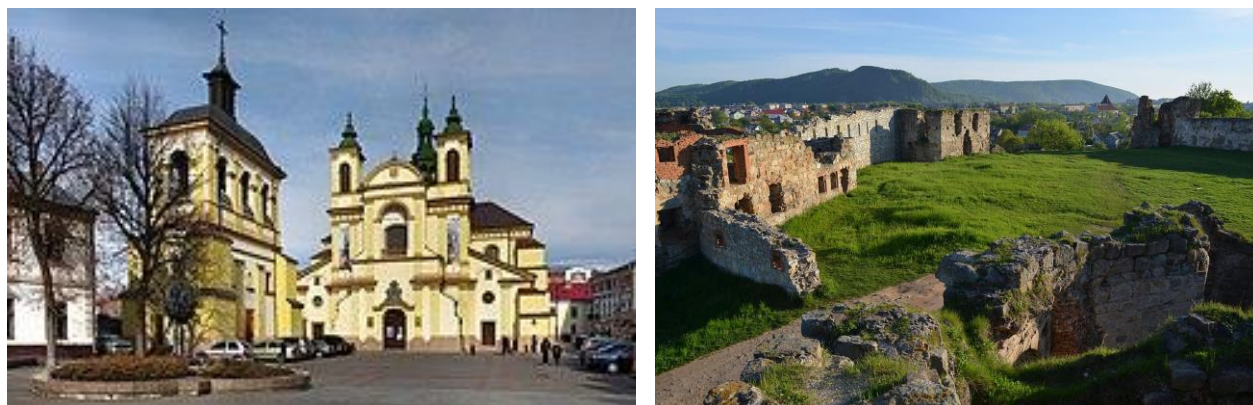


Рисунок 2

Міста Прикарпаття у період Речі Посполитої розвивалися за магдебурзьким правом. З'явилися ринкові площі, ратуші, костели. У Коломиї й Станиславові (сучасному Івано-Франківську) формувалися центри торгівлі та ремесел.

Великий вплив на архітектуру справила доба Австро-Угорщини (кінець XVIII — початок XX ст.). У цей час у містах активно розвивається цивільне будівництво. Зводяться школи, адміністративні будівлі, вокзали, театри. Особливу увагу австрійська влада приділяла містобудуванню. У Станиславові з'явився регулярний план забудови, а в Коломиї було споруджено величну будівлю міської ратуші.

Архітектурні стилі цього періоду — класицизм, історизм, а наприкінці XIX ст. — сецесія (ар-нуво). Будинки з характерними орнаментами, балконами та вітражами й досі прикрашають вулиці міст Прикарпаття.

Архітектура та будівництво XIX — початку XX століття

XIX століття стало періодом активного розвитку інфраструктури. Залізничні колії, що прокладалися через Прикарпаття, стимулювали будівництво вокзалів, мостів, складів. У містах з'явилися багатоповерхові кам'яниці з магазинами на першому поверсі та житловими квартирами вище.



Рисунок 3

Сакральна архітектура також зазнала змін. У цей час зводяться величні костели та греко-католицькі церкви, виконані в неоготичному та неороманському стилях. Прикладом є костел у Делятині чи церква в Коломиї.

У архітектурі з'являються мотиви модерну. В Івано-Франківську та Коломиї споруджено житлові та громадські будівлі з елементами сецесії — плавними лініями, декоративними орнаментами, вітражами.

Архітектура радянського періоду

Після Другої світової війни Прикарпаття увійшло до складу Радянського Союзу. Цей час відзначився масовим житловим будівництвом. У містах зводилися типові багатоповерхівки — так звані «хрущовки», а пізніше «брежнєвки». Вони мали на меті швидко забезпечити житлом тисячі переселенців і робітників промислових підприємств.

Разом із житловими масивами будували школи, лікарні, заводи. Промисловість визначала вигляд міст. Зокрема, в Івано-Франківську з'явилися великі промислові підприємства, що спричинило швидке зростання міста.

В архітектурі цього періоду домінував функціоналізм. Проте в центрі міст іноді будували споруди з ознаками монументальності — театри, будинки культури, адміністративні споруди. Прикладом є Івано-Франківський обласний музично-драматичний театр імені Івана Франка.

Сучасний розвиток будівництва та архітектури на Прикарпатті

Після проголошення незалежності України у 1991 р. архітектура Прикарпаття увійшла в новий етап розвитку. Основними тенденціями стали:

Реконструкція історичного середовища. У багатьох містах реставруються пам'ятки архітектури: ратуша в Коломиї, історичні кам'яниці Івано-Франківська.



Рисунок 4

Новітня житлова забудова. На околицях міст з'являються сучасні житлові комплекси, багатоповерхові будинки з енергоощадними технологіями.

Приватне будівництво. У селах і приміських зонах активно споруджуються котеджі та садиби, орієнтовані на туризм. Туристична інфраструктура. Завдяки Карпатам розвивається будівництво готелів, туристичних комплексів, гірськолижних баз. Найяскравіший приклад — курорт «Буковель».

У сучасній архітектурі регіону простежується прагнення поєднати традиційні мотиви з сучасними технологіями. Дерев'яні елементи, камінь і скло часто поєднують у нових проєктах.

Роль Прикарпаття у формуванні національної архітектурної спадщини

Прикарпаття має унікальне значення для української архітектури: тут збереглися десятки дерев'яних церков, занесених до спадщини ЮНЕСКО; регіон став лабораторією для поєднання європейських архітектурних стилів із народними традиціями; сучасний розвиток будівництва орієнтується на туристичний потенціал, що робить Прикарпаття важливим регіоном не лише культурно, а й економічно.

Історичний контекст розвитку міста Івано-Франківська

Щоб зрозуміти місце новобудов в архітектурі Івано-Франківська, важливо врахувати історичні етапи його формування.



Рисунок 5

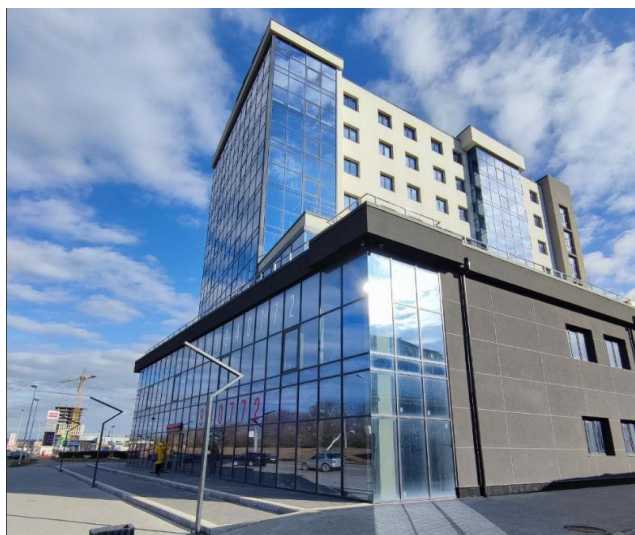


Рисунок 6

XVII–XVIII ст. — період закладання фортеці Станіслава з регулярним планом та ринковою площею.

XIX ст. — час активного розвитку кам'яниць у стилях класицизму, історизму та сецесії.

Радянський період — поява нових житлових масивів, промислових зон, адміністративних будівель.

Незалежна Україна — зростання приватного та комерційного будівництва, поява багатоповерхових комплексів і сучасних бізнес-центрів.

На цьому тлі новобудови стали продовженням урбаністичної традиції, водночас несучи у собі риси глобалізованої архітектури.

Новобудови як фактор зміни архітектурного обличчя Івано-Франківська

Сучасне будівництво в місті переважно зосереджене у житловому секторі. Багатоповерхові комплекси кардинально змінюють вигляд міських околиць та формують нові райони.

Основні риси новобудов:

- багатоповерховість (від 6 до 16 поверхів);
- використання сучасних матеріалів (скло, метал, вентилявані фасади, керамограніт);
- створення внутрішніх дворів і дитячих майданчиків;
- комерційні приміщення на перших поверхах.



Рисунок 7

Новобудови також розширили межі Івано-Франківська, сформувавши нові райони — Пасічна, Каскад, БАМ, а останнім часом — приміські території, які фактично інтегруються у місто.

Внесок новобудов у житлову архітектуру

Основний внесок сучасного будівництва полягає у забезпеченні населення житлом. Івано-Франківськ входить до п'ятірки міст України за обсягами новобудов на душу населення.

Позитивні аспекти:

- розв'язання проблеми житлового дефіциту;
- поява сучасних планувань (студії, дворівневі квартири);
- впровадження енергоощадних технологій;
- створення нових мікрорайонів з інфраструктурою.

Виклики:

- надмірна щільність забудови;
- нестача зелених зон;
- транспортні проблеми через зростання населення в нових масивах.

Таким чином, новобудови вирішують житлові потреби, але водночас ставлять нові завдання для міського планування.

Новобудови у сфері громадських та комерційних споруд

Окрім житлових комплексів, у місті активно споруджуються: торгово-розважальні центри (наприклад, ТРЦ «Велмарт», «Арсен»); бізнес-центри з сучасними офісами; готелі та туристична інфраструктура; медичні та освітні заклади нового типу.

Такі споруди формують сучасний діловий імідж Івано-Франківська як центру Прикарпаття та приваблюють інвесторів і туристів.

Архітектурні стилі та естетика новобудов

Сучасні новобудови в Івано-Франківську здебільшого тяжіють до мінімалізму та функціоналізму. Характерними є: лаконічні форми без надмірного декору; поєднання скла, бетону та металу; контраст кольорів (білий, сірий, чорний, яскраві акценти); велика кількість панорамних вікон.



Рисунок 8

Водночас архітектори все частіше намагаються вписати нові споруди в історичний контекст, використовуючи елементи локальної ідентичності — декоративні мотиви, дерево, природний камінь.

Вплив новобудов на історичне середовище

Найбільш дискусійним є питання співіснування новобудов з історичною архітектурною спадщиною. Центр Івано-Франківська має унікальні пам'ятки XVII–XIX ст., які формують його автентичний образ.

Проблеми:

- поява сучасних споруд у безпосередній близькості до історичних пам'яток;
- ризик втрати архітектурної гармонії;
- недосконалість містобудівних регламентів.

Разом з тим, у випадках вдалого поєднання новобудови можуть підкреслювати історичну архітектуру, створюючи діалог минулого і сучасного.

Економічний та соціальний ефект новобудов

Новобудови відіграють ключову роль у соціально-економічному розвитку міста:

- робочі місця у сфері будівництва та обслуговування;
- стимулюють розвиток малого та середнього бізнесу;
- підвищують інвестиційну привабливість регіону;
- формують комфортне середовище для життя молодих сімей.

Таким чином, нове будівництво стає одним із рушіїв розвитку Івано-Франківська.

Перспективи розвитку новобудов

Майбутнє архітектури Івано-Франківська значною мірою залежатиме від того, як вирішуватимуться проблеми сучасних новобудов.

Основні напрями:

- впровадження принципів сталого розвитку;
- збільшення кількості зелених і громадських просторів;
- інтеграція новобудов у транспортну систему міста;

- збереження історичної спадщини.

У перспективі важливо поєднувати традиції і сучасність, створюючи унікальний архітектурний образ міста.

Висновки

Архітектура та будівництво на теренах Прикарпаття розвивалися під впливом численних історичних та культурних факторів. Від дерев'яних церков княжої доби й оборонних замків Речі Посполитої до модерних кам'яниць австрійського періоду, від радянських житлових масивів до сучасних туристичних комплексів — архітектурне середовище Прикарпаття є багатошаровим і різноманітним.

Сьогодні перед архітекторами регіону стоїть завдання поєднати збереження історичної спадщини з потребами сучасного містобудування. Лише гармонійне поєднання минулого й сучасного дозволить сформувати привабливий архітектурний образ Прикарпаття, який буде відповідати як культурним традиціям, так і викликам ХХІ століття.

Новобудови є невід'ємною частиною архітектурного розвитку Івано-Франківська. Вони не лише задовольняють житлові потреби населення, а й формують новий вигляд міста, його соціально-економічний потенціал та інвестиційну привабливість.

Попри низку викликів — щільну забудову, транспортні проблеми та ризики втрати історичної ідентичності — сучасні новобудови стають важливим чинником урбаністичного поступу. Вони визначають силует міста у ХХІ столітті та вимагають комплексного підходу до планування і гармонізації архітектурного середовища.

Список літератури

1. С. В. Вергунов, Н. С. Вергунова, Л. А. Звенігородський. Основи формоутворення: навч. Посібник. Харків, 2021. 124 с.
2. Сьомка С. В. Основи дизайну архітектурного середовища: підручник. Київ, 2019. 464 с.
3. Зиміна С. Б. Стилі інтер'єру. Київ, 2018. 360 с.
4. Сьомка С. В. Дизайн інтер'єру, меблів та обладнання: підручник. Київ, 2018. 400 с.
5. Олійник О. П. Основи дизайну інтер'єру: навч. посіб. Київ, 2011. 228 с.
6. ДБН Б.2.2-12:2019 Планування і забудова територій. Київ, 2019. 174 с. (Інформація та документація).
7. ДБН 360-92** Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень. Київ, 2002. 135 с. (Інформація та документація).
8. ДБН В.2.5-28:2006 Природне і штучне освітлення. Київ, 2006. 227 с. (Інформація та документація).

References

1. S. V. Verhunov, N. S. Verhunova, L. A. Zvenihorodskyi. Osnovy formoutvorennia: navch. Posibnyk (Fundamentals of form formation: a textbook). Kharkiv, 2021. 124 p. [in Ukrainian].
2. Somka S. V. Osnovy dyzainu arkhitekturnoho seredovyshcha: pidruchnyk (Fundamentals of architectural environment design: a textbook). Kyiv, 2019. 464 p. [in Ukrainian].
3. Zymina S. B. Styli interieru (Interior styles). Kyiv, 2018. 360 p. [in Ukrainian].
4. Somka S. V. Dyzain interieru, mebliv ta obladnannia: pidruchnyk (Interior design, furniture and equipment: a textbook). Kyiv, 2018. 400 p. [in Ukrainian].
5. Oliynyk O.P. Osnovy dyzainu interieru: navch. Posib (Fundamentals of interior design: a manual). Kyiv. 2011. 228 p. [in Ukrainian].
6. DBN B.2.2-12:2019 Planuvannia i zabudova terytorii (Planning and development of territories). Kyiv, 2019. 174 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
7. DBN 360-92** Mistobuduvannia. Planuvannia i zabudova miskykh i silskykh poselen (Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements). Kyiv, 2002. 135 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].
8. DBN V.2.5-28:2006 Pryrodne i shtuchne osvittlenia (Natural and artificial lighting). Kyiv, 2006. 227 p. (Informatsiia ta dokumentatsiia) [in Ukrainian].

Vitalii Vasylyshyn, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0367-1198>

Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

DEVELOPMENT OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION IN THE CARPATHIAN TERRITORIES

Abstract

Introduction. Architecture and construction have always been important factors in the formation of the cultural, economic and social face of any region. This is especially true of the Carpathian region, a territory characterized by diverse natural conditions, rich history and unique traditions. The development of architecture in these lands took place in constant interaction with the natural environment, historical and political circumstances and social needs of the population. The study of this topic is relevant, as it makes it possible to trace the formation of architectural thought in the region, identify its features, determine the influence of external cultural factors and understand the role of the Carpathian region in the general context of the development of Ukrainian architecture. The article considers a wide range of issues related to the formation and transformation of the architectural environment of the Carpathian region. The stages of the development of architecture are highlighted — from the Old Russian period, when wooden sacral buildings dominated, to the Baroque, Classicism and Art Nouveau eras, which brought new forms and stylistic solutions to the region. Considerable attention is paid to folk architecture, which was formed under the influence of natural conditions and economic needs. Traditional wooden architecture of the Carpathians is a unique phenomenon that has become part of the cultural heritage not only of Ukraine, but also of Europe. Characteristic features are the use of local materials, organic integration with the landscape, as well as the symbolic fullness of architectural forms.

Purpose. A special place in the study is occupied by the sacred architecture of the region. Churches, monasteries and chapels constitute a significant part of the architectural heritage of the Carpathians. They not only performed religious functions, but also served as centers of education, culture and national identity. The wooden churches of the Hutsul region and Boykiv region, which are included in the UNESCO World Heritage List, are examples of a unique architectural phenomenon. Their original compositional structure, decorative decoration and harmony with the natural environment have become a symbol of deep spirituality and high skill of local builders.

The influence of historical events and socio-economic processes on the development of architecture is separately analyzed. Periods of change of state ownership of the Carpathian region (Polish-Lithuanian Commonwealth, Austria-Hungary, Poland, USSR, modern Ukraine) brought different architectural traditions and styles. New forms of residential and public buildings appeared in cities and towns, engineering innovations were introduced, and urban space planning changed. Thus, during the period of Austrian rule, the styles of historicism, secession, and modernism were actively developed in the cities of the region, which gave them a European appearance.

Results. The current stage of development of architecture in the Carpathian region is characterized by a combination of traditional and innovative trends. On the one hand, there is an active restoration and preservation of architectural monuments, which is an important aspect of the formation of national identity and tourist attractiveness of the region. On the other hand, modern architects are trying to introduce new materials, technologies and concepts that meet the requirements of functionality, energy efficiency and sustainable development. The ideas of harmonizing architecture with the natural environment are becoming increasingly widespread, which is extremely important for mountainous and foothill areas.

Conclusions. Thus, the architecture and construction of the Carpathian region are a kind of reflection of the historical and cultural development of the region. They combine elements of folk traditions and European styles, reflect the spirituality, creative potential and the desire of the population to preserve their identity. The study of these processes allows not only to better understand the past, but also to form strategic guidelines for modern architectural development.

As a result of the analysis, it was proven that the architectural heritage of the Carpathian region is an important component of the cultural heritage of Ukraine. It forms the basis for the further development of architectural science, practice and the tourism industry. The preservation and popularization of this heritage should become one of the priority tasks of modern society.

Keywords: architecture, construction, historical and cultural heritage, wooden churches, sacred architecture, public buildings, urban development, regional features..

Наукове видання

ДОРОГИ І МОСТИ

Збірник наукових праць

Випуск 32

Головний редактор Безуглий А. О.
Відповідальний редактор Каськів В. І.
Технічний редактор Шевчук О. П.

03113, м. Київ, просп. Берестейський, буд. 57, ДП «НІРІ»

Телефон: +38 (044) 206-98-90
Імейл: roads_bridges@nidi.org.ua

Підписано до друку 24.10.2025
Формат 60x84 $\frac{1}{9}$. Папір офсетний. Друк цифровий.
Умовн.-друк. арк. 29,35. Фіз. друк. арк. 31,56.
Накладна 100 прим.
Поліграфія printto.ua, м. Київ
Телефон: +38 (099) 546-70-78